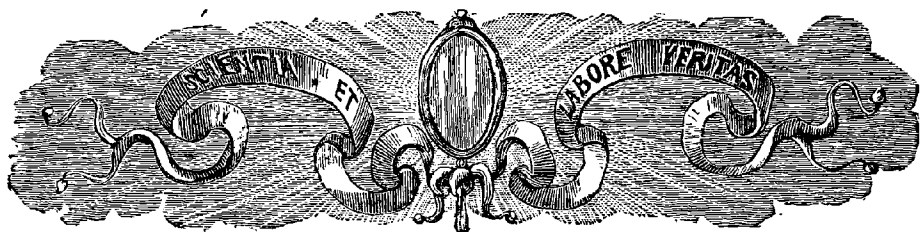


Jules ROUF Éditeur, 14\* cloître Saint-Honoré, Paris





# PHYSIQUE ET CHIMIE

POPULAIRES

SCIENCES MISES A LA PORTÉE DE TOUS

---

## INTRODUCTION HISTORIQUE

---

Cette grande idée, caractère remarquable de la société contemporaine, l'idée de la civilisation par la science, de l'application de la science à l'amélioration de la destinée humaine, ne date guère que du xvi<sup>e</sup> siècle.

Elle a eu pour principal organe l'illustre philosophe Bacon (1560-1626), dont elle est la gloire. Il l'a résumée dans cet aphorisme célèbre :

*« L'homme est l'interprète et l'aide de la nature ; plus il sait, plus il peut ! »*

Le philosophe anglais semblait prévoir avec une perspicacité merveilleuse la société moderne, la nature vaincue par la science, l'industrie affranchie des tâtonnements lents et incertains de l'empirisme, puisant dans les principes généraux établis par les savants de certaines et innombrables applications. Jusqu'à lui la philosophie (et par ce mot il faut entendre la forme matérielle de la philosophie dominante, c'est-à-dire la religion) avait toujours eu la prétention de régenter dogmatiquement les sciences, et elle soutenait ses prétentions dominatrices par la force

des supplices, très libéralement mis à sa disposition par les rois et les maîtres des peuples.

Il n'en est plus ainsi.

On a compris que l'homme peut, par la science, se rendre maître de la nature et de la société elle-même, et donner à ses progrès une direction choisie et voulue.

La Révolution française est une tentative encore inachevée pour construire un état social conformément aux lois scientifiques de la raison. Et, de même que l'industrie emprunte aux sciences physiques et chimiques le principe de l'élasticité de la vapeur, le principe de la communication de l'électricité dans un courant magnétique ou enfin le principe de l'action chimique de la lumière, de même à la science politique la société a pris le principe de la division des pouvoirs, à l'économie politique celui de la liberté du commerce, à la philosophie celui de l'égalité des droits et de la liberté de conscience.

On peut donc prévoir dès aujourd'hui que, dans un avenir qui ne saurait être très éloigné, les sciences modernes changeront la marche des études philosophiques et que les sciences dites *morales* seront absolument modifiées. L'EMBRYOGÉNIE (science des germes, des rudiments des corps organisés) et la PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE (étude des fonctions des êtres vivants) bouleverseront la métaphysique et la PSYCHOLOGIE (étude de l'âme), deux fantômes de science qui deviendront des sciences véritables. La philosophie de l'avenir, la religion, sera de la physiologie perfectionnée. Une meilleure étude de l'instinct des animaux et de la folie dans les aliénés nous fera également revenir de bien des erreurs sur la nature de l'âme et sur les facultés de l'esprit.

En physique, qui sait si nous ne trouverons pas bientôt, dans une étude plus approfondie de l'électricité, la clef des secrets de notre existence? Notre pensée, qui se transporte aussi vite que l'électricité d'un lieu à un autre, présente avec celle-ci un air de parenté ou de similitude qui pourrait au besoin passer pour de l'identité. Il a été démontré par M. Becquerel, à l'Académie des sciences, que « la vie est le résultat d'une action de piles voltaïques fonctionnant continuellement à l'aide de leurs pôles négatifs et positifs correspondant entre eux, et qui cessent d'émettre de l'électricité aussitôt que l'action des piles n'a plus lieu. » Qui sait si l'électricité engendrée par le contact d'un acide ou d'un métal ne diffère pas de celle que produisent des éléments végétaux et animaux, et si l'électricité cérébrale humaine ne produit pas des pensées au lieu de chocs et d'étincelles? L'électricité qui résulte des combinaisons et des décompositions chimiques qui s'opèrent dans le corps humain n'est-elle pas peut-être transformée

en chaleur et ne se passe-t-il pas dans nos organes ce qui se passe dans nos foyers? Tous les travaux des physiciens modernes, et surtout les belles expériences de M. Grow, dont nous parlerons plus tard, tendent à démontrer que le magnétisme terrestre, l'électricité, le calorique et la lumière ne sont que les relations réciproques d'un seul grand principe qui se modifie en produisant directement ou indirectement un de ces quatre agents. Ce principe aboutit-il dans le cerveau, organe de la pensée? C'est là une question qui, pour beaucoup de personnes, a déjà un certain degré de probabilité, mais à laquelle on ne peut encore répondre. L'avenir y répondra, comme il répondra à toutes les questions que la science a posées.

Il n'est donc plus permis aujourd'hui d'être ignorant.

« L'ignorance et l'incuriosité, a dit Diderot, sont deux oreillers fort doux; mais, pour les trouver tels, il faut avoir la tête aussi bien faite que celle de Montaigne. »

Les générations modernes savent ce qu'il en coûte de s'endormir sur ces oreillers si doux, et elles les rejettent avec mépris.

Une erreur scientifique admise, indiscutée, correspond en effet à bien des erreurs philosophiques, morales et sociales.

L'erreur astronomique de la Bible faisant de la terre le centre du monde, des astres les luminaires de notre globe, du ciel un calendrier de la terre, de la lune simplement un flambeau moindre que le soleil, niant l'infinité de l'univers physique, établissant l'homme comme le but suprême de la création, est une base des religions modernes. Elle explique les persécutions de la papauté contre Galilée, la mission donnée au célèbre astronome Tycho-Brahé de contredire Copernic, les obscurités dont l'illustre Képler enveloppe ses découvertes, l'étouffement de toutes les doctrines scientifiques pendant le moyen âge et

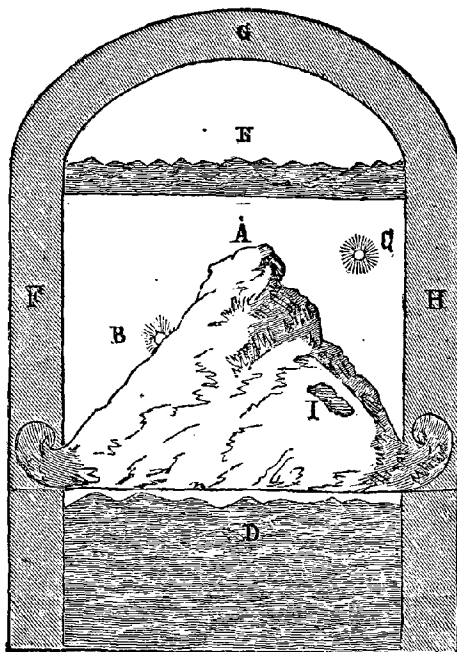


Fig. 1.

LE SYSTÈME DU MONDE D'APRÈS COSMAS  
ET LA BIBLE.

A. La terre. — B. Soleil couchant. — C. Soleil levant. — D. La mer. — E. Les eaux supérieures. — F. G. H. Muraille qui entoure l'univers. — I. Mer Caspienne. (Les autres mers ne sont que des écarts de l'Océan qui entoure la terre.)

jusqu'à notre siècle, les livres brûlés, les supplices atroces infligés à leurs auteurs, et enfin la haine pour tout progrès des sciences physiques.

Au vi<sup>e</sup> siècle, un moine d'Alexandrie, nommé Cosmas, publie un livre intitulé : *Topographie chrétienne de l'univers, prouvée par des démonstrations tirées de l'Écriture divine, et dont il n'est pas permis aux chrétiens de révoquer la vérité en doute*. On ne peut guère trouver plus absurde que cet ouvrage. Rien n'est plus comique que l'impudence sacerdotale avec laquelle il réfute les systèmes des anciens, faux, il est vrai, mais du moins sensés. Un coup d'œil jeté sur le dessin tiré de son ouvrage (*fig. 1*), et que nous reproduisons, suffit pour démontrer l'ineptie de ses scientifiques et dévotés élucubrations. Cependant, jusqu'au xvi<sup>e</sup> siècle, le livre de Cosmas est l'expression de l'opinion générale, parce qu'il est conforme à la Bible, et ceux qui firent passer à Christophe Colomb un examen à la cour d'Espagne insinuaient contre lui une opinion d'hérésie pour soutenir qu'il pourrait aller aux antipodes et en revenir.

Il est bon de raconter en quelques mots l'histoire des sciences physiques.

La physique, — ainsi nommée du mot grec *phusis*, — nature, a pour objet l'étude exclusive de la matière, des phénomènes qu'elle nous présente, des lois qui la régissent, des applications qui peuvent en être faites à nos besoins. Aussi, dès la première époque du monde, presque en même temps que la formation d'une langue, il dut y avoir quelques observations, quelques notions grossières d'astronomie, notions que, avec la connaissance d'un petit nombre de plantes médicinales, l'on trouve encore de nos jours chez les sauvages. Mais, dès cette époque aussi, ces connaissances étaient spéciales à des castes privilégiées, dépositaires des principes des sciences ou des procédés des arts, qu'elles assujettissaient, dans l'intérêt de leur domination, aux mystères, aux cérémonies de leur religion, aux pratiques de leur superstition.

Un peu plus tard, après que les hommes réunis d'abord en peuplades eurent passé de cet état à celui des peuples pasteurs, une vie plus sédentaire, moins fatigante, fut favorable au développement des sciences physiques. De plus, l'utilité de l'observation des étoiles, pour reconnaître leur route à travers les plaines immenses de l'Asie, à la recherche de pâturages pour leurs troupeaux, l'occupation qu'offrait cette observation pendant de longues veilles, sous ce climat tempéré, aux nuits tièdes et étoilées, les loisirs dont jouissaient les bergers amenèrent quelques progrès dans l'astronomie. Tandis que, comme l'a remarqué Condorcet, certaines sociétés s'entre-déchiraient pour la possession du sol ou se livraient à de sanglantes dissensions intestines provoquées par les excès des fa-



Égyptiens, avaient ainsi trouvé, paraît-il, l'idée ingénieuse des échelles arithmétiques, le moyen heureux de représenter tous les nombres avec un petit nombre de signes, les parties élémentaires de la géométrie relatives à la mesure des terres et à la coupe des pierres. En physique, ou du moins en astronomie, les Chaldéens avaient inventé le zodiaque, c'est-à-dire le mariage du ciel et de la terre, symbolisé plus tard (*fig. 2 et 3*); les Égyptiens le prirent aux Chaldéens, sans même le modifier selon leur climat atmosphérique, ce qui apporta plus tard une certaine difficulté dans

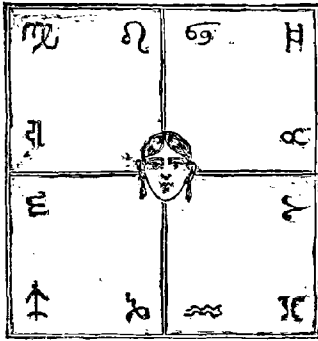


Fig. 3. — ZODIAQUE INDIEN  
dont la date est inconnue.

Les signes groupés trois par trois indiquent que les Indiens connaissaient aussi la division actuelle en 4 saisons.

l'explication du zodiaque primitif, qui n'est, d'après Hésiode, *que la terre recréant le ciel à son image* et cherchant dans la marche du soleil le régulateur de ses travaux et de ses actions morales. Ces mêmes Égyptiens avaient trouvé l'année de 365 jours et savaient parfaitement orienter leurs monuments. Ainsi la grande pyramide se trouve sous le 30° parallèle, qui partage en deux parties égales l'hémisphère septentrional, d'où l'on a conclu que depuis 4,000 ans les latitudes terrestres n'ont point sensiblement changé et que les Égyptiens savaient déjà les calculer. Mais leur mécanique ne con-

naissait que le levier, le plan incliné et surtout la force des bras pour transporter les masses les plus lourdes.

Que de sueurs, que de larmes, que de sang ont donc coûté ces fameuses pyramides, sépultures somptueuses de monarques fous d'orgueil!

Que de misères et de travaux infligés cruellement à un peuple pour assurer à la momie d'un monstre couronné un asile inviolable, et à son nom une durée sans fin!

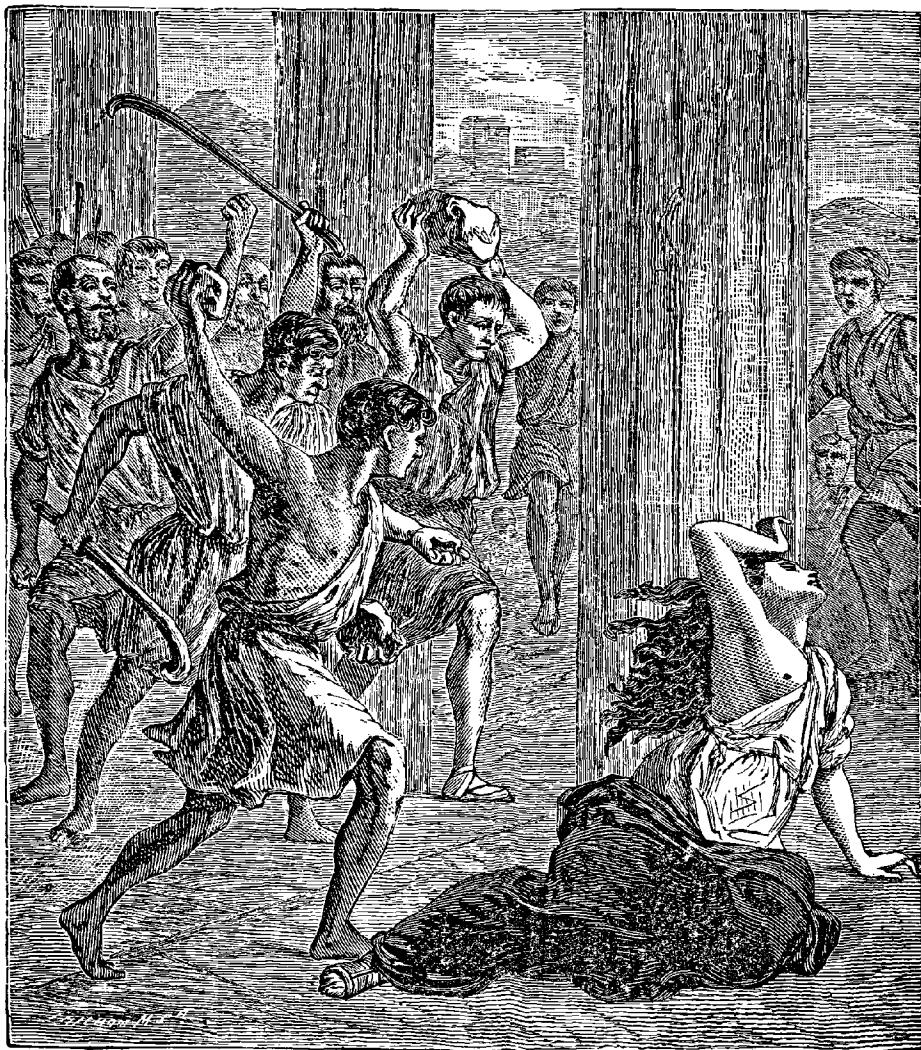
Pendant comme le but de ces prêtres, possesseurs de toute la science de ces temps, n'était point d'éclairer, mais de dominer, ils ne communiquaient aux peuples que ce qui leur était utile à eux-mêmes et seulement en y mêlant du surnaturel, du sacré, du céleste, afin de se faire regarder comme ayant reçu du ciel même des connaissances interdites aux autres hommes.

Ils eurent alors deux doctrines, l'une pour eux, l'autre pour les peuples; deux langues, deux écritures, l'une symbolique, l'autre vulgaire, et ils se transmettaient leurs connaissances dans ce langage secret, avec cette écriture allégorique qui n'offrait aux yeux des peuples



qu'une extravagante mythologie, des cultes insensés, des pratiques honteuses, des croyances absurdes.

Mais bientôt, contents de la docilité de leurs esclaves, ils oublièrent



Meurtre d'Hypatie (page 14).

eux-mêmes une partie des vérités cachées sous leurs allégories; ils ne gardèrent de leur ancienne science que ce qui leur était rigoureusement nécessaire pour conserver la confiance de leurs disciples. Sauf quelques rares exceptions, ils devinrent eux-mêmes les dupes de leurs propres

fables, et les philosophes grecs arracheront difficilement quelques lambeaux de cette science acquise et perdue aux sanctuaires de l'Égypte et de l'Inde.

La Grèce, avec tous les accidents et toute la force de sa nature, ne pouvait subir cette influence sacerdotale, qui, avec les brahmanes, ou les prêtres d'Isis ou les mages, avait plongé les peuples de l'Asie dans un abrutissement dont ils ne sont pas encore aujourd'hui sortis. Avec la liberté naissait la philosophie (*philos*, ami ; *sophia*, [de la] science).

Les philosophes grecs nous ont laissé la trace des puissants efforts qu'ils ont faits pour retrouver ou poursuivre les travaux des anciens ; mais leur prétention d'expliquer d'un seul coup tous les phénomènes naturels à l'aide d'un système préconçu, au moyen d'une hypothèse, d'une conception de leur intelligence, ne leur a pas permis de tirer de leurs études les résultats scientifiques que l'on était en droit d'en attendre. Des observations isolées et plus ou moins vagues ne constituent point la science ; elle résulte d'un corps de doctrines précis, dans lequel les faits sont rapprochés les uns des autres et étudiés au point de vue de la cause qui les produit. Ainsi l'expérience joue bien rarement un rôle dans leurs théories ; l'observation n'y intervient que d'une façon toute secondaire, et c'est seulement par cette méthode, due à l'illustre Galilée, la *méthode expérimentale*, que la physique a pu atteindre le degré de perfectionnement très remarquable qu'elle a atteint de nos jours. Cependant l'observation ne leur fit pas toujours défaut et ils obtinrent de la méthode expérimentale des résultats importants.

Nous en citerons quelques-uns.

Dès la plus haute antiquité, un des premiers civilisateurs, auquel on doit aussi, dit-on, le vilebrequin, la scie, la hache, et que la Grèce poétique et reconnaissante plaça dans sa mythologie, Dédale, ayant vu que tout corps tombant formait un angle droit avec la surface d'un liquide au repos, inventa le *niveau*, triangle en bois au sommet duquel est attaché un fil à plomb, appliquant ainsi ce principe que *la matière pèse*.

Les *balances* sont trouvées également, à ces époques fabuleuses, par Phidon, tyran d'Argos (667 ans av. J.-C.), qui fit aussi frapper la première monnaie d'argent, ou, selon d'autres, par Palamède, fils d'un roi d'Eubée (vers 1280 av. J.-C.), le même qui imagina le jeu d'échecs, déjoua la ruse d'Ulysse feignant la folie pour ne pas aller au siège de Troie et qui mourut lapidé, d'après l'accusation qu'Ulysse, pour se venger, porta fausement contre lui d'intelligences coupables avec les ennemis. Homère, dans l'*Iliade*, représente Jupiter pesant dans une balance la destinée des

mortels et la Bible nous cite Abraham pesant l'argent remis à Éphron pour prix d'un terrain.

Plus tard, l'illustre Archimède découvrait le célèbre principe qui porte son nom :

*« Tout corps plongé dans un liquide perd une partie de son poids égale au poids du volume du liquide dont il tient la place. »*

On sait comment le hasard, un de ces hasards qui ne viennent qu'aux gens de génie, lui fit trouver son fameux théorème. Le roi Hiéron avait donné à un orfèvre une certaine quantité d'or pour faire une couronne. Soupçonnant l'ouvrier d'avoir remplacé une partie de l'or par une partie d'argent égale en poids, le roi pria Archimède de chercher un moyen de s'assurer, sans briser la couronne, s'il y avait eu fraude. Le physicien se mit à réfléchir profondément à cela. Tout occupé de cette pensée, il alla prendre un bain, et, remarquant la facilité avec laquelle il soulevait le bras dans l'eau, il devina le principe de la poussée des liquides, et de cette idée fondamentale, il arriva aussitôt à voir la résolution de son problème. Oubliant qu'il était complètement nu, il s'élance aussitôt à travers les rues de Syracuse, courant chez lui pour vérifier par l'expérience un fait que son génie venait de lui montrer, et criant : « J'ai trouvé ! J'ai trouvé ! (*Euréka ! Euréka !*) »

Nous verrons dans cette partie de la physique l'explication théorique de cette découverte.

Ce n'est point d'ailleurs la seule chose que les sciences doivent à Archimède.

Né à Syracuse vers l'an 287 avant J.-C., d'une famille alliée au roi Hiéron, il alla étudier à Alexandrie et, tout jeune encore, commença à se signaler. Il trouva le moyen de dessécher les marais d'Égypte et raffermir les terres voisines du Nil par des digues inébranlables. Il inventa les *mouffles*, la *vis sans fin* et la *vis creuse*, qui porte encore son nom : *vis d'Archimède* ; il avait fabriqué une sphère qui représentait les mouvements célestes, écrit de nombreux traités de mécanique, de géométrie et d'astronomie. Il avait remarqué que les rayons du soleil, reçus sur un miroir métallique concave, se réfléchissent pour former par leur réunion un double foyer de lumière et de chaleur, ce qui, plus tard, permit à Mariotte de constater la réflexion de la chaleur. Rentré à Syracuse, assiégée alors par les Romains, Archimède se servit de cette observation pour incendier les vaisseaux des assiégeants en disposant des miroirs dont la surface réfléchissante était composée de petits miroirs plans, mobiles, inclinés de manière à réunir en un foyer tous les rayons réfléchis du soleil. Ce fait,

admis par tous les historiens, fut traité de fable par Descartes et ses disciples, quoique Zonaras (écrivain byzantin du xii<sup>e</sup> siècle) eût raconté un fait analogue, la combustion de la flotte de Vitalinus, effectuée devant Constantinople par Proclus en l'an 514 de notre ère. C'est pourquoi l'expérience fut reprise par le physicien Kircher, au xvii<sup>e</sup> siècle, qui, en disposant cinq miroirs plans de manière à faire concourir les rayons du soleil en un seul foyer, réussit à mettre le feu à des matières combustibles

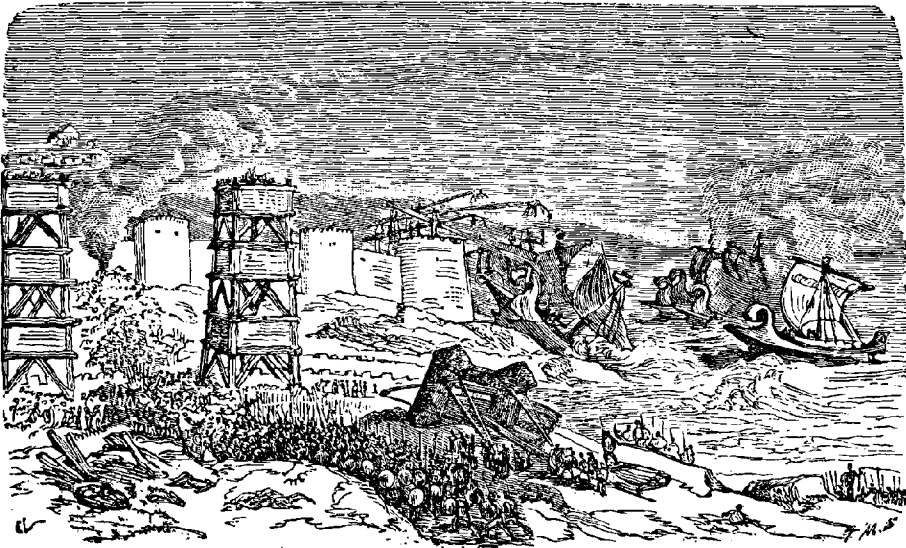


FIG. 4. — ARCHIMÈDE, SIÈGE DE SYRACUSE.

à plus de cent pieds de distance. Buffon renouvela cette expérience avec 168 petits miroirs plans, arrangés comme l'avait fait Archimède; il alluma du bois à 200 pieds de distance, fondit du plomb à 120 et de l'argent à 50 pieds.

Archimède avait imaginé également des machines à l'aide desquelles il élevait en l'air les vaisseaux des Romains et les laissait ensuite retomber dans la mer, où ils se brisaient, et il put ainsi prolonger pendant trois ans l'héroïque résistance de sa patrie (*fig. 4*). Mais les Romains étant entrés par surprise dans la ville, Archimède, plongé dans la recherche d'un problème, ne suivit pas assez vite un soldat qui voulait l'emmener prisonnier, et celui-ci le tua, quoique le général romain eût ordonné d'avance d'épargner la vie du grand homme.

En hydrostatique, l'antiquité doit encore à Ctésibius, mécanicien célèbre qui vivait vers l'an 130 avant J -C , la pompe aspirante et foulante

qui porte son nom, mais qu'il avait construite sans avoir deviné le principe sur lequel s'appuyait son invention, et des orgues hydrauliques.

Héron, son disciple (vers 120 avant J.-C.), fit des automates, des clepsydes (horloges à eau) (*fig. 5*) et inventa la fontaine qui porte son nom et qui sert à démontrer qu'un gaz, tel que l'air, peut exercer sur un liquide une pression qui se transmet à toute sa masse. Il nous reste quelques fragments des écrits de ce physicien, entre autres un traité sur les *Machines à vent* et sur les *Machines de guerre*.

Les physiciens du XVIII<sup>e</sup> siècle, tels que Fahrenheit, Nicholson, Baumé, ont dû, pour construire leurs *aréomètres* ou *pèse-liqueurs*, se servir des données fournies par un instrument connu sous le nom de *pèse-liqueur d'Hypatie*.

Hypatie, née à Alexandrie vers l'an 390 de notre ère, était fille d'un mathématicien distingué nommé Théon. L'éducation, jointe à son génie, fit d'elle un prodige. Elle avait appris de son père la géométrie, l'astronomie et les mathématiques; son goût pour l'étude des sciences la fit se lier avec les philosophes célèbres de l'école qui florissait alors à Alexandrie, et bientôt les magistrats l'invitèrent à professer elle-même publiquement la philosophie éclectique. Ses leçons eurent un succès énorme, et, de toutes les contrées de la Grèce et de l'Asie, on accourait à ses cours. Quoique d'une grande beauté, sa vertu ne fut même pas soupçonnée, et les auteurs païens ou chrétiens qui nous ont transmis son histoire sont unanimes dans leurs louanges.

Mais elle était restée attachée à la religion de ses pères, au paganisme philosophique, des éclectiques, et le patriarche d'Alexandrie, saint Cyrille, homme impérieux et violent, la haïssait, soit à cause de sa religion, soit à cause de l'influence qu'il lui supposait sur Oreste, le préfet de la ville. Une rixe étant survenue, en 415, à propos des spectacles publics, entre des chrétiens et des juifs, le patriarche veut faire expulser d'Alexandrie les juifs, qui y étaient établis depuis 600 ans. Le préfet s'y refusant, le patriarche soulève une sédition dans laquelle les maisons des juifs sont pillées et eux-mêmes chassés ou tués. En même temps, 500 moines du mont de Nitrie accourent, furieux, pour soutenir saint Cyrille, attaquant

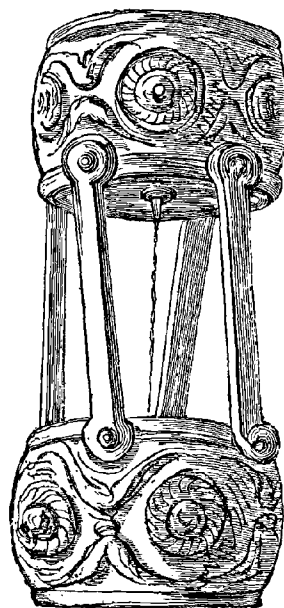


Fig. 5. — CLEPSYDRE.

le préfet dans les rues, le blessent même et remplissent la ville de désordre. Bientôt mis en fuite par le peuple indigné, ils sont forcés d'abandonner celui d'entre eux qui avait frappé le magistrat et de le laisser traîner au supplice. Mais saint Cyrille prononce le panégyrique du moine condamné, en fait un martyr, et le canonise. Cependant il dut plier devant l'autorité du préfet, se réservant une vengeance qui ne tarda point et qui, ne pouvant atteindre directement son ennemi, alla frapper celle qu'il soupçonnait assez estimée de tous les honnêtes gens pour que sa mort devint un deuil pour ce peuple païen. Il irrita la populace contre Hypatie; un certain Pierre, lecteur dans l'église d'Alexandrie, à la tête d'une troupe de scélérats, attend la jeune fille à la porte de sa demeure. Ils se jettent sur elle, la saisissent, l'entraînent dans une église appelée Césarée, la dépouillent, l'assomment à coups de pierres, coupent ses membres par morceaux et les traînent par la ville.

Ce meurtre abominable resta impuni.

Nous avons raconté cette histoire pour montrer le peu de respect que, dès les premiers siècles, certains fanatiques portaient au génie et à la science. Cela nous est déjà une explication de cet arrêt complet des progrès de la physique au moyen âge, que nous constaterons tout à l'heure.

L'instrument appelé *pèse-liqueur* ou *aréomètre d'Hypatie* est ainsi décrit par elle-même dans une lettre à son élève Synésius, devenu plus tard évêque de Ptolémaïs :

« J'ai besoin d'un *hydroscope*. Je vous prie d'en faire faire un en cuivre et de me l'acheter. C'est un tuyau en forme de cylindre, qui a l'apparence et la grandeur d'un sifflet; sur sa longueur il porte une ligne droite qui est coupée en travers par de petites lignes, sur lesquelles nous jugeons du poids des eaux. L'un des bouts est couvert d'un cône, disposé de manière que le tuyau et le cône aient une même base. On appelle cet instrument *baryllion*. Si on le met dans l'eau par la pointe, il y demeure debout et l'on peut aisément compter les divisions qui coupent la ligne droite, et par là on connaît la densité de l'eau (*fig. 6*). »



Fig. 6.

Les poètes racontent que Dédale, dont nous avons parlé ci-dessus, ayant favorisé le commerce monstrueux de Pasiphaé, fille d'Apollon et épouse de Minos, roi de Crète, avec un taureau, le mari, pour se venger, l'enferma lui-même, avec son fils Icare, dans le labyrinthe qu'il avait construit. Ils nous disent qu'il fabriqua, pour s'échapper, des ailes formées de plumes d'oiseaux et de cire et qu'il traversa ainsi les airs avec son fils; que le soleil ayant fondu la cire des ailes de ce dernier, il tomba

dans la mer et que Dédale arriva seul à Cumès, en Italie. Mais il ne faut point croire les poètes sur parole.

Un philosophe pythagoricien, Archytas (440-360 av. J.-C.), mathématicien, astronome, mécanicien habile, homme d'État, général souvent vainqueur, nommé six fois chef de la république de Tarente, sa patrie, inventeur de la vis, de la poulie, etc., que Platon connut et avec lequel il entretenait un commerce de lettres, dont Horace a célébré par une ode la mort dans un naufrage sur les côtes d'Apulie, avait construit, si l'on en croit Aulu-Gelle, une colombe qui volait au moyen de l'air contenu en elle. Nous n'avons non plus aucun renseignement précis sur cette invention, et l'on peut, sans contredit, considérer l'aérostatique comme étant inconnue aux anciens.

**OPTIQUE.** — Ce que l'antiquité a dit de plus rationnel sur la lumière se trouve résumé dans Euclide, Héliodore de Larisse et Ptolémée.

Euclide, célèbre géomètre grec, enseignait les mathématiques à Alexandrie vers 320 avant J.-C. et compta même le roi Ptolémée, fils de Lagus, au nombre de ses disciples. Il avait rédigé, sous le titre d'*Éléments*, en quinze livres, une sorte d'encyclopédie des sciences mathématiques de son temps, et la partie qui traite de la géométrie sert encore aujourd'hui de base à notre enseignement. Son *Optique*, cependant, n'est guère, selon l'opinion de Képler, qu'une réunion de théorèmes de perspective, découlant de la démonstration qu'il trouva de la direction rectiligne des rayons de lumière dans la direction droite des ombres et dans la manière dont s'effectue la vision, qui ne permet pas d'embrasser à la fois tous les points d'un objet perçu à une certaine distance. Dans sa *Catoptrique* (étude de la réflexion de la lumière), il explique par la réfraction que les rayons éprouvent dans l'air le grossissement du soleil et de la lune à l'horizon; mais il ne devina pas que, par l'effet de la réfraction, les astres n'occupent exactement qu'au zénith la place où nous les voyons.

Un pythagoricien, Héliodore de Larisse, découvrit alors que les rayons lumineux qui déterminent la vision forment un cône dont le sommet s'appuie à la pupille de l'œil, tandis que la base embrasse la surface de l'objet perçu. Mais il croyait que l'œil émettait de la lumière, et il citait comme exemple l'empereur romain Tibère, qui voyait clair la nuit, comme les chats ou certains animaux nocturnes; erreur profonde, car ces animaux peuvent se diriger à travers l'obscurité seulement parce que leur pupille s'agrandit si amplement que les rayons lumineux les plus faibles y pénètrent pendant la nuit. Nous étudierons, dans cet ouvrage, les phénomènes de la vision et nous démontrerons la fausseté de ce préjugé.

Ptolémée, astronome qui vivait à Alexandrie vers l'an 175 de notre ère, fut l'auteur aussi d'importants travaux sur l'*optique* qui constituent pour lui un titre de gloire beaucoup plus solide que le système astronomique auquel il a attaché son nom. Ce système astronomique, en effet, suivant lequel le soleil, les planètes, les astres décrivent leurs orbites autour de la terre immobile, système conforme à l'apparence et à la Bible, n'a eu d'autre résultat que de retarder les progrès des sciences. Il donna le premier un exposé assez détaillé des principaux faits de la réfraction. Il n'y avait plus qu'un pas à faire pour découvrir la loi générale; on mit des siècles à faire ce pas décisif.

Bien des générations devaient passer également avant qu'on parvint à expliquer un météore qui frappe tout le monde, l'*arc-en-ciel*. Les anciens croyaient, en effet, la lumière incolore, mais ils supposaient qu'elle pouvait être colorée par des causes externes, telles que l'air et d'autres matières ténues et transparentes, et la pensée seule de la décomposition de la lumière leur semblait une impiété. « Si jamais quelqu'un entreprenait de décomposer la lumière, disait Platon, il montrerait par là qu'il ignore la différence entre le pouvoir de l'homme et le pouvoir de Dieu. »

**CHALEUR.** — Selon leur coutume, les philosophes anciens discutèrent beaucoup sur l'*essence* de la chaleur, mais étudièrent peu ou point ses effets; ils se contentaient de diviser les corps de la nature en *corps chauds* et *corps froids*, considérant la chaleur comme une qualité inhérente originellement à un corps, le feu lui-même pour les uns, la partie invisible et volatile du feu pour les autres.

Pendant quelques faits auraient dû appeler leur attention sur ses effets, spécialement sur la dilatation des corps, sur la formation des vapeurs et sur leur force élastique. Le mécanicien Héron avait imaginé un instrument, l'*éolipyle*, « pour montrer comment l'impulsion de la chaleur exprime la force du vent. » C'était une boule, quelquefois en forme de poire, creuse, faite d'airain, n'ayant qu'une petite ouverture, par laquelle on introduisait de l'eau. Avant d'être échauffés, les éolipyles ne laissaient, bien entendu, échapper aucun air; mais ils n'avaient pas plutôt éprouvé l'action de la chaleur qu'ils produisaient un vent proportionnel à la violence du feu.

Une idole des anciens Germains, le *Büsterich*, était un dieu en métal. Sa tête, creuse, était pleine d'eau; des bouchons de bois fermaient sa bouche et un trou placé sur le sommet de sa tête. On chauffait l'eau en plaçant secrètement des charbons allumés dans le corps du dieu. Tout à coup les bouchons sautaient, le dieu était irrité; des nuages de vapeur



l'enveloppaient et le cachaiient aux yeux du peuple terrifié, et les prêtres transmettaient alors aux fidèles les ordres de la divinité, ordres auxquels l'épouvante faisait immédiatement obéir.



Le dieu était irrité.... Les prêtres transmettaient aux fidèles les ordres de la divinité (page 16).

**ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.** — Nous emprunterons à l'intéressante *Histoire de la physique* de M. F. Hoëfer, que nous avons déjà mise à contribution dans ce rapide aperçu historique, les détails relatifs aux connaissances des anciens sur cette partie, la plus importante peut-être, de la physique.

Le *succin* (*electron* des Grecs) a donné son nom à l'*électricité*, comme l'aimant (*magnetes* des Grecs) a donné le sien au *magnétisme*. C'est que le succin ou *ambre jaune*, espèce de résine fossile, après avoir été frotté, a la singulière propriété d'attirer les corps légers, de même que l'aimant a la propriété non moins étrange d'attirer la limaille de fer.

Ce fait exerça tous les esprits spéculatifs. Thalès (639-548 av. J.-C.) y voyait le mouvement d'une âme particulière. Démocrite essayait de l'expliquer par l'*attraction des semblables*. Platon assimile les attractions du succin et de l'aimant aux mouvements de la respiration. Galien (131-210 de notre ère), Strabon (vers 50 av. J.-C.) admettaient, pour expliquer ces phénomènes, une *qualité occulte*, une sorte de sympathie. Mais aucun de ces auteurs n'a parlé du frottement préalable comme d'une condition nécessaire à la réussite de l'expérience avec le succin. Pline l'Ancien, le célèbre auteur de l'*Histoire naturelle* (23-79 de notre ère), fut l'un des premiers à insister sur la nécessité de cette condition, et, comme le frottement a pour effet d'échauffer les corps, Pline ajoute que le succin frotté exhale de la chaleur. Alexandre d'Aphrodisie, philosophe du 1<sup>er</sup> siècle après J.-C., part de là pour établir toute une théorie, plus subtile que vraie : « Le succin attire, dit-il, les corps légers, de même que la ventouse attire les humeurs, parce qu'en vertu de l'impossibilité du vide, il faut bien que quelque chose vienne remplacer la chaleur qui sort de la ventouse et l'espèce de feu qui sort du succin. » Suivant Plutarque (50-139), le frottement est nécessaire, d'abord pour déboucher les pores du succin, puis pour y entretenir une sorte de courant et de contre-courant d'air subtil.

Les anciens furent plus attentifs aux phénomènes qu'offrait l'aimant. Leur *Pierre d'Héraclée* ou *Pierre de Lydie* était bien notre aimant, car ils donnaient indifféremment à l'une ou à l'autre le nom de *Pierre de fer*. Mais ils l'appelaient plus souvent *Pierre magnésienne*, soit parce qu'on la faisait venir communément du pays des Magnésiens, soit que cette substance naturelle eût été, comme le raconte Pline, découverte par un berger nommé *Magnès* (*fig. 7*) ; ce berger aurait été ainsi fixé au sol par les clous de ses chaussures et son bâton ferré. Mais les auteurs qui inclinent pour la dernière version ne s'accordent pas sur le lieu où cet accident serait arrivé au berger Magnès : les uns nomment la Troade, les autres l'Inde. Au rapport de Photius (820-891), ce furent les porteurs de *Pierre magnésienne* qui découvrirent la propriété attractive de l'aimant : « Des parcelles de cette pierre adhéraient probablement, dit-il, à leurs chaussures, et, en marchant lentement sur une terre qui contenait du minerai de fer, ils sentaient une certaine résistance, parce que des parcelles d'aimant s'attachaient au minerai. »

Le minéralogiste grec Sotacus, cité par Pline, distinguait cinq espèces d'aimants, les uns mâles, les autres femelles. Il parle aussi d'un aimant blanchâtre (minerai de cobalt ou de nickel?), comme ayant moins de force attractive que l'aimant noir. Les *bétyles*, pierres qui rendaient des oracles ou faisaient d'autres prodiges, étaient des aérolithes, et on sait que les aérolithes sont presque tous magnétiques.

Les anciens étaient émerveillés de la puissance et des effets de l'aimant. Ils savaient qu'on peut l'employer à soulever des masses de fer. Ptolémée raconte, dans le livre VII de sa *Géographie*, que des navires qui se rendaient aux îles Manéoles (dans l'Océan Indien, près de l'île de Ceylan) ne manqueraient pas d'être retenus par une force mystérieuse, si les constructeurs n'avaient pas eu soin de remplacer les clous de fer par des chevilles en bois. L'auteur se demande ici si ce phénomène n'était pas dû à l'action de grandes mines d'aimant, situées dans ces îles. D'autres écrivains ont rapporté des faits analogues, plus merveilleux encore. Ainsi Pline raconte qu'il



Fig. 7.

LE BERGER MAGNÈS DÉCOUVRE L'AIMANT.

y a près de l'Indus deux montagnes, dont l'une attire le fer et l'autre le repousse, et que, si un voyageur porte des souliers garnis de clous de fer, il lui sera impossible de poser les pieds à terre sur l'une des montagnes, tandis que sur l'autre les pieds restent cloués au sol. Pline raconte encore que Dinocharès, architecte de Ptolémée Philadelphe (185-247 av. J.-C.), avait tracé pour la reine Arsinoé le plan d'un temple dont la voûte devait être en aimant, afin que la statue en fer de cette reine divinisée y restât suspendue. Des récits semblables ont été appliqués à la statue de Sérapis, suspendue dans le temple d'Alexandrie; aux veaux sacrés de Joroboam, et plus tard au tombeau de Mahomet. Dans un petit poème, intitulé *Magnes*, Claudien (365-430) décrit deux statuette d'un petit temple d'or, l'une de Mars, en fer, l'autre de Vénus, en aimant, statuette qui devaient figurer les amours de ces deux divinités. Dans une lettre écrite à Boèce, Cassiodore (480-575) parle d'un Cupidon de fer suspendu, sans aucun lien apparent, dans un temple de Diane. Lucien (120-200) dit avoir vu dans le temple de Junon, à Hiéropolis de Syrie, une

statuette d'Apollon se promener librement dans l'espace et dirigeant elle-même les prêtres qui la tenaient. Saint Augustin, qui regardait la puissance de l'aimant comme une des plus grandes merveilles du monde, s'indigne contre les prêtres païens d'avoir trompé les peuples par l'apparence de miracles perpétuels; il leur reproche, entre autres supercheries, d'avoir placé, dans le pavé et dans la voûte d'un temple, des aimants dont la force était calculée de manière qu'une statue de fer restât en équilibre au milieu de l'air, sans pouvoir ni descendre ni monter, par l'effet de deux attractions égales et contraires. Est-ce que, en fait de miracles apparents, les prêtres chrétiens pourraient se dire sans reproche?

Les effets de l'aimant étaient plus propres encore que ceux du succin à stimuler l'esprit spéculatif des anciens. La plupart, comme Thalès et Platon, voyaient dans tout mouvement la manifestation de forces vitales et même intelligentes; quelques-uns seulement n'y voyaient que des effets de forces physiques. Empédocle essaya le premier d'expliquer mécaniquement l'action de l'aimant par la structure des pores du fer. Démocrite, qui avait composé un traité spécial sur l'aimant, enseignait que les atomes de cette substance pénètrent au milieu des atomes moins sensibles du fer pour les agiter; que les atomes du fer se répandent au dehors, et sont absorbés par ceux de l'aimant, à cause de leur ressemblance et des vides intersticiels. C'est à peu près dans le même sens qu'abondaient les doctrines d'Épicure, dont Lucrèce, dans son poème *De la nature des choses*, s'est rendu l'interprète. Suivant ce disciple d'Épicure, une sorte de tourbillon d'effluves ou semences sort de la pierre d'aimant et chasse l'air de l'espace qui sépare l'aimant du fer; de là un vide, que le fer vient aussitôt occuper, comme un navire à voiles déployées, ayant vent en poupe. Aristote, sans entrer dans des considérations théoriques, a cité l'un des premiers l'aimantation passagère du fer doux par le contact de l'aimant, pour montrer que la faculté de mouvoir peut se transmettre à un corps sans la participation d'aucun mouvement. Plutarque formule une théorie qui a beaucoup d'analogie avec celle d'Épicure: « La pierre d'aimant émet, dit-il, des effluves qui forment un tourbillon autour d'elle; de là lui vient la force avec laquelle cette pierre attire le fer. »

Quelque incomplètes que soient toutes ces théories des anciens philosophes sur les diverses branches de la physique, quelque absurdes que soient parfois leurs opinions, quelque fausses que soient leurs observations, quelque maladroitement que soient leurs rares expériences, quelque puérides même que soient leurs assertions, il faut cependant reconnaître dans l'antiquité sinon un progrès réel et continu dans l'objet qui nous occupe, au moins une agitation féconde de la pensée humaine, une curiosité toujours

inassouvie pour les phénomènes de la nature, un goût digne d'éloges pour les études propres à développer et à élever l'intelligence de l'homme. Il faut attribuer surtout leur insuccès non à une volontaire et stupide ignorance, non à un parti pris, non à une soumission abjecte à une caste qui, pour dominer, se réserve le privilège de savoir; mais à l'imperfection ou au manque absolu d'instruments, aux nécessités d'un état politique qui forçaient les citoyens à s'occuper sans cesse de la chose publique et les détournaient des méditations solitaires du laboratoire; enfin, à l'absence d'un certain fonds préalable de connaissances, de l'acquis des siècles antérieurs, puisque tout ce qui avait été pensé, observé, expérimenté avant eux restait enfoui, perdu pour tous, indéchiffré et indéchiffrable même pour ceux qui détenaient ou gardaient ces trésors, dans les temples de l'Égypte et de l'Inde, retombées dans la barbarie.

Mais, à partir du VI<sup>e</sup> siècle de notre ère, la science entre dans une nuit profonde. La prise d'Alexandrie par les Arabes en 641 et l'incendie de la précieuse bibliothèque de cette riche et savante cité semblent éteindre la dernière étincelle, conservée seulement là. On dirait que l'Europe, le monde est revenu aux temps primitifs; des peuplades travaillant, tuant, se battant, en souffrant, sous la garde de brahmes, imbéciles eux-mêmes: nous sommes au moyen âge!

« Il n'y a plus de science, plus même de littérature profane, dit M. Guizot dans son *Histoire de la civilisation*; la littérature sacrée est seule; les clercs seuls étudient ou écrivent, et ils n'étudient, ils n'écrivent plus, sauf quelques exceptions rares, que sur des sujets religieux. Le caractère général de l'époque est la concentration du développement intellectuel dans la sphère religieuse... On ne veut former que des clercs; toutes les études, quel que soit leur objet, se dirigent vers ce résultat.

» Quelquefois même on va plus loin; on repousse les sciences profanes elles-mêmes, quel qu'en puisse être l'emploi. A la fin du VI<sup>e</sup> siècle, saint Dizier, évêque de Vienne, enseignait la grammaire dans son école. Saint Grégoire le Grand l'en blâme vivement... Ce qui est évident, c'est le décri des études profanes, même cultivées par des clercs. »

Et cet état dure jusqu'à la découverte de l'imprimerie, jusqu'à Luther, jusqu'à Galilée.

Une seule découverte en physique signale cette époque sombre: la découverte de la boussole.

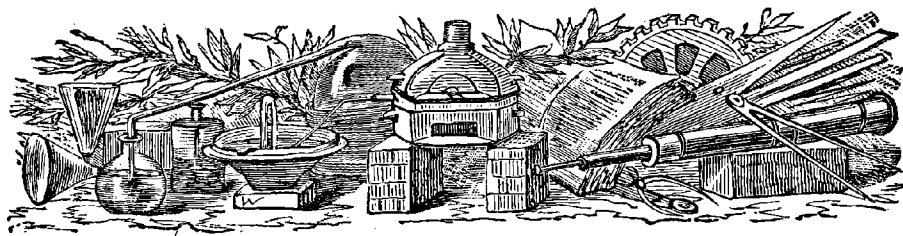
Plus de mille ans avant Jésus-Christ, les Chinois connaissaient la boussole ou du moins la propriété qu'ont les aiguilles aimantées de diriger leur pointe vers le nord. Ils faisaient usage pour se guider sur les mers d'aiguilles flottantes dont une extrémité était surmontée d'une petite figu-

rine représentant une tête d'homme et indiquant constamment le sud ; ou bien de petites balances de même forme pour se diriger à travers les immenses steppes de la Tartarie, ou encore pour orienter la face principale des couvents bouddhistes. Vasco de Gama, qui doubla pour la première fois le cap de Bonne-Espérance en 1498, trouva que les pilotes de l'Arabie et de l'Inde se servaient très habilement des cartes marines et de la boussole. Le premier auteur européen qui en parle est Guyot de Provins (1150-1220), cité par M. Hoeffler. Après avoir dit du pape qu'il devrait être pour les chrétiens ce qu'est pour les marins la *tremontaine* (étoile polaire), et que ceux-ci ont un art infallible, il ajoute :

Un art font qui mentir ne peut  
 Par la vertu de l'amanière (aimant).  
 Une pierre laide et brunière,  
 Où li fer volontiers se joint,  
 Ont ; si esgardent le droit point,  
 Puis qu'une aiguille l'ait touchée  
 Et en un festu l'ont fichée,  
 En l'aigue la mettent sans plus,  
 Et li festu la tient dessus ;  
 Puis se torne la pointe toute  
 Contre l'estoile, si sans doute  
 Que jà por rien ne faussera  
 Et mariniers nul doutera.

Un pilote de Pasitano, près d'Amalfi, alors puissante république maritime du royaume de Naples, paraît cependant être le premier qui rendit tout à fait pratique cette découverte, en fabriquant une espèce de boîte, dans laquelle l'aiguille aimantée, posée en équilibre sur un pivot, pouvait se mouvoir à son gré et rendre ainsi les observations plus faciles et plus exactes. Néanmoins, les connaissances de l'époque ne s'étendaient pas encore au delà de l'action directrice de l'aiguille aimantée.

Au fur et à mesure que nous étudierons chacun des phénomènes, objet de ce livre, nous donnerons, en même temps que leurs applications pratiques, l'historique de chacune des expériences, qui maintenant sont du domaine de la science positive; nous raconterons chacun des progrès depuis la naissance de la physique, c'est-à-dire depuis la fin du xvi<sup>e</sup> siècle, depuis Galilée.



# LIVRE PREMIER

## NOTIONS PRÉLIMINAIRES

---

### CHAPITRE PREMIER

#### DÉFINITIONS

**CORPS SIMPLES ET CORPS COMPOSÉS.** — On donne le nom de *corps* à tout ce qui occupe une certaine étendue de l'espace, à tout ce qui, d'une façon quelconque, frappe un ou plusieurs de nos sens.

Les corps sont *simples* ou *composés*.

Les *corps simples* ou *éléments* sont ceux qui ne renferment qu'une sorte de matière. Les *corps composés*, au contraire, sont ceux qui renferment au moins deux sortes de matières, c'est-à-dire qui sont formés par plusieurs corps simples combinés ensemble.

Il y a un siècle à peine, on en était encore au sentiment d'Aristote (mort en 322 av. J.-C.), qui prétendait que tous les corps provenaient de la combinaison des *quatre éléments* : l'AIR, l'EAU, la TERRE et le FEU (ou *Phlogistique*, air inflammable). Aristote était certes un grand génie; mais son autorité s'était surtout maintenue parce qu'au moyen âge penser autrement que lui était un crime prévu, un sacrilège que le parlement punissait du bûcher ou du moins de la prison perpétuelle. Heureusement, la philosophie de Descartes parvint, malgré les efforts des théologiens et les arrêts des cours de justice, à détruire l'infailibilité du philosophe grec, et Lavoisier put démontrer sans danger, en 1774, que l'*air* était un corps composé.

On admet aujourd'hui soixante-cinq corps simples : les MÉTALLOÏDES,

au nombre de quinze, et les MÉTAUX, au nombre de cinquante. Ces deux séries de corps simples diffèrent entre elles d'abord par un certain aspect, un éclat particulier que possèdent les métaux et que n'ont pas les métalloïdes, puis surtout par leurs fonctions chimiques.

Voici la liste de ces soixante-cinq corps simples et les noms des savants qui les ont découverts ou qui ont démontré qu'ils étaient des corps simples.

## MÉTALLOÏDES

NOMS.	ÉTAT.	COULEUR.	AUTEURS DE LEUR DÉCOUVERTE.	DATE.
1 Arsenic .....	Solide.	Blanc grisâtre.	GEORGES BRANDT.....	1733
2 Azote .....	Gazeux.	Incolore.	PRISTLEY et LAVOISIER.....	1774
3 Bore .....	Solide.	Brun.	GAY-LUSSAC.....	1808
4 Brome.....	Liquide.	Rouge foncé.	BALARD.....	1826
5 Carbone.....	Solide.	Incolore.	LAVOISIER.....	1783
6 Chlore.....	Gazeux.	Jaune verdâtre.	SCHÉELE.....	1774
7 Fluor.....	Gazeux.	Incolore.	GAY-LUSSAC.....	1808
8 Hydrogène.....	Gazeux.	Incolore.	LAVOISIER.....	1783
9 Iode.....	Solide.	Noir.	GAY-LUSSAC et DAVY.....	1813
10 Oxygène.....	Gazeux.	Incolore.	LAVOISIER et PRISTLEY.....	1774
11 Phosphore.....	Solide.	Incolore.	BRANDT.....	1669
12 Sélénium.....	Solide.	Brun.	BERZÉLIUS.....	1817
13 Silicium.....	Solide.	Brun.	BERZÉLIUS.....	1809
14 Soufre.....	Solide.	Jaune verdâtre.	Anciennement connu.	
15 Tellure.....	Solide.	Blanc bleuâtre.	MULLER.....	1782

## MÉTAUX

NOMS.	COULEUR.	AUTEURS DE LEUR DÉCOUVERTE.	DATE.	NOMS.	COULEUR.	AUTEURS DE LEUR DÉCOUVERTE.	DATE.
1 Aluminium ..	Blanc grisâtre	WEGHLER .....	1824	26 Nickel.....	Blanc argenté	CRONSTEDT.....	1751
2 Antimoine... .	Blanc bleuâtre	BAZILE-VALENTIN .....	1413	27 Niobium....	Noir.	H. ROSE.....	1846
3 Argent.....	Blanc éclatant.	Très anciennement connu.		28 Osmium....	Bleu foncé.	TENNANT.....	1803
4 Baryum.....	Blanc.	H. DAVY.....	1807	29 Or.....	Jaune.	Très anciennement connu.	
5 Bismuth....	Blanc jaunâtre	AGRICOLA.....	1526	30 Palladium ..	Blanc argenté	WOLLASTON.....	1804
6 Cadmium....	Blanc argenté	STROMAYER.....	1818	31 Pélopieum..	Noir.	H. ROSE.....	1844
7 Cæsium.....	Gris bleuâtre.	BUNZEN et KIRCHLOFF.....	1861	32 Platine....	Blanc argenté	WOOD.....	1741
8 Calcium....	Blanc.	H. DAVY.....	1807	33 Plomb.....	Blanc bleuâtre	Très anciennement connu.	
9 Cérium.....	Blanc grisâtre	HISINGER et BERZÉLIUS.....	1809	34 Potassium..	Blanc grisâtre	H. DAVY.....	1807
10 Chrome.....	Blanc grisâtre	VAUQUELIN.....	1797	35 Rhodium....	Blanc argenté	WOLLASTON.....	1804
11 Cobalt.....	Blanc argenté	BRANDT.....	1733	36 Rubidium... .	Rougeâtre.	BUNSEN et KIRCHLOFF.....	1861
12 Cuivre.....	Rouge.	Très anciennement connu.		37 Ruthénium..	Blanc grisâtre	CLAUS.....	1845
13 Didyme....	Blanc grisâtre	MOSANDER.....	1841	38 Sodium.....	Blanc grisâtre	H. DAVY.....	1807
14 Étain.....	Blanc argenté	Très anciennement connu.		39 Strontium... .	Blanc.	H. DAVY.....	1807
15 Erbium.....	Blanc grisâtre	MOSANDER.....	1844	40 Tantale....	Noir.	HATCHETT.....	1803
16 Fer.....	Gris bleu.	Très anciennement connu.		41 Terbium....	Blanc.	MOSANDER.....	1843
17 Glucinium..	Blanc.	WEGHLER .....	1827	42 Thallium... .	Gris brillant.	LAMY.....	1862
18 Indium....	Blanc.	REICH et RICHTER.....	1863	43 Thorium....	Noir.	BERGMANN.....	1851
19 Iridium....	Blanc grisâtre	TENNANT et DESCOSTILS.....	1803	44 Titane.....	Jaune.	GREGOR.....	1781
20 Lanthane... .	Blanc grisâtre	MOSANDER.....	1839	45 Tungstène..	Blanc grisâtre	DELHUYART.....	1781
21 Lithium... .	Blanc.	H. DAVY.....	1807	46 Uranium....	Gris foncé.	KLAPROTH.....	1789
22 Magnésium..	Blanc.	H. DAVY.....	1807	47 Yttrium....	Gris noir.	WEGHLER .....	1827
23 Manganèse..	Blanc jaune.	GANN et SCHEELE.....	1774	48 Vanadium ..	Blanc.	Del Rio (1801) et Sefstrom.....	1830
24 Mercure....	Blanc.	Très anciennement connu.		49 Zinc.....	Blanc bleuâtre	PARACELSE.....	1539
25 Molybdène..	Gris foncé.	HILM.....	1782	50 Zirconium..	Gris foncé.	KLAPROTH.....	1789



Le nombre de ces *corps simples* ou *éléments* pourra être augmenté ou diminué d'après les progrès ultérieurs de la science. Ainsi, l'on verra par la suite qu'un ou plusieurs des corps regardés actuellement comme corps



L'attention de Galilée se porta sur une lampe suspendue à la voûte (page 31).

simples sont, au contraire, des corps composés. Il est probable aussi que, par de nouvelles recherches, on parviendra à découvrir des corps nouveaux qui, ne pouvant être décomposés, devront être rangés parmi les *éléments*; d'où il suit qu'en fixant à soixante-cinq le nombre de ces der-

niers, on ne doit pas prétendre qu'il soit exact, mais seulement qu'il est tel dans l'état actuel de la science.

En effet, en 1875, le 27 mars, l'Académie des sciences était informée qu'un nouveau corps simple avait été découvert par M. Lecoq de Boisbaudran, par une nouvelle méthode d'exploration chimique que nous étudierons plus loin, appelée *l'analyse spectrale*, méthode par laquelle déjà on a pu découvrir des métaux nouveaux inconnus jusqu'alors, tels que le *cæsium*, le *rubidium*, le *thallium*, etc. Ce métal, dont M. Lecoq de Boisbaudran a déjà pu se procurer des échantillons et qui a reçu le nom de *gallium*, devra donc être ajouté à la liste des corps simples.

De même, quelques chimistes soutiennent que tous les métaux sont des corps composés. Quelques-uns, comme les alchimistes du moyen âge, prétendent que l'or est composé de plusieurs éléments sulfurés et conséquemment peut être produit par l'oxydation des sulfures; d'autres, que les métaux ne sont que des composés d'hydrogène prodigieusement condensé et combiné avec un gaz plus léger. Les grands chimistes, tels que Gerhardt, Gay-Lussac, Thenard, Dumas, n'osent pas se prononcer formellement sur ce sujet. Néanmoins, ils avouent qu'on remarque des analogies incontestables entre les radicaux connus, tant de la chimie organique que ceux de la chimie minérale, et que ceux de la chimie organique sont décomposables.

**OBJET DE LA PHYSIQUE ET DE LA CHIMIE.** — Cependant, les travaux des savants qui ont ramené toute matière terrestre, soit d'origine organique, soit d'origine minérale, à ces substances primordiales dont nous venons de donner la liste, appartiennent plus spécialement à cette partie de la *physique générale* appelée *chimie*.

La *physique générale* comprend, en effet, d'après son étymologie, les diverses sciences qui s'occupent de l'étude de la nature : *l'histoire naturelle*, subdivisée elle-même en *zoologie*, étude des animaux, *botanique*, étude des végétaux, *géologie*, histoire de la terre et des minéraux; *l'astronomie*, qui traite des lois du mouvement des astres et de leur constitution; la *chimie*, qui étudie les modifications permanentes et profondes que les corps éprouvent dans leur constitution par le contact mutuel de leurs parties les plus intimes; enfin la *physique* proprement dite, dont l'objet se borne à *l'étude des phénomènes qui n'altèrent en rien la nature intime des corps, qui ne changent point leurs poids respectifs, et qui ne sont que le résultat de certaines conditions plus ou moins passagères*.

L'accumulation des connaissances acquises sur les diverses parties de la *physique générale*, de la *philosophie naturelle*, comme on l'a juste-

ment appelée, a rendu indispensable leur division en plusieurs branches. On a dû les prendre successivement à part pour en faciliter l'étude; mais elles forment un tout; ces diverses sciences se prêtent chacune mutuellement un appui nécessaire.

**CONSTITUTION DES CORPS.** — Les corps simples eux-mêmes ne sont pas formés d'une manière continue. On doit les considérer comme étant formés d'une multitude de petites parties semblables, de forme invariable, que l'on a appelées *atomes* et que l'on suppose indivisibles. Une réunion d'atomes forme une *molécule*, petite masse de matière que l'on regarde comme de même nature que les corps dont elle fait partie, simple dans les corps simples, composée dans les corps composés. Malgré cela, on confond souvent dans le langage les mots *molécule* et *atome*.

Les *atomes* ne se touchent pas; ils sont simplement placés à côté les uns des autres et séparés par des espaces nommés *pores intermoléculaires*. Des boulets empilés les uns sur les autres donnent l'idée de l'arrangement des atomes à côté les uns des autres.

L'illustre Newton est l'auteur de ce système, qui explique la constitution des corps. D'ailleurs le raisonnement basé sur les expériences prouve l'existence de ces *espaces intermoléculaires*. Ainsi une loi physique que nous démontrerons dit qu'en général les corps se dilatent par la chaleur et se contractent par le froid ou par la pression. Or, pour que les corps puissent se dilater, il faut évidemment que leurs molécules s'écartent ou se rapprochent et conséquemment qu'il y ait entre elles des espaces vides.

Le célèbre Laplace (1749-1827) montra même que la force qui fait graviter les astres s'applique aussi aux molécules invisibles de la matière que nous pouvons toucher. Les découvertes modernes ont fait depuis avancer d'un grand pas le problème de la constitution de la matière. Il ne s'agit plus de simples hypothèses. On sait avec certitude, dit M. de Parvillé, que ces petites masses appelées atomes circulent en cadence dans leur milieu intermoléculaire. Elles l'agitent et y font naître des ondulations qui se répètent avec une vitesse inouïe; et ce n'est pas là un rêve : les physiciens ont mesuré ces vibrations; elles peuvent se répéter 600,000 billions de fois par seconde. Chaque corps nous représente en miniature tout un système céleste. Si nous pouvions construire un microscope assez puissant, nous parviendrions à découvrir, dans les corps qui nous entourent, dans un morceau de marbre, par exemple, des espaces vides comme les espaces planétaires; puis, de place en place, des étoiles harmonieusement groupées, et tout autour des atmosphères, et,

merveilleux spectacle! tous ces petits astres moléculaires tourneraient dans leur orbite, avec une régularité parfaite, comme les gros astres du ciel. D'après les expériences et les calculs les plus récents, la distance entre deux molécules serait plus petite qu'un dix-millionième de millimètre. D'après M. Lorenza, de Copenhague, le nombre des molécules contenues dans un milligramme d'eau est plus grand que 1,360 millions de milliards.

Deux *forces*, dites *moléculaires*, agissent continuellement sur les atomes : la première, appelée *l'attraction*, tend à les rapprocher; l'autre force, qui tend au contraire à les écarter sans cesse, est la force d'*expansion*.

La force d'attraction prend le nom de *cohésion* lorsqu'elle réunit les atomes d'un corps simple, et d'*affinité* lorsqu'elle réunit les atomes d'un corps composé.

**DIVERS ÉTATS DE LA MATIÈRE.** — Lorsque dans un corps la *cohésion* est très grande, le corps est dit à l'*état solide*. Ainsi un morceau de bois, de fer, de marbre sont à l'état solide, parce qu'il faut un effort plus ou moins grand pour vaincre la cohésion et séparer les molécules de ces corps.

Lorsque la *cohésion* est faible, lorsque les différentes molécules sont très mobiles, qu'elles glissent, qu'elles roulent les unes sur les autres, le corps est à l'*état liquide*. L'eau, l'alcool sont des corps à l'état liquide; leurs molécules se déplacent facilement, et ils prennent aussitôt la forme du vase qui les contient. Cependant cette *liquidité*, consistant essentiellement dans la mobilité parfaite des parties constituantes du corps, peut se rencontrer à divers degrés de perfection. Ainsi on peut dire qu'il y a un passage insensible des liquides plus ou moins parfaits aux liquides *visqueux*, comme l'huile; de ceux-ci aux corps *mous*, comme le saindoux, et de ces derniers aux corps solides.

Si enfin la *cohésion* est remplacée par la force d'expansion, le corps est à l'*état gazeux*. On le nomme *gaz*, *fluide élastique*, *fluide aériforme*. Exemples : l'air, le gaz hydrogène. Leur force d'*expansion* est caractéristique. Un centimètre cube d'eau occupe, s'il est réduit en vapeur à 100 degrés, 1,700 centimètres cubes. L'étude de cet état des corps est une partie de la physique expérimentale.

Tous les corps peuvent se présenter tour à tour dans ces trois états. La loi est générale. Les exceptions tiennent soit à notre impuissance à chauffer ou à refroidir assez, soit à la décomposition qu'une température élevée amène parfois. Tous les solides deviennent, par une augmentation

de chaleur, successivement liquides et gazeux, et, par une diminution de chaleur, tous les corps gazeux deviennent successivement liquides et solides.

Le soufre en canon, ou la fleur de soufre, a passé par ces trois états avant d'être livré au commerce. On trouve le soufre tantôt en masses translucides ou opaques, tantôt sous forme de poussière agglomérée avec de la terre dans les contrées volcaniques. Pour le séparer des impuretés qui l'accompagnent, on le place dans une grande chaudière A, chauffée par un fourneau F (fig. 8). Il devient bientôt liquide, se sépare en fondant des matières étrangères et s'écoule par le robinet R, pour aller alimenter le cylindre C, également chauffé par le fourneau F. Ce cylindre, en fonte, débouche en se recourbant un peu dans une grande chambre en maçonnerie. Les vapeurs du soufre devenu à l'état gazeux montent dans la grande chambre, munie dans le haut d'une soupape S, qui permet à l'air intérieur de sortir dès qu'il se dilate. Enfin la porte P, close pendant l'opération, sert à retirer le produit. Les vapeurs de soufre, arrivant dans cette chambre, s'y condensent et forment ensuite une petite poussière à laquelle on donne le nom de fleur de soufre. Si l'opération dure longtemps, la température finit par s'élever dans la chambre assez pour faire fondre une seconde fois la fleur de soufre. Alors on a du soufre liquide que l'on fait passer par la tirette *t* dans une petite chaudière B, que chauffe un fourneau particulier. Ainsi liquéfié, le soufre est introduit dans des moules en bois où il se refroidit, redevient solide et prend la forme de cylindres un peu coniques.

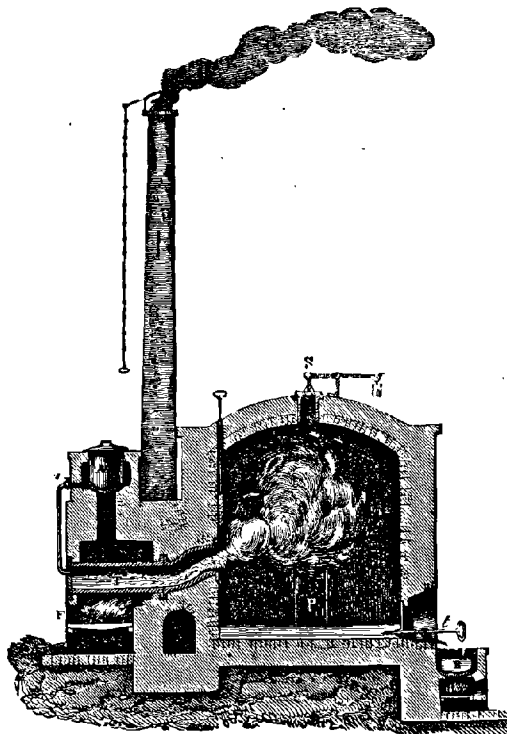


Fig. 8.

APPAREIL POUR DISTILLER LE SOUFRE.

Cette opération n'est pas autre chose que la distillation, qui ne fut inventée qu'au III<sup>e</sup> ou IV<sup>e</sup> siècle de notre ère par un philosophe d'Alexandrie

nommé Zosime, et non, comme on le dit par erreur, par les Arabes. Pourtant les anciens n'ignoraient pas la possibilité de faire passer successivement les corps par les trois états solide, liquide et gazeux. Dans ses *Météorologiques*, Aristote parle de l'eau de mer rendue potable par l'évaporation. « Le vin et tous les liquides peuvent être soumis au même procédé : après avoir été réduits en vapeur, ils redeviennent liquides. »

On connaît les admirables et nombreuses applications industrielles du fer liquéfié, puis revenu à l'état solide dans les moules où l'on a voulu le mettre. On sait que le minerai, brisé en morceaux de volume convenable, est mêlé avec du calcaire et jeté dans l'intérieur d'un fourneau avec le charbon. Lorsque la combustion a accompli son œuvre, le minerai s'est métamorphosé en fonte qui se réunit à la partie inférieure du fourneau. Il suffit de ménager une sortie au métal devenu *liquide*. On fait couler la fonte dans des canaux creusés dans le sable. Quand la coulée se produit, le spectacle est saisissant. A la base du haut fourneau jaillit un éclair, puis un ruisseau de feu fait brusquement irruption et s'arrête bientôt indécis sur la route qu'il va prendre : il s'étale, s'aplatit, se renfle, se tord en étincelant et en couvrant le sol de paillettes enflammées ; les gerbes brillantes éclatent de tous côtés comme des fusées. Le métal reprend bientôt sa marche en avant et descend docilement dans le chemin qui lui a été préparé pour s'arrêter dans le creux et se solidifier peu à peu sous la forme de masses à demi circulaires, que l'on nomme des *gueuses*.

A ce propos, rappelons un fait connu, mais assez curieux. Tout le monde a entendu dire que les ouvriers fondeurs s'amusaient parfois, pour étonner les spectateurs, à tremper le doigt dans cette fonte en fusion, qui enflammerait instantanément un objet quelconque. Le fait est possible, et en voici l'explication. La sueur qui entoure le doigt ou l'humidité qu'on y dépose en le mettant préalablement dans la bouche prend l'état sphéroïdal à cette haute température et empêche la fonte liquide de toucher la peau. Mais il est évident qu'il faut agir très promptement : quelques secondes de trop, et le doigt serait carbonisé.

**DIVISIONS DE LA PHYSIQUE. — PHÉNOMÈNE, LOI, THÉORIE PHYSIQUES.** — On désigne sous le nom de *phénomène physique* toute modification, tout changement qui survient dans l'état d'un corps ou dans ses propriétés, sous l'influence d'un des grands agents naturels : *pesanteur, chaleur, électricité, magnétisme, son et lumière*. Un morceau de cire étant frotté sur du drap attire les objets légers ; voilà un phénomène physique produit sous l'influence de l'électricité. Une corde tendue produit un son : autre phénomène physique.

L'ensemble des phénomènes d'un même genre, produits par une même cause, dans les mêmes circonstances, forme une *loi physique*. Par exemple, dire que « tous les corps abandonnés à eux-mêmes tombent, » c'est exprimer une loi physique.

Quelquefois la loi apparaît d'elle-même, sans difficulté, par l'*observation* seule, comme celle que nous venons d'énoncer. Mais, le plus souvent, la loi est masquée par des causes perturbatrices dont il faut éliminer l'influence. C'est là l'objet de l'*expérience*. L'expérience diffère de l'observation en ce que la première exige que le phénomène se produise sous des conditions réglées et déterminées d'avance; elle est le contrôle de la pensée que le physicien a senti naître dans son cerveau, quelquefois par l'effort seul du génie, quelquefois par les réflexions que lui a suggérées un fait observé par hasard.

Nous donnons un exemple :

Un jour de l'année 1583, Galilée, à peine âgé alors de dix-neuf ans, se trouvant dans l'église métropolitaine de Pise, son attention se porta sur une lampe suspendue à la voûte, que le hasard semblait avoir mise tout exprès en mouvement. Il fut frappé de la régularité des oscillations de cette lampe; il lui parut que, tout en diminuant d'étendue, elles conservaient la même durée, c'est-à-dire que, moins la lampe parcourait de chemin, plus elle allait lentement, mettant par conséquent toujours le même temps à faire une oscillation. C'était là une simple *observation*, à laquelle se serait arrêté un philosophe ancien qui lui aurait cherché une explication métaphysique. Galilée, inventeur de la *méthode expérimentale*, partisan de l'observation alliée avec le raisonnement, soumit le fait observé à des expériences répétées. Il prit des petites boules égales de plomb, de cuivre, d'ivoire, les suspendit à l'extrémité de fils d'égale longueur et constata qu'elles oscillaient en même temps et que la durée de l'oscillation ne dépendait pas de l'étendue de l'oscillation. Il en tira donc cette *loi physique* : *Pour un même pendule, quelle que soit la matière dont il est formé, les oscillations sont isochrones, c'est-à-dire qu'elles s'exécutent dans des temps égaux, malgré les variations de l'amplitude.*

L'ensemble des lois qui se rapportent à une même classe de phénomènes et le développement des conséquences qui en résultent portent le nom de *théorie physique*. Ainsi, on dit *théorie de la rosée*, *théorie du paratonnerre*, *théorie des aimants*, pour exprimer toutes les lois qui régissent les phénomènes relatifs à la rosée, au paratonnerre, aux aimants. Toutes les *théories partielles* dépendant d'un même *agent naturel*, d'une *cause générale*, forment une *théorie générale*.

Chacune de ces théories générales est étudiée dans une des divisions

de la physique. Nous verrons donc successivement la théorie de la pesanteur, la théorie de la chaleur, la théorie de l'électricité, du magnétisme, de la lumière.

Il nous faut ajouter qu'évidemment les divers phénomènes électriques, caloriques, magnétiques, lumineux, etc., sont les manifestations d'une même cause encore inconnue. L'observation vient ici à l'appui de l'expérience, et nous porte à croire de plus en plus que le feu, la lumière et l'électricité, dépendant d'un même principe, ne sont que les modifications d'un même être; que le fluide vital n'est qu'un fluide analogue aux autres fluides, qu'il n'est, en conséquence, peut-être aussi qu'une modification différente du principe unique; ce qui est d'ailleurs, comme le remarque l'abbé Nollet, le célèbre physicien du siècle dernier, conforme à cette sage économie qu'on voit régner dans l'univers, où les causes physiques sont employées avec épargne, et les effets multipliés avec magnificence.

## CHAPITRE II

### PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS

**PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.** — On entend par *propriétés des corps* ou de la *matière* leurs diverses manières d'être ou d'impressionner nos sens.

Ces propriétés sont *générales* ou *particulières*.

Les *propriétés particulières* sont celles qui appartiennent exclusivement à certains corps et qui varient d'un corps à un autre ou suivant les différents états d'un même corps; elles servent à caractériser chacun d'eux pris individuellement et à le distinguer des autres.

Ce sont : la *couleur*, la *dureté*, la *forme cristalline*, le *poids*, la *température*, etc.

Les *propriétés générales* sont celles que tous les corps possèdent plus ou moins.

Ce sont : l'*étendue*, l'*impénétrabilité*, la *porosité*, la *compressibilité*, la *divisibilité*, l'*élasticité*, la *mobilité*, l'*inertie*. Les deux premières sont dites *essentiels*, parce qu'il serait impossible de concevoir l'existence d'un corps qui ne les posséderait toutes deux, tandis que l'on peut concevoir à la rigueur des corps qui seraient dépourvus des autres.



1° **ÉTENDUE.** — *L'étendue* est la propriété que possède chaque corps d'occuper une certaine portion de l'espace qu'on appelle son *volume*.

La mesure de cette portion de l'espace se ramène toujours à l'évalua-



Arago en Espagne (page 34).

tion de longueurs, car la géométrie permet ensuite d'en conclure la grandeur des surfaces et des volumes ; ces mesures nécessitent le choix d'une unité et l'emploi de certains appareils.

L'unité de longueur adoptée en France est le *mètre*. On sait que, pour

imprimer au *système métrique* une durée qui fût à l'abri des révolutions qui ont bouleversé le monde, les auteurs du nouveau système résolurent de donner aux nouvelles mesures une base commune et de prendre cette base dans la nature même. En conséquence, l'astronome Delambre mesura, de 1792 à 1798, l'arc de méridien compris entre Dunkerque et Rodez, tandis que son collègue Méchain mesurait celui de Rodez à Barcelone, et ils conclurent de leurs opérations la longueur du quart de ce méridien (1). Cette longueur a été divisée en dix millions de parties égales, et l'on a fait construire une règle de platine dont la longueur, à la température de la glace fondante, fût précisément égale à celle de l'une de ces parties. Cette règle, conservée au Conservatoire des arts et métiers, est l'*étalon du mètre*, c'est-à-dire un mètre rigoureusement exact.

A la suite d'une opération métallurgique merveilleuse, dont nous parlerons en traitant de la fusion des métaux, il vient d'être fondu, au Conservatoire des arts et métiers de Paris, un nouvel alliage prescrit par la Commission internationale du mètre, pour servir à la confection de nouveaux étalons métriques destinés à remplacer pour les comparaisons ultérieures ceux de nos archives. Cet alliage, composé de 90 pour 100 de platine et 10 pour 100 d'iridium, les deux métaux les plus réfractaires que l'on connaisse, restera absolument insensible à toutes les influences atmosphériques ou autres qui pourraient en modifier la rigoureuse exactitude.

L'unité de mesure de longueur anglaise est le *yard*, qui égale  $0^m,91438348$ ; autrichienne, le pied,  $0^m,3161$ ; prussienne, le pied,  $0^m,3138556$ .

Nous ne nous occuperons que du mètre.

Il est important de pouvoir s'assurer si les mètres ont bien la

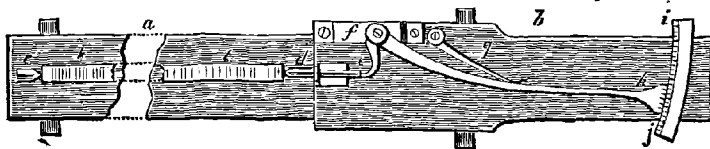


Fig. 9. — COMPAREUR FORTIN.

longueur convenable. Pour le faire, on se sert d'un instrument dit *comparateur*, que l'on doit au physicien Fortin (*fig. 9*). L'appareil se

(1) La mesure de l'arc du méridien en Espagne ayant été laissée inachevée par la mort de Méchain, ce fut Arago qui, conjointement avec M. Biot, fut chargé, en 1806, de terminer ce travail. L'Espagne était en ce moment exaspérée contre la France, la mort d'un Français était œuvre patriotique : Arago ne put rentrer en France, sa mission accomplie, qu'après les plus dramatiques aventures, après avoir risqué cent fois sa vie, avoir supporté la captivité la plus dure, les tentatives d'assassinat les plus terribles, et trois ans seulement après son départ.

compose d'une table en fer, à l'une des extrémités de laquelle est un talon vertical  $c$ , ayant la forme d'un prisme triangulaire, et contre lequel on appuie l'extrémité  $k$  d'un mètre; un châssis glisse sur la table et peut y être fixé par des vis de pression; on l'amène près de l'extrémité du mètre, et alors une petite tige métallique  $l$  s'appuie sur le mètre en  $d$ , d'un côté, et d'autre part en  $e$ , sur la petite branche d'un levier coudé. Un ressort  $g$ , appuyé sur la grande branche du levier, assure les contacts. La pointe  $h$  du levier parcourt un arc gradué en demi-millimètres. Si le mètre et l'étalon sont de même longueur, en substituant l'un à l'autre, le grand bras du levier marque la même division de l'arc gradué; sinon, on pourra évaluer la différence en plus ou en moins.

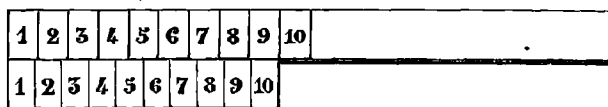


Fig. 10. — VERNIER.

Pour mesurer une longueur avec une approximation plus grande qu'avec le mètre divisé en millimètres, on se sert du *nonius* ou *vernier*, du nom de l'inventeur de l'instrument (*fig. 10*). Le *vernier* est une petite règle droite ou courbe de neuf centimètres de longueur, que l'on divise en dix parties égales, divisées encore elles-mêmes en dix autres parties. Chacune des plus petites divisions est d'un dixième plus petite qu'un millimètre. En plaçant donc l'extrémité du vernier sur le point extrême de la lon-

gueur à mesurer, on voit, en remarquant le chiffre où il coïncide, combien de dixièmes de millimètre il faut ajouter pour atteindre la limite de la longueur. Le *vernier* courbe sert pour mesurer les arcs de cercle.

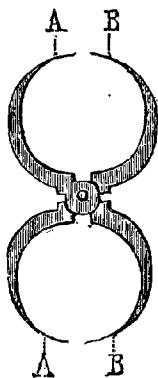


Fig. 11.

COMPAS  
D'ÉPAISSEUR.

S'il s'agit de mesurer le diamètre d'un cylindre, d'une sphère ou de tout autre corps à face courbe, on se sert du *compas d'épaisseur* (*fig. 11*). C'est un compas formé de deux branches contournées, mobiles autour d'une charnière; on donne à ses branches un écart tel que ses deux pointes A et B touchent à la fois les deux points dont on mesure la distance; on reporte ensuite les pointes du compas sur une règle divisée, et l'on mesure leur écartement.

Pour mesurer les épaisseurs, on fait aussi usage du *piéd à bec* ou *compas à verge*, instrument à peu près semblable à celui dont les cordonniers font usage.

Le vernier est lui-même insuffisant pour évaluer les grandeurs fort petites. Dans certains cas, l'on peut évaluer les centièmes et les millièmes de millimètre à l'aide de la *vis micrométrique*. C'est une vis dont le pas

est très petit et dont le filet a d'ailleurs une régularité aussi parfaite que possible; de plus, la tête de la vis est divisée. Deux modes d'application en feront bien comprendre l'usage : le *sphéromètre* et la *machine à diviser*.

Le *sphéromètre* (*fig. 12*) est une vis micrométrique V, à pointe émoussée, dont le tête T est divisée en 500 parties égales, et qui se meut dans un écrou en bronze E, supporté par un trépied d'acier aussi à pointes émoussées. Ce trépied repose sur un plateau en verre P. L'un des jambages porte une règle en laiton R, verticale et divisée en demi-millimètres. Le pas de la

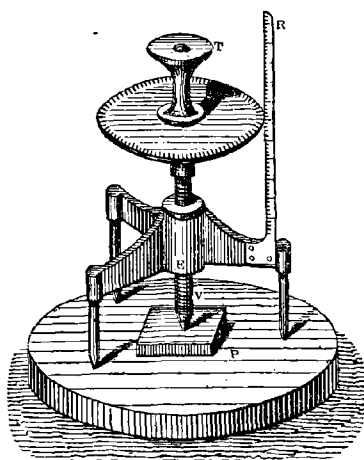


Fig. 12. — SPHÉROMÈTRE.

vis, c'est-à-dire la quantité dont la pointe s'abaisse pour un tour complet, est aussi d'un demi-millimètre. Quand la face supérieure de la tête de la vis affleure une des divisions de la règle verticale, c'est la division zéro de cette tête qui se trouve en face de la règle. Supposons maintenant qu'on veuille mesurer l'épaisseur d'une plaque mince. On amène d'abord la pointe de la vis au contact du plateau de verre. On constate qu'alors la tête T est en face du zéro de la règle R et que le zéro de sa division est en regard de cette règle. On relève alors la vis, on glisse dessous la plaque dont on veut mesurer l'épaisseur. On abaisse ensuite

la vis jusqu'à ce que sa pointe touche la plaque. Il arrive alors, par exemple, que la tête T arrive entre la division 25 et 26 de la règle R; l'épaisseur de la plaque est donc comprise entre  $12^{\text{mm}},5$  et  $13^{\text{mm}}$ ; mais si, de plus, on note que la division de la tête T, qui se trouve en regard de la tige R, est la 218<sup>e</sup>, par exemple, et que l'on remarque qu'en relevant cette vis on fait successivement défiler les divisions 1, 2, 3, etc., devant la règle graduée, on en conclut qu'il faut, pour avoir l'épaisseur de la plaque, ajouter à  $12^{\text{mm}},5$  deux cent dix-huit fois la cinq centième partie d'un demi-millimètre, c'est-à-dire  $0^{\text{mm}},218$ ; dont l'épaisseur est, à un millième de millimètre près,  $12^{\text{mm}},5 + 0^{\text{mm}},218 = 12^{\text{mm}},718$ .

La *machine à diviser* (*fig. 13*), comme son nom l'indique, sert à marquer les petites divisions parfaitement égales d'un tube de verre, d'une plaque, d'un mètre, etc. L'une des formes diverses données à cet appareil est la suivante :

Une vis micrométrique tourne entre deux coussinets fixés sans pouvoir avancer. Un écrou, dont le pas est identique à celui de la vis, se

déplace le long de celle-ci sans tourner sur lui-même; il entraîne dans son mouvement un chariot C, reposant sur l'écrou et guidé dans son mouvement par deux rails parallèles, tels que AA. Au chariot est fixé un burin, ou un diamant, suivant le cas, pour tracer T. La pièce en forme de triangle qui supporte le burin tourne autour de la base d'un rectangle articulé lui-même en K; de sorte qu'en tirant le burin pour l'éloigner du chariot, l'on tend à mettre le triangle et le rectangle dans un même plan; un ressort attaché en *t* ramène l'appareil en place

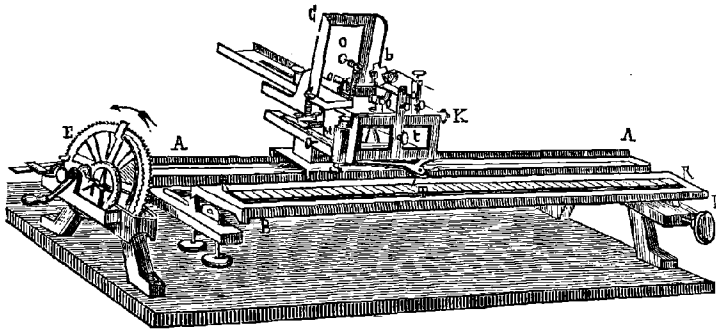


Fig. 13. — MACHINE A DIVISER.

quand on l'abandonne à lui-même, et si, en même temps, l'on appuie la pointe du butoir sur la règle à diviser R, une division est tracée. Il faut que ce trait ne puisse écarter T que d'une certaine quantité en dehors de sa position de repos; un butoir O, venant frapper contre un appui *b*, arrête l'écartement. Ce butoir est d'ailleurs à une distance réglée d'avance; de plus, il a la forme d'une roue échancrée qui tourne sur elle-même quand on écarte le burin, de sorte que dans certains cas le butoir vient frapper dans une échancrure, ce qui produit un écart plus grand, une division plus longue. Ainsi s'obtiennent les accroissements de longueur des divisions de 5 en 5 et de 10 en 10. Le chariot porte encore un microscope *m*. L'objet à diviser est fixé parallèlement à la vis sur un banc de fonte BB.

La tête de la vis E porte des divisions qui défilent devant l'index; soit 400 le nombre de ces divisions, et un demi-millimètre le pas de la vis; à chaque division de la tête qui passe devant l'index, l'écrou, et par suite le burin, avance de la 400<sup>e</sup> partie d'un demi-millimètre. Supposons que les divisions qu'on veut tracer doivent être distantes de 1<sup>mm</sup>,25; après avoir tracé le premier trait, on fera tourner la vis jusqu'à ce que, après avoir fait deux tours entiers, il y ait encore eu 100 divisions de la tête

qui aient passé devant le repère; on tracera le second trait, et l'on continuera de même. Dans les machines plus perfectionnées, un butoir que l'on place d'avance arrête le mouvement quand la vis a tourné de la quantité voulue.

**2° IMPÉNÉTRABILITÉ.** — *L'impénétrabilité* est la propriété qu'ont les corps d'occuper dans l'espace une place déterminée à l'exclusion de tout autre corps; c'est-à-dire que deux corps ne peuvent occuper un même lieu. Ainsi l'ombre que le soleil projette derrière un corps est une portion d'étendue qui affecte nos sens d'une manière spéciale; mais cette ombre n'est pas *impénétrable*, elle n'est pas un *corps*. Autre exemple : On remplit de mercure un tube de 1 mètre environ de hauteur, ouvert par un bout, fermé par l'autre; on le fait chauffer pour chasser l'air adhérent au verre et au mercure. Quand le tube est refroidi, on le ferme avec le doigt et on le renverse dans une cuve de mercure. Dès qu'on a retiré le doigt, la colonne de mercure descend dans le tube et s'établit à une hauteur de 0<sup>m</sup>,76 environ. En inclinant le tube, la portion située au-dessus du mercure diminue, elle finit même par disparaître; mais elle reparaît aussitôt que l'on redresse le tube et se rétablit au même point que précédemment. Cette portion affecte notre vue comme le ferait de l'air; mais le mercure la pénètre, ce n'est pas un *corps*. Une bulle d'air restée dans le tube ne disparaîtrait pas, le mercure ne la pénétrerait pas : la bulle d'air est un *corps*.

Cette *impénétrabilité*, propriété caractéristique des corps, est facile à prouver. L'air, par exemple, est impénétrable aussi, malgré l'apparence. Pour le démontrer retournez un verre, enfoncez-le dans l'eau en maintenant son ouverture tournée vers le bas; il vous sera impossible de faire monter l'eau jusqu'au fond du verre si profondément que vous l'enfonciez, car celui-ci contient toujours de l'air qui est impénétrable. L'expérience est rendue plus visible si l'on a placé sous le verre un morceau de liège qui flotte sur le liquide et en indique le niveau.

Cependant il semble y avoir des exceptions. Mettez de l'eau dans un vase plein de sable; cette eau se loge dans ce vase qui semblait plein; l'huile pénètre dans le marbre. Remplissez d'eau jusqu'à la moitié environ un tube de verre long et étroit, versez par-dessus de l'alcool jusqu'en haut; le tube sera plein. Mais bouchez-le, puis retournez-le en l'agitant un peu : le mélange des deux liquides s'opère, le plein disparaît, l'alcool a pénétré l'eau.

Bien plus, le volume de l'alliage de plusieurs métaux est quelquefois moindre que le total des volumes des deux métaux alliés. Ainsi l'alliage

de plomb et d'antimoine, employé pour les caractères d'imprimerie, a un volume moins grand que ceux du plomb et de l'antimoine pris séparément. De même, le précipité blanc produit par le sel marin dans une dissolution d'argent faite avec de l'eau-forte est moindre que les deux corps employés.

Cette pénétration n'est qu'apparente. Le phénomène résulte de ce qu'entre les différentes parties d'un même corps il existe des intervalles vides de leur propre substance, et que le corps qui semble pénétrer se loge dans ces intervalles. Cette troisième propriété des corps s'appelle la *porosité*.

3° **POROSITÉ.** — Il y a deux sortes de *pores* : les *pores intermoléculaires* ou *insensibles*, dont nous avons parlé précédemment, et les *pores sensibles*, que l'on peut apercevoir soit à l'œil nu, soit à l'aide du microscope. La pierre ponce, les éponges, le bois, le sucre, nous les montrent évidemment, et à l'œil nu; mais on constate leur existence aussi facilement avec le microscope dans tous les autres corps de la nature.

C'est à cause de la porosité de leur coquille, à travers laquelle s'évapore leur partie laiteuse, que les œufs perdent insensiblement de leur qualité et finissent par se corrompre; ce qui permet de les conserver en bouchant les pores de cette coquille, opération toutefois bien difficile puisque l'on cherche toujours un nouveau moyen d'arriver à cette clôture hermétique. Le dernier procédé proposé est de les enduire d'une solution de silicate de potasse additionnée d'eau pesant de 25 à 30 degrés au pèse-acide concentré.

C'est à cause de la porosité de sa peau que l'homme peut expulser en dehors de son organisme le résidu des oxydations de la nourriture introduite dans son économie. La peau respire également; la *perspiration*, pour lui donner son vrai nom, est d'autant plus active que la température est plus élevée, et l'échange des gaz se fait par les *pores*. La vapeur aqueuse s'échappe par les glandes sudoripares, qui viennent déboucher à la surface par de petits tubes d'environ dix millièmes de millimètre de diamètre et de six millimètres de longueur. On compte environ, répartis sur toute la surface du corps, deux millions et demi de ces petits orifices sudoripares. En moyenne, le corps humain perd par les pores de la peau 20 grammes de matière solide, 25 grammes d'acide carbonique et 650 grammes d'eau. Sous l'action combinée d'un travail musculaire énergique et d'une élévation de température, le poids de l'homme peut, par la seule transpiration, perdre *en une heure de deux à trois livres*.

Les pores des végétaux s'aperçoivent en examinant à la loupe ou au microscope une section transversale faite dans la tige d'un arbre (*fig. 14*); ces pores ou stomates sont formés par les canaux qui conduisaient la sève aux diverses parties de l'arbre. Les feuilles boivent par leurs pores l'oxygène de l'air.

Les marbres statulaires se laissent aisément imbiber par l'huile; une pierre, l'*hydrophane*, est assez poreuse pour se laisser imbiber par l'eau et jouit de cette propriété singulière qu'étant opaque avant l'imbibition,

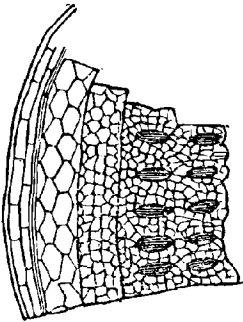
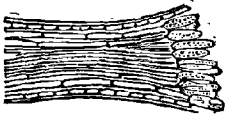


Fig. 14.

PORES OU STOMATES  
VUS AU MICROSCOPE.

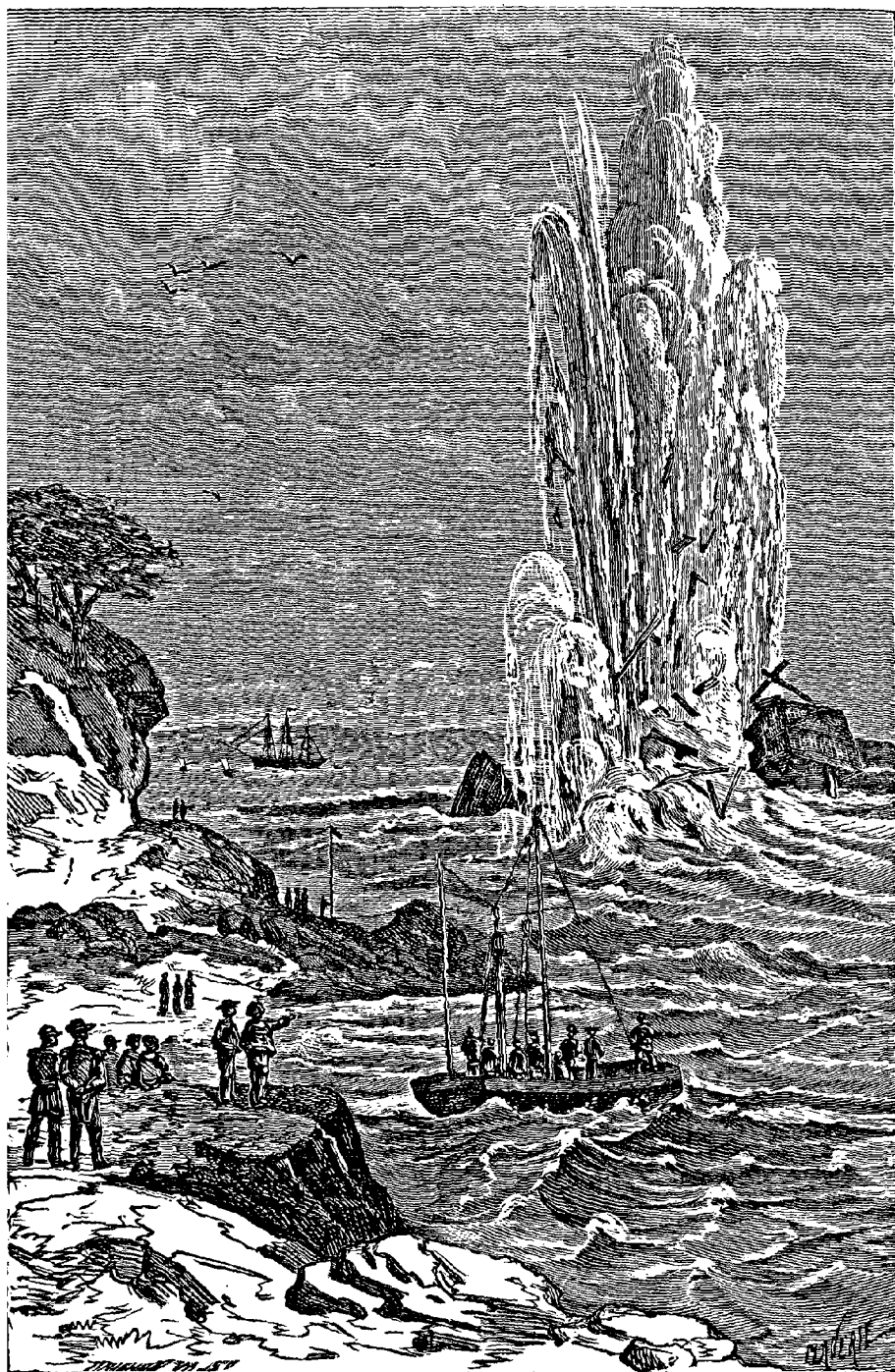
elle devient transparente après. Le papier se laisse si facilement traverser par un jet d'hydrogène que celui-ci semble ne rencontrer aucun obstacle, comme l'on peut s'en assurer en l'enflammant au delà de la feuille de papier. On utilise même cette propriété très sensible dans certaines pierres pour la fabrication et l'emploi des filtres, instruments, soit dit en passant, qui se contentent d'empêcher le limon, les matières solides en suspension de pénétrer dans un réservoir, — affaire de nettoyage, — mais qui n'arrêtent pas les substances organiques solubles et conséquemment ne peuvent donner une eau saine, ni prévenir les accidents et les maladies endémiques amenés par l'usage d'une eau impure.

La porosité de la fonte est telle qu'elle ne peut être employée pour les corps de pompe des presses hydrauliques, qu'autant qu'elle a été doublée intérieurement de cuivre, sans quoi l'eau filtre à travers le métal. C'est pourquoi les poêles en fonte sont très malsains : chauffés au rouge, ils laissent échapper à travers leurs pores des gaz insalubres, qui souvent ont causé l'asphyxie des imprudents qui ne renouvelaient pas l'air de la pièce qu'ils occupaient et où étaient placés des poêles de cette sorte. Le diamant même, le plus dur des minéraux, jouit de la propriété commune, puisqu'à travers ses pores passe un rayon de lumière.

Les liquides enfin sont poreux aussi. Cela a été mis en évidence par une expérience de Réaumur (1683-1757), qui est la même que celle dont nous avons parlé tout à l'heure. On remplit le flacon d'eau d'abord, puis d'alcool, sans mélanger les deux liquides. En mettant le bouchon, l'alcool monte dans le tube, en A, hauteur que l'on marque avec le curseur c. On remue le flacon pour faire le mélange; le niveau est descendu en B. Donc les molécules de chaque liquide ont pénétré dans les pores de l'autre; de plus, ces pores contenaient de l'air que l'on voit se dégager.



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Navire fracassé par l'explosion d'une torpille (page 47).

Liv. 6.



Quelques phénomènes curieux résultent de la porosité de certains corps, assez grande pour qu'ils soient imbibés par l'eau. Il arrive souvent que cette imbibition produit un gonflement de la substance. Le bois, par exemple, gonfle étant mouillé. Tout le monde sait que les tonneaux, les baquets que l'on laisse se dessécher se disjoignent, et que, si on les mouille, le bois se gonfle et que les fissures disparaissent. Les portes et les fenêtres s'ouvrent et se ferment difficilement par un temps humide. On courbe les douves de tonneau en les desséchant sur l'une de leurs faces; les porés de celles-ci se resserrent et la douve se contourne. Pour diviser les pierres meulières ou les blocs de granit, on introduit des coins de bois sec dans de profondes entailles faites sur eux au ciseau, puis on mouille ce bois qui se gonfle et les fait fendre. Une feuille de papier mouillée sur une de ses faces se gondole et roule sur elle-même; mouillée sur les deux faces, elle augmente de surface; de là l'usage de mouiller les feuilles de papier que l'on veut tendre sur une planchette. Les toiles se rétrécissent de même quand on les mouille, et il faut tenir compte de ce fait quand on veut les faire servir à la confection des vêtements.

Enfin, rappelons une circonstance mémorable où le raccourcissement des cordes, dû à l'imbibition, produisit un effet prodigieux, car ce raccourcissement est susceptible de développer une force énorme.

Le pape Sixte-Quint (1521-1590) voulait dresser sur une des places de Rome le célèbre obélisque que P. Caligula avait fait venir d'Espagne. La base avait été placée sur le piédestal, et avec des cordes on essayait de le mettre droit. Un profond silence régnait parmi l'immense foule accourue pour assister à ce spectacle; car ordre avait été donné par le terrible pape de ne point pousser un cri, de ne point prononcer une parole, sous les peines les plus sévères, de crainte que le tumulte du peuple ne troublât les ouvriers chargés de cette opération, réputée alors d'une difficulté inouïe. Le monolithe avait été déjà amené presque au niveau du piédestal; mais les efforts des travailleurs ne pouvaient l'élever davantage, et quelques-uns commençaient à douter du succès. Tout à coup, au milieu du silence, une voix s'élève : « Mouillez les cordes ! » crie un jeune homme, emporté par l'intérêt qu'il portait au travail de mécanique qu'il contemplait. On arrête l'imprudent; mais le pape lui fait grâce, car son idée est admirable.

On mouille les cordes, elles grossissent et, par cela même, se raccourcissent, ce qui tient à l'enroulement en spirale des fibres constituant chaque corde; elles soulèvent l'obélisque, qui sort enfin de la poussière où il était gisant depuis seize siècles.

4° **COMPRESSIBILITÉ.** — La *compressibilité*, conséquence de la porosité, est la propriété dont jouissent les corps de pouvoir diminuer de volume sous l'influence d'une pression extérieure : leurs molécules se rapprochent les unes des autres.

Les corps solides sont généralement peu *compressibles*. Cependant ils le sont assez pour que l'on doive en tenir compte dans les constructions. Quand on enleva les étais du pont de Neuilly (Seine), que l'on venait de construire, il s'abaissa de plusieurs centimètres ; les ingénieurs n'ignorent pas que ce phénomène accompagne toujours le décentrement des ponts. C'est pour avoir négligé d'avoir tenu compte de cette compressibilité, que les architectes qui, après Soufflot, terminèrent le Panthéon virent se raccourcir, d'une manière assez notable pour qu'il ait fallu immédiatement y remédier, les piliers qui supportent le dôme. Les tissus, le bois, tous les corps poreux jouissent manifestement de cette propriété. Quand on enfonce un clou dans une muraille ou dans une planche, cette matière, étant impénétrable, se comprime donc pour recevoir le clou. Si l'on soumet au choc du balancier une rondelle d'argent destinée à faire une pièce de monnaie, elle diminue de volume en même temps que l'effigie apparaît : effet de *compressibilité*. L'acier dont s'est servi M. Whitworth, l'inventeur d'un nouveau canon anglais, est soumis pendant la coulée à une pression d'environ 3,000 kilogrammes par centimètre carré. Le métal diminue notablement de volume sous cette compression énergique, et il y gagne beaucoup en ténacité, en résistance et en ductilité : résultat pratique de la *compressibilité*.

Les liquides ont été pendant longtemps réputés incompressibles. M. Hofer, dans son *Histoire de la Physique*, raconte longuement comment on est parvenu à prouver l'erreur de cette opinion, « afin de montrer, dit-il, combien il est difficile d'arriver à une exactitude désirée, malgré le concours de plusieurs générations de savants. »

Ce fut seulement en 1661 que les physiciens de l'Académie del Cimento de Florence, jugeant qu'il vaut mieux chercher des faits qu'adopter des opinions, firent un grand nombre d'expériences pour s'assurer si l'eau est compressible. A cet effet, ils se servirent d'abord d'un tube de verre deux fois recourbé et terminé par deux sphères creuses pleines d'eau ; le tube intermédiaire contenait de l'air, et le tout était hermétiquement fermé. En chauffant l'une des deux sphères, on produisait de la vapeur qui comprimait le liquide contenu dans l'autre ; mais on ne vit aucun abaissement de niveau. Cela s'explique : en se condensant dans la partie froide, la vapeur devait augmenter la quantité du liquide, en même temps que la pression en diminuait le volume. Variant leurs procédés, les académiciens

de Florence comprimèrent avec du mercure de l'eau placée dans des tubes de verre; une pression de 80 livres de mercure sur 6 livres d'eau ne produisit pas de diminution appréciable. Ils remplirent alors une boule d'argent mince avec de l'eau à la glace, et, après en avoir exactement fermé l'ouverture, il frappèrent la boule avec un marteau pour en diminuer le volume; l'eau s'échappait à travers les pores du métal. De ces diverses expériences ils conclurent, un peu prématurément, que l'eau était *incompressible*.

Les expériences de Musschenbroek (1692-1761), de Boerhaave (1668-1738), d'Hamberger (1697-1755), de l'abbé Nollet (1700-1770) tendirent à confirmer l'opinion des savants de Florence; il semblait acquis à la science que l'eau est *incompressible*.

C'était cependant une erreur.

Robert Boyle (1626-1691), Canton (1715-1783) et surtout Perkins (1721-1800) reprirent ces expériences et démontrèrent que l'eau est compressible. Enfin Erstedt (1777-1851), le célèbre physicien de Copenhague (aux travaux duquel, soit dit en passant, est due la première idée des télégraphes électriques), arriva à pouvoir mesurer la compressibilité elle-même des liquides au moyen de l'appareil qu'il inventa, appelé *piézomètre*, et qui, perfectionné d'abord par MM. Colladon et Sturm (mort en 1855), par M. Regnault, que la science vient de perdre il y a peu de temps, et depuis par M. Grassi, permet aujourd'hui de mesurer exactement cette compressibilité.

L'appareil se compose (*fig. 15*) d'un cylindre de cristal, à parois très épaisses, de 8 à 9 centimètres de diamètre et rempli complètement d'eau. Il est solidement fixé sur un plateau de bois, et sa partie supérieure, en cuivre, s'ajuste, en se vissant, sur le cylindre de verre. Cette partie supérieure est percée d'un entonnoir R par lequel on introduit l'eau dans l'appareil et que ferme un robinet; puis d'un corps de pompe, également en cuivre, dont le piston, qui remplit très exactement le tube, est mis en mouvement par une vis de pression P. A l'intérieur du cylindre est un récipient de verre A rempli du liquide à comprimer, récipient qui se termine à sa partie supérieure par un tube capillaire, se recourbant pour plonger dans un bain de mercure O et divisé en parties d'égale capacité, ce qui permet de déterminer la compressibilité du liquide contenu dans

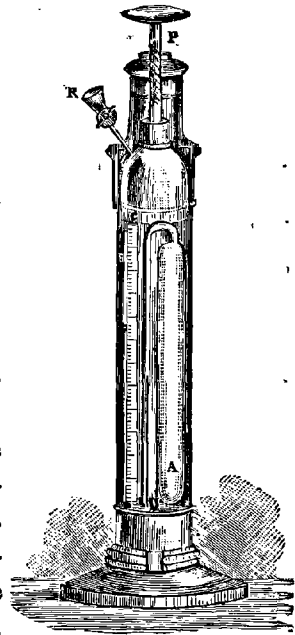


Fig. 15.  
PIÉZOMÈTRE D'ERSTEDT.

le récipient A. Enfin, dans l'intérieur du cylindre est encore un *manomètre à air comprimé*, appareil que nous étudierons plus loin, et qui n'est qu'un tube de verre B plein d'air, fermé à sa partie supérieure, et dont l'extrémité inférieure ouverte plonge dans le bain de mercure. Quand on n'exerce aucune pression sur l'eau qui est dans le récipient, le tube B est plein d'air; mais lorsqu'en tournant la vis P le piston comprime l'eau, celle-ci transmet sa pression au mercure qui s'élève dans le tube en comprimant l'air qu'il contient. Une échelle graduée C, placée contre le tube, signale la réduction du volume d'air, et par suite on apprécie la pression que supporte le liquide du cylindre, comme nous le démontrons en nous occupant des manomètres.

Si l'on exerce une pression, le mercure monte non seulement dans le tube B, mais encore dans le tube capillaire qui termine le récipient A, comme on le voit en regardant les degrés marqués sur ce tube capillaire; le liquide du récipient a donc diminué de volume, et l'on peut mesurer cette diminution. Représentant, en effet, par  $n$  le nombre de divisions qu'a montées le mercure dans le manomètre, par  $n'$  le nombre de divisions qu'a montées le mercure dans le tube capillaire, par  $F$  la pression en *atmosphères* marquée par le manomètre, et par  $N$  le nombre des parties du volume contenu dans le récipient A, on a évidemment pour formule de la contraction par unité de volume  $\frac{n'}{N+n}$  et  $\frac{n'}{(N+n)F}$  par unité de pression.

Ce que l'on détermine ainsi est le *coefficient de compressibilité*. C'est la fraction dont diminue l'unité de volume d'un liquide pour une compression d'une *atmosphère* (poids de 1 kilogramme 33 grammes par centimètre carré de surface comprimée). Nous donnons le tableau des coefficients de compressibilité de quelques liquides.

*Tableau des coefficients de compressibilité de quelques liquides.*

NOMS DES LIQUIDES.	TEMPÉRA- TURE.	CORFFICIENTS.	OBSERVATIONS.		
Mercure.....	0°	0,0000295	Compressibilité indépendante de la pression.		
Eau.....	0°	0,000503			
Eau.....	11°	3,0000480			
Eau.....	18°	0,0000463			
Eau.....	25°	0,0008456			
Eau.....	53°	0,0000441			
Éther.....	0°	0,000111		Sous une pression de 3, 4 atmosphères.	
Éther.....	0°	0,000131			— — 7, 0 —
Alcool.....	7°	0,0000828			— — 2, 3 —
Alcool.....	7°	0,0000853			— — 9, 5 —
Chloroforme.....	12°	0,0000648	— — 1, 3 —		
Chloroforme.....	12°	0,0000743	— — 9, 2 —		
Esprit de bois.....	14°	0,0000913	Compressibilité indépendante de la pression.		

Cette *faible* diminution du volume des liquides permet, dans les applications pratiques, de n'en point tenir compte. Ainsi, dans l'emploi des torpilles, on considère l'eau comme absolument incompressible, et il suffit de faire éclater un certain poids de substance explosible dans la mer pour que toute la force se transmette au liquide. Il est donc inutile, pour faire sauter un navire, que la mine joue précisément dessous, mais seulement dans un petit rayon autour de ses flancs. En 1879, la commission des torpilles françaises essaya un de ces engins plongé à 16 mètres de profondeur dans la mer. Un bâtiment hors d'usage, le *Requin*, avait été mouillé à huit mètres de la torpille. Quand celle-ci éclata, on vit s'élever une colonne d'eau de plus de cent mètres de hauteur; ce fut comme un puissant boulet liquide qui souleva le navire, le secoua furieusement et le brisa du coup. La même expérience, faite en 1880, lors de la visite du président de la République à Cherbourg, produisit des résultats identiques.

Les corps gazeux sont incomparablement plus *compressibles* que les liquides et les solides. L'étude des phénomènes dépendant de cette propriété constitue un des chapitres les plus importants de la Physique, et nous les étudierons plus loin. Nous dirons alors les nombreuses et précieuses applications industrielles que l'on a tirées de cette propriété. Nous ne citerons ici qu'un exemple de cette extrême compressibilité. Dans les expériences faites par MM. Berthelot, Cailletet et Pictet en 1877 pour liquéfier les gaz les plus incoercibles, le premier de ces physiciens, notamment, a poussé la compression des gaz jusqu'à 800 atmosphères, c'est-à-dire qu'il réduisait le volume primitif des gaz de 1 à 800 fois environ.

3° ÉLASTICITÉ. — L'élasticité est la propriété en vertu de laquelle les molécules des corps, écartées de leurs positions ordinaires d'équilibre par des causes extérieures, une pression, un choc, une traction, tendent à reprendre leur volume et leur état primitifs lorsque la cause qui avait comprimé ou déformé le corps cesse d'agir. Toutefois, les corps ne s'arrêtent pas immédiatement dans cette position normale; ils la dépassent en vertu de la vitesse acquise et exécutent un certain nombre d'oscillations avant de la reprendre définitivement. On peut le constater facilement avec des pincettes dont on écarte les branches et que l'on lâche. C'est l'élasticité du crin qui donne aux sièges rembourrés leurs propriétés; c'est l'élasticité du caoutchouc qui fait employer cette matière à de nombreux usages. L'acier plus ou moins trempé est une des substances dont on se sert le plus souvent à cause de son *élasticité*; c'est avec lui que l'on construit tous les *ressorts*, soit comme *moteurs* dans les pendules, les montres, etc., soit, dans les machines, pour maintenir et ramener dans des positions invariables

certaines pièces qui doivent s'écarter fort peu, comme des soupapes. On emploie encore l'acier dans les voitures suspendues; le corps de la voiture est porté par des ressorts de lames d'acier assujetties ensemble, mais dont les longueurs vont en décroissant; de cette façon, le milieu où s'exerce l'effort principal du poids a une épaisseur suffisante pour y résister, tandis que les extrémités possèdent, en vertu de leur *élasticité*, la flexibilité nécessaire pour atténuer la violence des chocs que peut recevoir l'essieu. Il y a peu de temps, un inventeur, M. Giffard, a trouvé un nouveau moyen d'employer l'*élasticité* des ressorts d'acier pour soustraire les voyageurs au mouvement de trépidation et de lacet si fatigant de nos wagons. Sur la traverse d'avant et d'arrière du châssis, il élève deux montants en fer sur lesquels reposent plusieurs lames d'acier formant un ressort horizontal. Aux deux extrémités de ces ressorts, sur quatre points d'appui, symétriquement disposés par conséquent, est suspendue la caisse de la voiture, au-dessus du châssis. On voyage ainsi en quelque sorte dans un hamac fixé par deux points à chacune des extrémités. Si l'augmentation de dépense dans le matériel que nécessiterait l'application de ce système ne permet pas de modifier tous les wagons, il est probable qu'on l'utilisera pour les wagons-lits destinés aux malades ou aux blessés.

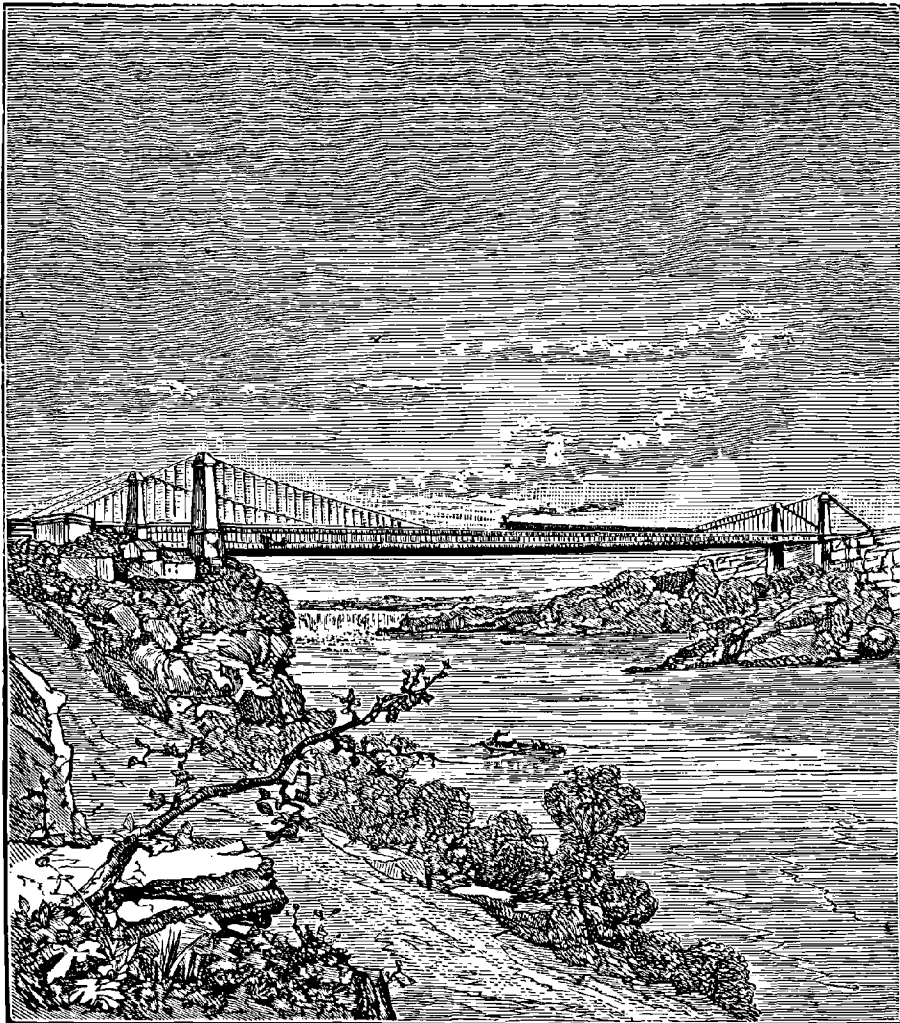
Cependant tous les corps ne jouissent pas d'une élasticité égale. Dans les liquides et dans les gaz, il n'y a pas de limite d'élasticité, et l'étude des propriétés des corps dans cet état constitue encore un chapitre important de la Physique. Mais, pour ne parler en ce moment que des corps solides, on connaît la différence extrême d'élasticité qui existe entre une balle de terre glaise humide et une balle de caoutchouc, entre une bille d'ivoire et une bille de plomb ou de cire, ou d'un corps gras quelconque.

Jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, négligeant le côté pratique de la question, on s'était surtout occupé de vaines recherches sur la *cause* de l'élasticité. Les disciples du célèbre philosophe Descartes (1596-1650) l'attribuaient à une matière subtile, à l'*éther*, qui devait faire effort pour passer à travers les pores devenus trop étroits. « Ainsi, disaient-ils, en bandant ou en comprimant un corps élastique, par exemple un arc, ses particules s'écartent les unes des autres du côté convexe et se rapprochent du côté concave; par conséquent, les corps se rétrécissent du côté concave, de sorte que, s'ils étaient ronds auparavant, ils deviennent ovales, et la matière proprement dite, s'efforçant de sortir des pores ainsi rétrécis, doit en même temps faire effort pour rétablir le corps dans l'état où il était lorsque les pores étaient plus ouverts ou plus ronds, c'est-à-dire avant que l'arc fût bandé. »

Le Père Malebranche (1638-1715) et ses disciples expliquaient l'élasti-



cité par de petits tourbillons, dont tous les corps seraient remplis. D'autres l'attribuaient à l'action de l'air, auquel ils faisaient jouer le même rôle que l'éther des cartésiens. D'autres encore en rendaient compte par l'attraction.



Pont suspendu au-dessus de la cataracte du Niagara (page 53).

Au commencement de notre siècle, Poisson (1781-1840), Cauchy (1784-1858), Savart (1791-1841), Wertheim (1805-1862), reprenant les travaux plus pratiques ébauchés par S'Gravesande (1688-1742), cherchèrent les lois des diverses élasticités : *élasticité de traction*, *élasticité de flexion*, *élasticité*

de torsion; ils soumièrent ces lois au calcul, et ils sont parvenus à déterminer, pour les métaux les plus communément employés dans l'industrie, les coefficients d'élasticité, c'est-à-dire la limite d'élasticité de ces corps, la résistance plus ou moins grande que chacun d'eux oppose à sa rupture quand il est, ou tiré par un poids, ou plié, ou tordu, ce qu'en un mot on appelle sa *ténacité*.

Voici les expériences qui ont guidé les physiciens dans leurs calculs :

1° Pour l'*élasticité de traction* :

Une tige métallique, une *verge*, AB, est prise dans les mâchoires de deux étaux EE, bien serrée par des vis VV (*fig. 16*). L'étau du haut est solidement fixé à un madrier vertical M. Une caisse C est attachée à l'étau du bas et sert à placer successivement les poids. On relève la vis T pour empêcher la caisse de porter sur le sol, et, afin d'éviter de produire une secousse dans la verge, on ramène la vis au contact du sol après chaque traction. Ayant mesuré d'abord la distance des deux traits A et B marqués sur la verge, on voit, après chaque traction, la longueur dont celle-ci a augmenté.

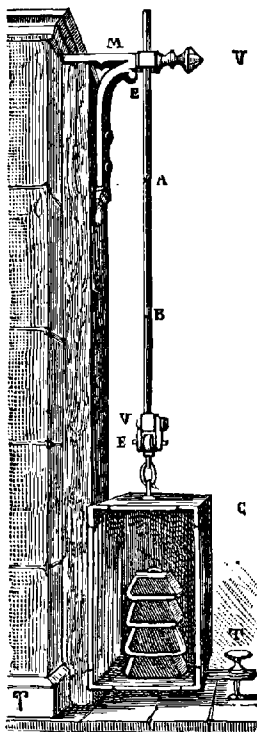


Fig. 16. — APPAREIL DE WERTHEIM pour mesurer l'élasticité de traction.

2° Pour l'*élasticité de flexion*, on se sert d'un rectangle ABCD en acier, par exemple (*fig. 17*), dont la lame supérieure AB est attachée à une crémaillère HK qui met en mouvement une roue dentée R, à laquelle est attachée une aiguille. Au milieu de la lame inférieure CD, libre, on accroche des poids. Aussitôt les deux lames plient, l'appareil prend la position A'B'C'D', et l'aiguille

marque la valeur de l'écart sur un arc de cercle MN divisé en millimètres.

3° Pour l'*élasticité de torsion*, dont les lois ont été déterminées par Coulomb (mort en 1806), on se sert d'un appareil appelé *balance de torsion*, composé d'un fil suspendu par une extrémité et tendu par un poids auquel est fixée une aiguille horizontale. Un cercle gradué, dont le centre correspond à l'extrémité verticale du fil, est placé au-dessous. Si l'aiguille dévie de la direction qu'elle a sur le cercle quand le fil tordu reprend en tournoyant la position verticale, l'angle formé est l'*angle de torsion*, et la force nécessaire pour obtenir cet angle est la *force de torsion*, et la limite d'élasticité est franchie. Coulomb résuma ses observations sur l'élasticité

de torsion en quatre lois : 1° les oscillations d'un fil tordu reprenant sa situation normale sont égales; 2° en un même fil, l'angle de torsion est proportionnel à la force de torsion; 3° avec une même force de torsion et pour des fils de même diamètre, l'angle de torsion est proportionnel à la longueur des fils; 4° avec une même force et une même longueur des fils, l'angle de torsion est inversement proportionnel à la quatrième puissance de leurs diamètres.

Des expériences ci-dessus ont été tirés également :

1° La formule pour trouver en mètres l'allongement d'une barre de métal :

$$a = \frac{P \times l}{s} \times \frac{1}{q};$$

c'est-à-dire que l'allongement  $a$  d'une verge de métal est (exprimé en mètres) égal au poids  $P$  (en kilogrammes) qui la tend, multiplié par sa longueur  $l$ , divisé par sa section  $s$  (exprimée en millimètres carrés) et multiplié par une quantité constante  $q$ , dépendant de la nature du corps et appelée *coefficient d'élasticité* ou *module d'élasticité de traction*. Cette quantité est

Acier fondu.....	19,561
Acier anglais.....	17,278
Fer.....	20,794
Cuivre.....	10,519
Plomb.....	1,727

2° La loi de l'élasticité de flexion : L'écart est proportionnel à la charge et au cube de la longueur; il est inversement proportionnel à la largeur de la lame et au cube de son épaisseur.

3° Enfin le *coefficient de rupture*, c'est-à-dire le nombre de kilogrammes nécessaire pour produire la rupture d'un fil d'un millimètre carré de section du métal considéré. Voici les coefficients de rupture de quelques métaux :

Fer forgé.....	40 kilogr.	Cuivre laminé.....	21 kilogr.
Fer dit ruban, très doux.....	45 —	Cuivre fondu.....	13,40
Fil de fer non recuit.....	60 —	Laiton.....	12,60
Fonte grise.....	13 —	Étain fondu.....	3,00
Acier.....	75 —	Zinc fondu.....	6,00
Bronze des canons.....	23 —	Plomb fondu.....	1,28

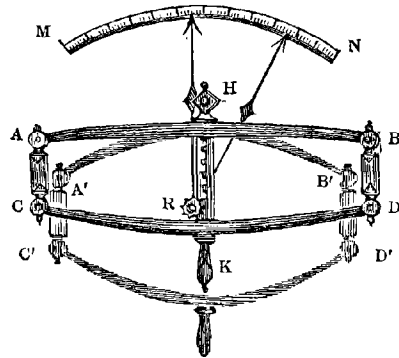


Fig. 17.  
ÉLASTICITÉ DE FLEXION.

C'est plus particulièrement à la résistance à la rupture par la traction que l'on a donné le nom de *ténacité*, car les corps peuvent se briser sous l'empire de diverses causes et principalement par le choc, la flexion, l'écrasement ou la traction, et leur résistance est loin d'être semblable dans les différents cas. Ainsi les corps les plus élastiques sont souvent ceux qui se brisent le plus facilement par le choc. La manière dont le corps est fixé, sa forme, sa position influent énormément sur sa résistance élastique. Si une tige d'acier n'est fixée que par une extrémité, elle casse plus tôt si l'effort a lieu à l'autre extrémité; mais si elle est supportée par les deux bouts, c'est au milieu que doit porter l'effort pour la briser. Si cette tige est encastrée par les deux bouts, elle résiste bien davantage que si elle est seulement posée; de là la nécessité de fixer solidement dans les murs les poutres des planchers. Un prisme carré a moins de résistance qu'un cylindre de même périmètre; dans les mêmes conditions de poids et de forme, un cylindre creux résiste bien plus qu'un cylindre plein. C'est pourquoi les os, qui sont creux, offrent pour leur poids le maximum de résistance. Des jongleurs mettent à profit cette propriété pour résister à des chevaux : ils se couchent sur une planche horizontale sur laquelle on sangle leurs jambes et leurs cuisses. Les traits des chevaux sont attachés à une ceinture placée au-dessus du bassin du patient, dont les pieds reposent sur un obstacle fixe; les chevaux en tirant horizontalement appuient le corps contre cet obstacle. Pour qu'ils pussent avancer, il faudrait qu'ils brisassent les os des jambes et des cuisses, effort presque impossible.

C'est encore en connaissant l'extrême *ténacité* du fer sollicité par un effort transversal que l'on a pu construire les ponts suspendus.

Ce fut vers 1820; on cherchait les moyens de traverser les rivières à peu de frais. Un jeune homme d'une illustre famille, le neveu de Montgolfier, Marc Séguin (1786-1861) [qui plus tard, par l'application de la chaudière tubulaire, créa en France la navigation à vapeur et la locomotive à grande vitesse], ayant fait de savantes recherches sur la résistance du fer, construisit le pont suspendu en fil de fer de Tournon (Ardèche). C'était une innovation aussi hardie, aussi ingénieuse qu'utile et avantageuse; ce pont ne coûta que 200,000 francs; un pont en pierre, à cette époque, eût coûté trois fois autant. Les ponts en fil de fer ont été le sujet d'une vive opposition; des accidents, causés par imprévoyance ou négligence, ont excité des craintes, quelque peu fondées. Le fer qu'il faut employer doit être fibreux, parce qu'il possède alors le maximum de résistance; malheureusement, au bout d'un certain temps, cette texture change pour faire place à une structure cristalline peu résistante. Cepen-

dant plus de 400 ponts suspendus existent sur différents points, et c'est encore un pont suspendu, d'une portée gigantesque, que les Américains ont construit pour le passage du chemin de fer au-dessus du Niagara.

Le même corps n'offre pas la même résistance dans tous les sens; le bois résiste surtout à un effort exercé dans la direction de ses fibres; les pierres, quand elles sont placées dans le même sens que dans la carrière.

Lorsqu'un métal a atteint sa limite d'élasticité, il arrive parfois qu'il ne se rompt pas, mais qu'il reste déformé; cette propriété de s'étirer ainsi sans se rompre s'appelle *ductilité*. On profite de cette propriété pour faire de ces métaux des fils dont l'usage est de chaque jour, de mille façons différentes. Dans la fabrication des épingles,

par exemple, la première opération est de *tréfiler* le fer afin de l'amener à l'état de fils assez fins pour fabriquer des épingles d'une grosseur voulue.

A cet effet (*fig. 18*), il passe dans des filières A, plaques d'acier fixées sur une table B, appelée *banc à filer*, et dont les trous, d'un diamètre décroissant, le font s'allonger et s'amincir graduellement jusqu'à la dimension voulue. Des engrenages mettent en mouvement des cylindres verticaux appelés *bobines*, autour desquels le fil s'enroule à mesure qu'il sort du trou de la filière. De temps à autre, on recuit le fil, c'est-à-dire on le chauffe au rouge pour l'empêcher de casser. On a pu obtenir ainsi des fils de platine d'un diamètre de  $\frac{1}{1400}$  de milli-

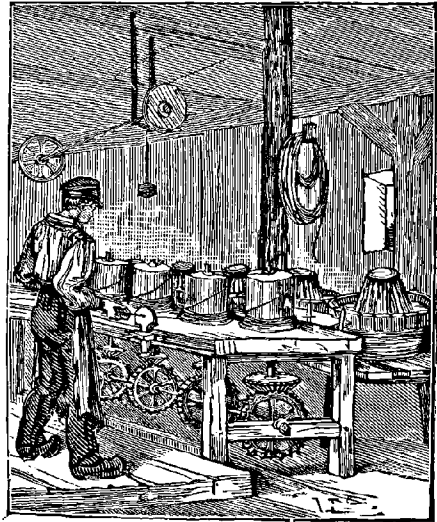


Fig. 18. — TRÉFILERIE.

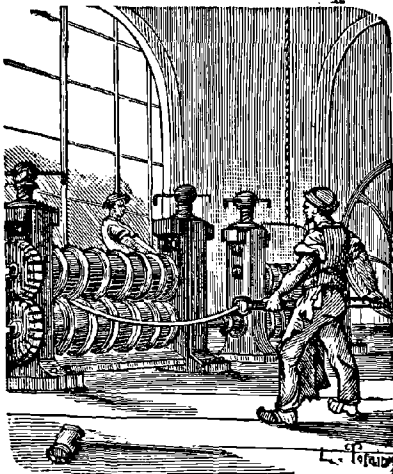


Fig. 19. — LAMINOIR.

mètre; leur ténuité est telle que l'on ne peut les voir directement, et que leur existence ne peut être constatée qu'à l'aide de phénomènes optiques tout particuliers dont nous parlerons plus loin.

On désigne sous le nom de *malléabilité* la propriété particulière à certains corps de pouvoir être réduits en feuilles par l'action du marteau ou du laminoir.

Le laminoir consiste surtout en deux cylindres d'acier tournant en sens contraire. La lame de métal, amincie par un bout, est introduite entre eux ; le mouvement l'entraîne, elle est écrasée (*fig. 19*).

Si l'on veut avoir des lames plus minces, on a recours au marteau.

Ainsi fait-on pour obtenir des feuilles d'or. Les batteurs d'or mettent des lames d'or, déjà rendues excessivement minces au laminoir, entre les feuilles d'un cahier fait de baudruche ; ce cahier est placé sur une enclume et frappé avec un lourd marteau. On est parvenu à faire ainsi des feuilles d'or si minces qu'il en faut dix mille superposées pour atteindre la hauteur d'un millimètre.

Voici le nom des principaux métaux par ordre de malléabilité :

AU LAMINOIR.	AU MARTEAU.	A LA FILIÈRE.
Or. Argent. Cuivre. Étain. Plomb. Zinc. Platine. Fer.	Plomb. Étain. Or. Zinc. Argent. Cuivre. Platine. Fer.	Platine. Argent. Fer. Cuivre. Or. Zinc. Étain. Plomb.

L'état dans lequel sont les corps quand ils ont ainsi dépassé, sans se rompre, leur limite d'élasticité est dit état d'*écrouissage*. On fait cesser cet état et l'on ramène le corps à son état normal en le faisant chauffer, puis en le refroidissant lentement. Ses molécules, que l'écrouissage avait placées dans un nouvel état d'équilibre, reprennent alors leur position

naturelle. Cette opération s'appelle le *recuit*.

Si ce refroidissement avait lieu brusquement, il en résulterait un autre état moléculaire anormal auquel on a donné le nom de *trempe*, état qui change énormément les qualités du corps. Ainsi l'acier, recuit à une forte chaleur, puis très lentement refroidi, est malléable, fibreux, ductile ; si on le chauffe jusqu'au voisinage de son point de fusion, puis qu'on le trempe brusquement dans l'eau froide, il devient cassant comme du verre ; s'il n'a été porté qu'au rouge cerise avant la trempe, il est moins cassant ; si, après l'avoir trempé, on le fait recuire de nouveau, il passe alors par des teintes successives ; pour les ressorts on recuit jusqu'à la couleur bleue, et alors l'élasticité de l'acier est la plus grande possible.

Ce phénomène était connu dès la plus haute antiquité. Homère, le plus ancien des poètes grecs, à propos du cyclope Polyphème, auquel Ulysse creva l'œil avec un pieu pointu, dit : « Et il se fit entendre un sifflement pareil à celui que produit une hache rougie au feu et trempée dans l'eau froide ; car c'est là ce qui donne au fer la force et la dureté. » Sophocle, quatre siècles avant J.-G., compare dans sa tragédie d'*Ajax* un homme dur

et entêté à du fer trempé. Moïse, dans le psaume II, Isaïe (XLVIII) parlent aussi, au figuré, de la dureté du fer trempé, et les Romains savaient que les aciers différaient entre eux d'après la trempe; les meilleurs provenaient de Bilbilis et de Turiaso (Saragosse), en Espagne.

L'un des plus remarquables effets de la trempe se produit quand on laisse tomber dans l'eau froide des gouttes de verre fondu : les molécules externes se solidifient avant celles de l'intérieur des gouttes, ce qui produit une distribution anormale de ces molécules (fig. 20). Les gouttes affectent alors une forme qui leur a fait donner le nom de *larmes bataviques* et jouissent d'une résistance étonnante au choc. On peut jeter violemment à terre cette petite poire de verre, la frapper à coups de marteau sans la briser. Mais si l'on vient à casser son extrémité pointue, tout l'édifice s'écroule avec détonation, et la petite masse de verre éclate en poudre fine.

C'est en partant de l'idée de tremper le verre à la façon des *larmes bataviques* qu'un homme de talent, M. de La Bastie, put trouver, après de longues et minutieuses études, l'invention, appelée à un grand avenir, du *verre incassable*, ou, pour parler plus exactement, du verre présentant une solidité incomparablement supérieure au verre non trempé et ne se brisant que s'il est heurté, comme les larmes bataviques, dans certaines conditions.

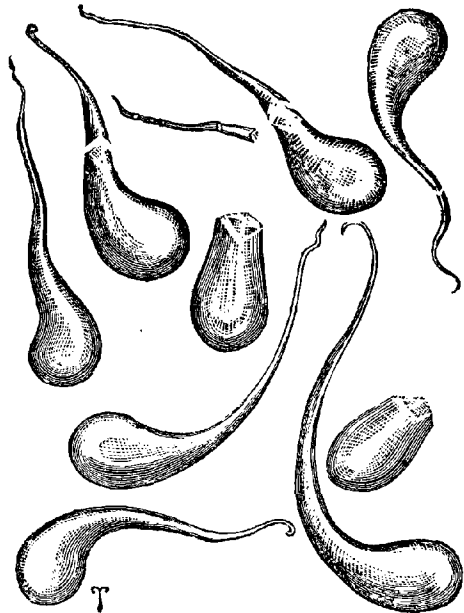


Fig. 20. — LARMES BATAVIQUES.

**6° DIVISIBILITÉ.** — On appelle de ce nom la propriété qu'ont tous les corps de pouvoir être séparés en parties distinctes. Cette division a été portée très loin en pratique; on est même fondé à dire qu'elle est infinie.

Nous avons donné des exemples de l'état de ténuité auquel on pouvait réduire certains corps lorsqu'ils avaient dépassé leur limite d'élasticité; nous avons cité des fils de platine si fins que l'on ne pouvait les distinguer à l'œil nu, des feuilles d'or si minces que la lumière les traversait. Pour les substances colorantes, la divisibilité est extrême, puisqu'un millimètre cube

d'indigo dissous dans de l'acide sulfurique colore en bleu dix litres d'eau. La diffusion des matières odorantes va jusqu'à une limite plus reculée encore : un grain de musc peut fournir pendant des années à l'air qui se renou-

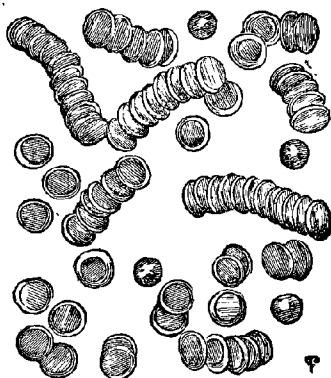


Fig. 21.

GLOBULES DU SANG DE L'HOMME.

velle autour de lui des particules en nombre suffisant pour lui communiquer son odeur. Une bulle de savon, à l'endroit où elle va crever et où apparaît un point noir, n'est épaisse que d'un cinquante-millième de millimètre. Les fils de l'araignée sont formés, comme nos câbles, de filaments tortillés dont le nombre atteint plus d'un millier. Le sang de l'homme doit sa belle couleur rouge à des globules appelées *hématies* qui sont en suspension dans un liquide jaune citron. Ils ont la forme de disques plats, excavés sur leurs deux faces, et dès qu'ils sont sortis de la veine,

on les voit se disposer en piles comme des pièces des monnaie; leur diamètre est de  $\frac{1}{125}$  de millimètre (*fig. 21*). Si l'on place un grain de sel marin sur une lame de verre et que l'on dépose sur lui une goutte d'eau,

peu à peu, à mesure que l'eau s'évapore, le grain de sel se divise en une infinité de cristaux appelés *trémies*, cubiques ou quelquefois excavés sur leurs faces, dans lesquels sont creusées des cavités en escalier (*fig. 22*). Enfin l'histoire des infusoires, ces animalcules microscopiques, dont la grosseur n'atteint pas, pour certains d'entre eux, la quinze-centième partie d'un millimètre, dont le poids est si faible qu'il en faut onze cent onze millions pour faire un gramme, qui cependant ont une organisation intérieure singulièrement compliquée, puisque quelques-uns possèdent jusqu'à quinze estomacs et plus encore; ces microzoaires, dont il est difficile de distinguer les détails de l'organisation, même avec les instruments les plus parfaits, que nous décrirons en leur lieu, tels que le microscope perfectionné par l'emploi des lentilles achromatiques, ces microzoaires montrent l'éton-



Fig. 22.

CRISTAUX DE SEL MARIN.



nante divisibilité de la matière et obligent à se souvenir de ce beau passage des *Pensées* de Pascal :

« Qu'est-ce qu'un homme dans l'infini? Qui peut le comprendre? Mais



PORTRAIT DE PASCAL

(Gravé par M. TRICHON, d'après une gravure du temps) [page 57].

pour lui présenter un autre prodige aussi étonnant, qu'il recherche, dans ce qu'il connaît, les choses les plus délicates; qu'un ciron, par exemple, lui offre, dans la petitesse de son corps, des parties incomparablement plus petites, des jambes avec des jointures, des veines dans ces jambes,

du sang dans ces veines, des humeurs dans ce sang, des gouttes dans ces humeurs. Que, divisant encore ces dernières choses, il épuise ses forces et ses conceptions, et que le dernier objet où il puisse arriver soit maintenant celui de notre discours : il pensera, peut-être, que c'est là l'extrême petitesse de la nature. Je veux lui peindre non seulement l'univers visible, mais encore tout ce qu'il est capable de concevoir, l'immensité de la nature dans l'enceinte de cet atome imperceptible. Qu'il y voie une infinité de mondes, dont chacun a son firmament, ses planètes, sa terre, en la même proportion que le monde visible; dans cette terre, des animaux, et enfin des cirons, dans lesquels il retrouvera ce que les premiers ont donné, trouvant encore dans les autres la même chose, sans fin et sans repos. »

Cependant cette division de la matière n'est pas physiquement absolue; quoique certains physiciens admettent la divisibilité indéfinie de la matière, le plus grand nombre acceptent comme limite dernière l'*atome*, indivisible, insécable, élément infiniment petit des plus petites particules corporelles. Nous verrons, en traitant de la chimie, qu'il existe des rapports invariables entre les poids des atomes des différents corps et qu'on a même pu déterminer la valeur numérique de ces rapports.

Les applications pratiques de la divisibilité sont de tous les jours; on l'obtient par divers procédés. Pour pulvériser l'étain, on place ce corps en fusion dans une boîte enduite de craie et l'on agite vivement; le métal se divise en fines gouttelettes qui se solidifient et forment de la poussière. La plombagine, les émeris, le minium, le vermillon, l'azur s'obtiennent en poudre impalpable par la *lévigation*; la substance broyée est jetée dans l'eau et l'on ne recueille que la poudre assez légère pour flotter à la surface du liquide. La médecine homéopathique emploie, dans la confection de ses doses, la matière divisée jusqu'à une limite prodigieusement reculée. Ainsi on prend, par exemple, 1 centigramme de médicament et on le mêle à 99 centigrammes d'une substance inerte, comme l'eau; on prend 1 centigramme de cette solution et on le mêle avec 99 centigrammes de la matière inerte, et ainsi de suite pendant un certain nombre de fois; les homéopathes vont quelquefois au delà de la trentième solution. La proportion du poids du médicament à celui du dissolvant est alors représentée par une fraction qui, ayant pour numérateur l'unité, aurait pour dénominateur l'unité suivie de 60 zéros; cela correspond à peu près à 1 millimètre cube de substance répartie dans une sphère qui aurait pour rayon 1,400 milliards de myriamètres.

7° **MOBILITÉ.** — La *mobilité* est la propriété que possèdent les corps de pouvoir occuper successivement différentes positions de l'espace, c'est-

à-dire d'être en *mouvement*. Vous levez ou abaissez votre bras, vous marchez ou vous courez; vous mettez même en *mouvement* votre voisin en le poussant; vous pouvez aussi mettre en *mouvement* les plantes en les agitant, en les coupant, en les façonnant; vous pouvez encore mettre en *mouvement* les corps bruts, si vous ramassez une pierre, si vous la lancez, si vous éparpillez une pelletée de terre. Tous les corps, animaux, végétaux ou minéraux, jouissent donc de cette propriété essentielle appelée *mobilité*.

Mais l'homme n'est pas seul à produire le *mouvement*, résultat de la *mobilité*. Quoique avec moins d'adresse, les animaux en font autant. Les végétaux, eux-mêmes, déploient des bourgeons, étalent des fleurs, remuent, vont, avec leurs racines, puiser dans la terre leur nourriture et, conséquemment, mettent aussi en mouvement les sucs dont ils se nourrissent. La terre, également, jouit des mêmes facultés; ses organes sont continuellement en mouvement : la pluie, les vents, les tempêtes le montrent avec évidence. Les volcans et les tremblements de terre, — entre mille autres causes que nous étudierons tour à tour plus loin, — prouvent non seulement qu'elle s'agite, mais encore qu'elle agit puissamment sur nous.

Les astres aussi, évidemment encore, jouissent de la propriété de *mobilité* commune à tous les corps et de la faculté de mettre en mouvement d'autres corps. Qui n'a vu des pommes de terre, placées dans une cave pendant l'hiver, germer et pousser de longs filaments du côté du soupirail où passe un rayon de lumière? Qui ne sait que ces grands mouvements de la mer appelés *marées* sont dus à l'action du soleil et de la lune?

Le *mouvement*, résultat de la *mobilité*, peut donc être défini : l'état d'un corps qui change de position. Il est opposé au *repos*, état d'un corps qui reste dans le même lieu de l'espace. Nous ne pouvons constater ce changement de position qu'en prenant des points de repère; les sinuosités de la route, par exemple, ou les arbres qui la bordent serviront à étudier les mouvements d'un voyageur. Quelquefois notre propre corps nous sert de point de repère pour reconnaître le mouvement des corps qui sont dans le voisinage.

On désigne sous le nom de *mouvement absolu* celui que l'on suppose s'effectuer par rapport à un point *fixe* de l'espace, et sous le nom de *repos absolu* l'absence absolue de mouvement.

Ni l'un ni l'autre n'existent cependant dans le système du monde. « En dépit de certaines apparences, tout dans le ciel est toujours en mouvement. La science ne reconnaît plus d'étoiles fixes; un grand nombre de ces

étoiles que l'on croyait uniques se sont résolues en groupes de deux, trois ou quatre astres formant des systèmes particuliers qui ont certainement leurs révolutions périodiques. A ne parler que du soleil et de son cortège, il est démontré que, malgré sa puissance et sa majesté, le roi de notre monde n'a point le privilège de mouvoir sans être mû. Il ne lui est point permis de se reposer dans une orgueilleuse inertie; sa loi, comme la nôtre, est de tourner. Lui-même il roule autour du centre de gravité du système qui n'est pas en lui, mais seulement près de lui. La rotation autour de ce pivot invisible s'effectue en vingt-cinq jours. Il y a plus encore : le soleil, avec tous ses sujets, est emporté par un mouvement très lent, mais continu, dans la direction de la constellation d'Hercule. Mais de même qu'en se maintenant il maintient, de même aussi en se mouvant il meut. Sans cesse il fait, défait, refait l'instable équilibre des masses sur lesquelles il règne (1). »

De même, tous les corps qui se trouvent sur la surface de la terre sont animés d'un mouvement de rotation autour de la ligne des pôles. Il n'y a donc, réellement, ni mouvement absolu ni repos absolu, mais seulement *mouvement relatif*, *repos relatif*, que l'on peut ainsi définir :

Le *mouvement relatif* est celui d'un corps qui se déplace par rapport à un autre corps qui est lui-même en mouvement. Le *repos relatif* est celui d'un corps qui conserve la même position par rapport à un autre corps qui se meut.

Tout mouvement relatif peut être envisagé de deux façons : ou comme un mouvement du premier corps dans un certain sens, ou comme un mouvement du second en sens contraire. Ainsi quand, en wagon, vous êtes arrêté à une station, à côté d'un autre train, si l'un des deux seulement se met en marche, vous ne savez d'abord si c'est votre train qui avance ou bien celui qui est près du vôtre.

8° **INERTIE.** — L'*inertie* est une propriété négative. C'est l'impuissance dans laquelle se trouve un corps de changer *par lui-même* son état de repos en état de mouvement ou son état de mouvement en état de repos ni de modifier la nature de son mouvement quand il en a un; de détruire *par lui-même*, en un mot, l'état dans lequel il est.

Toute cause susceptible de faire sortir un corps de son état de repos, ou de modifier son mouvement, s'appelle une *force*.

La persévérance dans le repos se manifeste à l'observation la plus superficielle. Pour mettre en mouvement un wagon, par exemple, même

(1) CH. LÉVÊQUE, *Les Harmonies providentielles*.

sur des rails bien unis, il faut une force assez considérable, parce que sa force d'inertie est proportionnelle à son poids; mais une fois le mouvement commencé, la force à déployer est bien moindre, parce qu'on n'a plus à vaincre que la force d'inertie de l'air, des grains de sable, etc. C'est par cette raison que les chevaux d'omnibus, à Paris, sont promptement usés, parce que, s'arrêtant souvent, ils prennent à chaque arrêt beaucoup de peine pour remettre la voiture en marche.

La persévérance dans le mouvement exige une étude plus attentive des faits pour être conçue avec netteté. Ainsi une boule roulant à terre roulerait éternellement si elle n'éprouvait pas, de la part de l'air, une résistance due au déplacement successif des particules de ce fluide, et de la part de la terre une résistance due à la force d'inertie, à la persévérance dans le repos des grains de sable qu'elle a rencontrés. C'est pourquoi la terre et les planètes tournent autour du soleil sans que jamais leur mouvement s'arrête ou se ralentisse; elles ne rencontrent rien qui s'y oppose, les espaces célestes dans lesquels elles cheminent étant vides, ou plutôt remplis de quelque fluide si peu résistant qu'on peut ne point considérer sa force d'inertie. Un pendule placé dans le vide, et dont on a atténué, par des moyens convenables, le frottement au point de suspension, oscillera sinon toujours, au moins incomparablement plus longtemps que dans l'air.

C'est à cette persévérance dans le mouvement que sont dus les effets qui se produisent lorsqu'un convoi de chemin de fer éprouve un arrêt brusque : les voyageurs sont projetés dans le sens du mouvement, qu'ils continuent quand l'arrêt a eu lieu, en vertu de la vitesse acquise. C'est pourquoi l'idée d'un frein assez puissant pour arrêter tout à coup un convoi en marche est absurde, parce que les effets d'un arrêt subit seraient aussi désastreux que ceux du choc avec un autre convoi que l'on voudrait éviter.

C'est encore en conséquence de l'inertie qu'un vase plein de liquide, déplacé brusquement, déverse en arrière son contenu, qui tendait à rester en repos. De même, il faut lui attribuer les chutes, souvent si graves, qui ont lieu quand on descend d'une voiture et, à plus forte raison, d'un convoi en marche. Le corps, en effet, possède un mouvement en avant, et les pieds étant réduits à l'immobilité, la tête continue à se mouvoir et se trouve ainsi lancée sur le sol. C'est pourquoi, quand on veut sauter d'un endroit élevé, il faut avoir soin de fléchir sur les jambes, de s'affaisser sur soi-même en arrivant au sol, afin de ne pas arrêter brusquement le mouvement imprimé d'abord au corps.

On utilise journellement cette propriété des corps pour emmancher

un balai, un marteau, etc., en frappant l'extrémité du manche contre le sol : l'outil, au moment du choc, prend un mouvement, continue à marcher malgré le choc, en vertu de la vitesse acquise, et finit par s'enfoncer complètement.

On a tiré, dans l'application, un très bon parti de cette *inertie* par

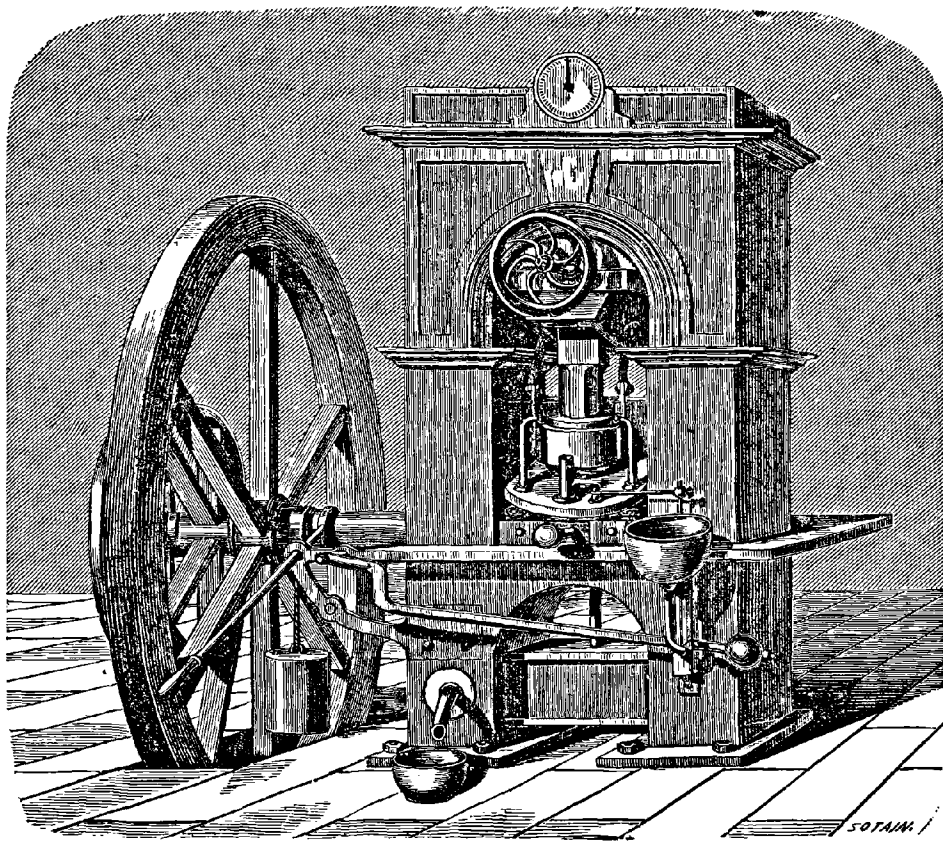


Fig. 23. — VOLANT.

l'invention des *volants*. On appelle de ce nom (*fig. 23*) une roue dont les bras sont très légers et dont les jantes, ordinairement en fonte, sont au contraire très lourdes. Il y a des machines qui quelquefois doivent marcher à vide, ne travaillent pas, les laminoirs avec lesquels on comprime le fer pour le réduire en barres, par exemple. Dans ces moments de chômage, la force qui fait mouvoir ces machines, vapeur, eau, manivelle, etc., est employée à faire tourner le volant qui se trouve sur l'axe même des cylindres et qui pèse quelquefois jusqu'à 20,000 kilogrammes et fait 100 tours par minute.

Lorsqu'on présente ensuite aux cylindres le fer sortant des fours, comme sa résistance à la compression est très grande, elle pourrait bien arrêter net la machine; mais, pour cela, il faudrait arrêter aussi le volant, et on comprend quelle force il faudrait pour arrêter une masse si lourde, animée d'une si grande vitesse et dont la force d'inertie est énorme. Les cylindres continueront donc de tourner, et le fer, que la force seule de la machine n'aurait pas suffi à laminier, se trouve converti en barres, grâce au secours du volant.

De plus, les volants servent, dans quelques occasions, à régulariser l'action de la force elle-même. Lorsqu'un ouvrier, par exemple, fait tourner une roue au moyen d'une manivelle, son action varie suivant la position de son corps, et le mouvement de la machine conduite par cette roue serait irrégulier sans le volant. En effet, quand l'effort de l'homme est moins puissant, la roue se ralentirait si elle pouvait ralentir la marche du volant, chose impossible, car l'inertie de celui-ci s'oppose à ce ralentissement, et la machine continue à marcher avec la même vitesse.

## CHAPITRE III

### DES FORCES ET DES MOUVEMENTS

**DÉFINITIONS.** — Nous avons désigné sous le nom de *Force à toute cause susceptible de faire sortir un corps de son état de repos ou de modifier son mouvement.* »

L'origine et l'essence des *forces* ont toujours exercé la sagacité des penseurs, et, de nos jours, les controverses les plus vives et les plus passionnées semblent renaître sur ces questions. Il ne nous appartient pas d'examiner ici les diverses hypothèses qui ont été émises sur ce sujet et qui sont proprement du domaine de la philosophie et de la métaphysique; nous ne voulons considérer les *forces* que dans les effets qu'elles produisent.

Il est évident que, les forces n'étant autre chose que l'activité des êtres, nous ne pouvons pas plus créer une force que créer un être; mais nous pouvons augmenter l'énergie de quelques-unes de celles qui existent en les alimentant. Ainsi j'augmente les forces de mon cheval en lui don-

nant de l'avoine. Nous pouvons encore les utiliser, c'est-à-dire les ajouter aux nôtres, en les faisant servir à notre usage.

Les forces dont il nous est possible d'augmenter l'énergie se nomment *forces musculaires* quand il s'agit de forces animales; quand il s'agit de celles qui sont plus spécialement propres au globe terrestre, on les appelle *forces chimiques*. Celles que nous sommes forcés de prendre telles qu'elles sont pour nous en servir, la pesanteur, par exemple, la force électrique, la force calorique, etc., sont les *forces physiques*.

On désigne sous le nom de *machines* les moyens que l'homme emploie pour utiliser les forces musculaires, physiques ou chimiques. L'étude des lois qui président à la construction de ces machines est plus spécialement du ressort d'une branche de la Physique générale, appelée *Mécanique*. Toutefois, il est quelques propositions fondamentales qu'il importe d'énoncer ici.

Une force peut être *instantanée* ou *constante*. Elle est dite *instantanée* lorsqu'elle agit sur le mobile pendant un temps très court, comme il arrive dans un choc, dans l'explosion de la poudre, etc.; elle est dite *constante* lorsqu'elle continue d'agir pendant toute la durée du mouvement, telle, par exemple, que la force de la pesanteur, celle d'une locomotive qui fait marcher un train, etc.

Il y a trois choses à considérer essentiellement dans une force : 1° Son *point d'application*, c'est-à-dire le point du corps sur lequel elle agit immédiatement; 2° Sa *direction*, c'est-à-dire la direction dans laquelle elle tend à entraîner ou à pousser le corps; 3° Son *intensité*, c'est-à-dire la puissance avec laquelle elle agira sur le corps, puissance évidemment variable selon les cas et qui se manifestera, par exemple, par une plus grande vitesse dans le mouvement.

**LOIS RELATIVES AUX FORCES.** — I. *Quand deux ou plusieurs forces sollicitent un corps en sens contraires, elles se détruisent mutuellement, et le corps est dit en ÉQUILIBRE.*

Cela est évident : si deux chevaux d'égale force tirent une charrette, l'un pour la faire avancer, l'autre pour la faire reculer, la charrette ne bougera point.

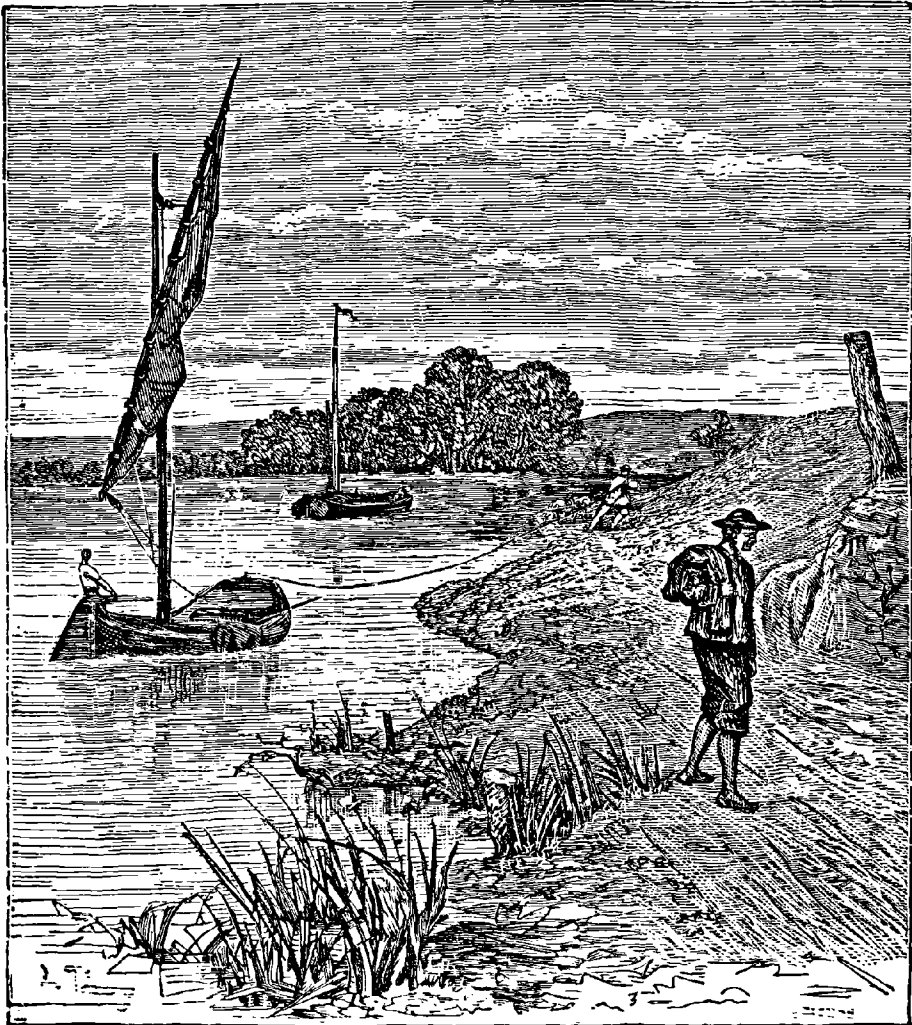
II. — 1° *Quand deux forces agissent dans le même sens et suivant une même ligne droite, leur RÉSULTANTE, c'est-à-dire la force unique capable de produire le même effet que ces forces combinées et, par suite, de les remplacer, est égale à leur somme.*

2° *Si elles agissent en sens opposé, leur résultante est égale à leur*



différence, et sa direction est dans le sens de la plus grande des deux forces COMPOSANTES.

3° Si elles agissent dans des directions opposées en formant un angle,



Résultante de deux forces opposées (page 66).

leur résultante est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les deux lignes qui représentent ces forces.

Les deux premières propositions n'ont pas à être démontrées; elles

apparaissent clairement seulement à les énoncer. La dernière est rendue sensible expérimentalement à l'aide de l'appareil de 'S Gravesande (*fig. 24*).

Cet appareil se compose d'un parallélogramme ABCD, articulé à ses sommets. Deux fils attachés en B et en C passent sur des poulies de renvoi M et N, supportant à leurs extrémités des poids P et P' de 90 et 60 grammes. Les longueurs de AB et AC sont elles-mêmes proportion-

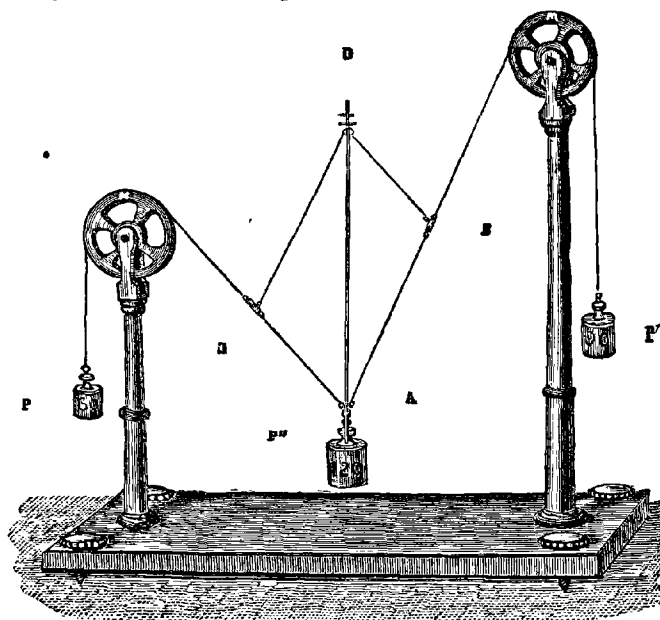


Fig. 24. — APPAREIL DE 'S GRAVESANDE.

nelles aux nombres 90 et 60. Au sommet A, on suspend un poids P'' égal à 120 grammes ; le parallélogramme est alors en équilibre. On constate, de plus, que les fils fixés en B et en C sont sur le prolongement exact des côtés AB et AC, et qu'une tige verticale fixée en A se trouve précisément concorder avec la diagonale du parallélogramme. De là

il suit que les forces P et P' ont une résistance verticale dirigée suivant la diagonale AD, égale et opposée d'ailleurs à la force P''. Mais cette dernière a pour valeur 120 grammes, et la longueur AD, mesurée à la même échelle que AB et AC, se trouve précisément égale à 120 ; la résultante est donc exactement égale à la diagonale du parallélogramme construit sur les grandeurs des forces composantes.

Quelques exemples feront mieux comprendre peut-être cette proposition fondamentale.

Sur un chemin de halage, un homme tire un bateau pour lui faire remonter une rivière. Le bateau, sollicité par la corde de l'homme, tend à quitter le milieu de l'eau et à se diriger vers le bord. Mais le gouvernail, tourné vers la rive opposée, sollicité par la résistance de l'eau, à laquelle il présente une surface plus grande d'un côté du bateau, dirige celui-ci vers cette rive et le force à prendre la direction de la résultante

des deux forces contraires qui le poussent, c'est-à-dire celle d'une droite partageant l'angle formé par ces deux forces obliques; en un mot, il suit le milieu de la rivière.

Il va sans dire que, le courant ayant une force variable, et qu'aussi l'homme ne tirant pas toujours sa corde avec une force égale, il est nécessaire que le marinier soit toujours à la barre pour rétablir constamment l'équilibre.

C'est en appliquant machinalement ce principe de Mécanique que l'on descend sans accident d'une voiture en marche. L'instinct indique que la résultante de deux forces directrices différentes tend à vous faire tomber du côté vers lequel se dirige la voiture, et l'on n'évite une chute, quelquefois très dangereuse, qu'en s'efforçant de tomber du côté opposé. On ne tombe pas; on est, au contraire, redressé, et l'on se trouve, en touchant le sol, dans une position normale.

C'est encore par la connaissance de ce principe que les marins se dirigent vers un point malgré le vent qui, venant de cette direction, les repousse. Ils orientent leurs voiles et tournent leur gouvernail de manière à opposer au vent une nouvelle force, et ils avancent suivant la direction de la résultante de cette nouvelle force et de la force du vent, en allant tantôt à droite, tantôt à gauche, en *courant des bordées*, selon l'expression maritime.

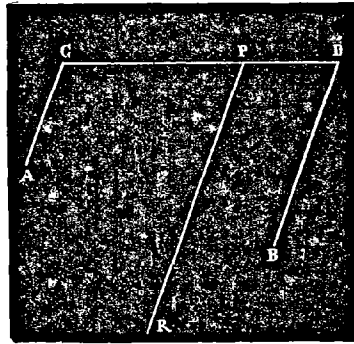


Fig. 25.

III. — *Quand deux forces parallèles agissent dans le même sens aux extrémités d'une droite inflexible, leur résultante est égale à leur somme, parallèle à leur direction, et son point d'application divise la droite en deux parties inversement proportionnelles aux deux forces.*

Soient les deux forces parallèles A, B (*fig. 25*) appliquées aux extrémités d'une droite CD; leur résultante R, égale à leur somme, divisera la droite CD au point d'application P, de manière à donner la proportion :

$$PD : PG :: CA : DB.$$

C'est dire que, si les deux forces A et B sont égales, le point P sera au milieu de CD; si la force B est double de la force A, le segment CP devra être double de PD.

On vérifie expérimentalement cette proposition au moyen de l'appar-

reil appelé *levier arithmétique* (fig. 26), qui se compose d'une barre AB suspendue par son milieu O à un fil qui, passant sur la poulie de renvoi M, soutient un poids P'. En plaçant les deux poids P égaux à chaque extré-

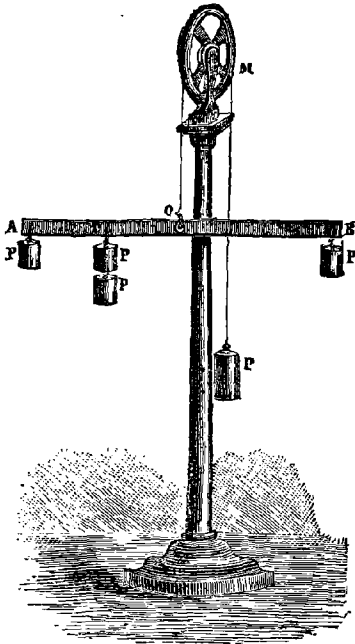


Fig. 26.

LEVIER ARITHMÉTIQUE.

mité de la barre, on constate que leur résultante P' est égale à la somme des poids P et qu'elle a la même direction. Si l'on place un seul poids P à l'une des deux extrémités B de la barre, tandis que deux poids P égaux sont placés au milieu C de la seconde moitié du levier, on constate qu'il y a encore équilibre. La résultante passe donc évidemment au point de suspension O, qui se trouve précisément à une distance de B double de celle qui la sépare de C.

IV. — *Si les deux forces parallèles sont inégales et agissent en sens contraire, leur résultante sera égale à leur différence, parallèle à leur direction et agira dans le sens de la plus grande force. Le point d'application de cette résultante sera sur le prolongement de la droite qui unit les deux forces parallèles et placé de manière que les distances à leurs points d'application*

*soient en raison inverse de leurs intensités respectives.*

Soient les deux forces parallèles A et B (fig. 27) agissant en sens contraire sur la droite CD. Leur résultante R, égale à leur différence, s'appliquera au point H de la ligne CD prolongée, de manière à donner cette proportion :

$$DH : CH :: CA : BD.$$

*Remarque.*— Si les forces parallèles opposées diffèrent très peu l'une de l'autre, on voit, par la proposition précédente, que la résultante a une valeur très petite; mais son point d'application s'éloigne beaucoup.

Si les forces sont égales, leur résultante est évidemment nulle; elles forment alors ce qu'on appelle un *couple*. Il n'est pas de force qui puisse leur faire équilibre ni les rempla-

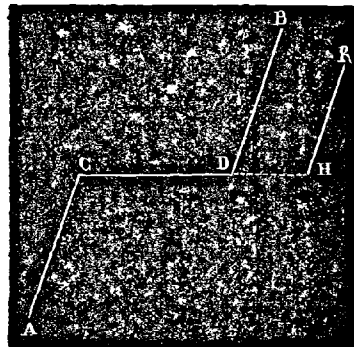


Fig. 27.

cer; mais on conçoit qu'elles ont pour effet d'imprimer un mouvement de rotation autour d'un point fixe au corps auquel elles sont appliquées. Or, comme dans la nature nous voyons tous les corps posséder à la fois un mouvement de translation et un mouvement de rotation, on peut admettre que la translation est produite par une *force* et la rotation par un *couple*. Le couple est donc une sorte d'*élément naturel* en Mécanique, susceptible d'apporter de grandes simplifications dans l'étude de cette science.

V. — *Lorsque plusieurs forces parallèles, agissant dans le même sens, sont appliquées aux différents points d'un même corps, leur résultante générale est égale à leur somme, et son point d'application s'obtient en composant les deux premières forces, puis leur résultante avec la troisième, et ainsi de suite.*

Soient les trois forces parallèles P, Q, M agissant sur un corps quelconque (fig. 28). La résultante des deux forces P et Q est, d'après la proposition précédente :

$$aB : aA :: AP : BQ.$$

Joignant par la droite *aD* le point d'application *a* de cette première résultante *r* au point d'application D de la troisième force M, j'ai encore :

$$CD : Ca :: ar : DM;$$

ce qui me donne le point d'application G de la résultante générale.

On voit que, si, en conservant à ces trois forces leur parallélisme et leurs intensités propres, on change seulement leur direction, les rapports indiqués restent les mêmes, et conséquemment la résultante passe invariablement par le même point. C'est ce point que l'on nomme *centre des forces parallèles*, et *centre de gravité* quand il s'agit de la pesanteur.

**DES MOUVEMENTS.** — On dit qu'un mouvement est *rectiligne* quand le corps, sollicité par une force, suit son chemin en ligne droite; il est *curviligne* quand sa marche décrit une courbe.

On appelle *trajectoire* le lieu des positions que ce point a successivement occupées dans sa course en ligne droite ou en ligne courbe.

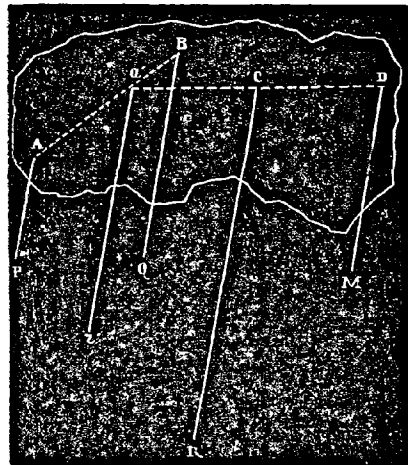


Fig. 28.

Un mouvement est *uniforme* quand le mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux. Ainsi une voiture qui fait régulièrement 10 kilomètres à l'heure marche d'un mouvement uniforme. Lorsque les chemins parcourus par un mobile dans des intervalles de temps égaux entre eux ne sont pas égaux, le mouvement est dit *varié*. C'est ce qui arrive pour un convoi de wagons quand on veut l'arrêter ou quand il se remet en marche.

On ne considère, en Physique, que le mouvement *uniforme* et le mouvement *uniformément varié*.

La *vitesse* est l'espace que parcourt un corps dans l'unité de temps qui est la seconde, ou dans l'unité de longueur qui est le mètre ou le kilomètre. Par exemple, on dit indifféremment que la vitesse d'un convoi, sur une voie ferrée, est de 10 mètres par seconde ou de 36 kilomètres par heure.

Très rarement, un mouvement est rigoureusement uniforme; mais, pour plus de commodité, on substitue souvent à un mouvement qui n'est pas trop varié un mouvement fictif uniforme de même durée. La vitesse de ce mouvement est la *vitesse moyenne*. Ainsi, un convoi de wagons a parcouru 144 kilomètres en quatre heures. Certes, son mouvement n'a pas été uniforme; néanmoins l'on dira, en prenant la moyenne, que ce convoi fait 36 kilomètres à l'heure, ou 10 mètres par seconde.

La vitesse moyenne d'un homme est généralement, sur un terrain horizontal, de 1<sup>m</sup>,50 par seconde ou 5<sup>km</sup>,4 par heure. La plus grande vitesse des convois sur un chemin de fer est de 25 mètres par seconde ou 90 kilomètres à l'heure. La terre, dans son orbite, a une vitesse de 37<sup>km</sup>,705 par seconde.

Le mouvement *uniformément varié* est celui dans lequel la vitesse du mobile augmente ou diminue suivant une loi constante. S'il parcourt des espaces de plus en plus considérables, son mouvement est *accélééré*; si les espaces parcourus sont de plus en plus petits, le mouvement est *retardé*. Il est toujours le résultat d'une force constante qui agit sur le mobile pendant toute la durée du mouvement, soit pour accélérer, soit pour retarder sa vitesse.

**LOIS RELATIVES AUX MOUVEMENTS.** — Le mouvement uniformément varié est soumis à deux lois fondamentales : 1° *La vitesse croît ou décroît proportionnellement au temps mis à l'acquérir*; 2° *Les espaces parcourus par un corps animé d'un mouvement accéléré sont proportionnels aux carrés des temps mis à les parcourir*.

La vérité de la première de ces lois nous apparaît clairement si, par exemple, nous descendons en courant un chemin en pente. Notre pesan-

teur, qui est une *force constante* agissant continuellement sur nous, accélère notre marche, au point qu'au bout de quelques instants, entraînés malgré nous, nous ne pouvons plus nous arrêter. Or, supposons que notre vitesse, laquelle était nulle au début, soit devenue au bout d'un certain temps capable de nous faire parcourir 2 mètres dans un autre espace de temps égal au premier. Puisque notre vitesse, par une accélération régulière, est devenue de 0 mètre égale à 2 mètres et se continuerait ainsi si l'on supprimait la force accélératrice, c'est absolument comme si elle était égale à 1 mètre dans le premier laps de temps tout entier, pour être animée d'une vitesse de 2 mètres dans le second laps de temps. Mais la force accélératrice agit pendant cette seconde unité de temps, comme elle a agi dans la première, et nous fait parcourir 1 mètre; nous parcourons donc  $2^m + 1^m = 3$  mètres dans cette seconde unité de temps. D'autre part, nous conserverons la vitesse de 2 mètres acquise et nous recevrons de la force accélératrice, comme dans la première unité de temps, une nouvelle vitesse qui arrivera à être de 2 mètres. Notre vitesse au bout de la seconde unité de temps sera donc de 4 mètres, et ainsi de suite. La vitesse acquise au bout de 3 unités de temps est de 6 mètres; au bout d'un temps triple, de 9 unités de temps, elle sera triple, c'est-à-dire de 18 mètres.

Résumons ces explications dans ce petit tableau :

2° — *Les espaces parcourus*, avons-nous dit, *sont proportionnels au carré de l'unité de temps mis à les parcourir*; c'est dire qu'en supposant, par exemple, qu'un corps a mis 3 secondes pour parcourir 1 mètre en 1 minute, ou 20 fois 3 secondes, ce corps aura parcouru  $20 \times 20 = 400$  mètres. Un coup d'œil sur le tableau ci-contre montre, en effet, que cet espace se composera de  $1^m + 3^m + 5^m + 7^m + 9^m + 11^m + 13^m \dots$  etc., = 400 mètres.

UNITÉ de temps	VITESSE acquise à la fin de chaque unité de temps.	ESPACES parcourus dans chaque unité de temps.
1 <sup>e</sup> .....	2 mètres.	1 mètre.
2 <sup>e</sup> .....	4 —	3 —
3 <sup>e</sup> .....	6 —	5 —
4 <sup>e</sup> .....	8 —	7 —
5 <sup>e</sup> .....	10 —	9 —
6 <sup>e</sup> .....	12 —	11 —
7 <sup>e</sup> .....	14 —	13 —
8 <sup>e</sup> .....	16 —	15 —
9 <sup>e</sup> .....	18 —	17 —
10 <sup>e</sup> .....	20 —	19 —

Ces deux lois établies, on peut, par de simples opérations arithmétiques, étant connue l'une de ces trois choses, le temps écoulé, la vitesse acquise ou l'espace parcouru, trouver immédiatement les deux autres.

*Le temps écoulé étant connu*, la vitesse  $V$  sera le produit du chiffre qui exprime ce temps  $T$  multiplié par le chiffre  $v$ , qui exprime la vitesse acquise au bout de la première unité de temps :

$$V = T \times v; (1)$$

et l'espace parcouru  $E$  sera le chiffre qui exprime le temps écoulé connu  $T$

multiplié par lui-même et ce produit multiplié par le nombre exprimant l'espace parcouru pendant la première unité de temps  $e$  :

$$E = T \times T \times e = T^2 \times e. (2)$$

*La vitesse acquise étant connue*, pour connaître le temps  $T$  depuis lequel le corps est en mouvement, il faut diviser le chiffre qui exprime cette vitesse  $v$  acquise au bout de la première unité de temps :

$$T = \frac{V}{v}; (3)$$

et l'espace parcouru sera, comme dans l'égalité précédente :

$$E = T^2 \times e. (4)$$

*L'espace parcouru  $E$  étant connu*, pour connaître le temps  $T$  mis à le parcourir, il faut diviser le nombre  $E$  exprimant cet espace par celui exprimant l'espace parcouru pendant la première unité de temps  $e$  et extraire la racine carrée de ce quotient :

$$T = \sqrt{\frac{E}{e}}; (5)$$

et pour avoir la vitesse  $V$  acquise par le corps, nous cherchons le temps  $T$ , et, d'après les formules précédentes, nous trouvons :

$$V = \sqrt{\frac{E}{e}} \times v$$

$$V = T \times v. (6)$$

Un exemple fera parfaitement saisir l'application et les conséquences de ces formules.

Nous établissons d'abord, pour plus de clarté, que l'on prend pour unité de temps la *seconde*, et (chose que nous démontrerons plus tard) que, lorsque l'accélération est due à la pesanteur, les corps parcourent 4<sup>m</sup>,904 pendant la première seconde de leur chute. Nous voulons mesurer la profondeur d'un puits. Nous y jetons une pierre; le bruit qu'elle fait nous apprend le moment où elle touche le fond. Au moyen d'une montre marquant les secondes, nous mesurons le temps qu'elle a mis à descendre, soit 6 secondes. Connaissant le temps écoulé, nous appliquons la formule (2)  $E = T^2 \times e$ , et nous avons l'espace parcouru, c'est-à-dire la profondeur cherchée :

$$E = 6 \times 6 \times 4,904 = 176^m,544.$$



**MESURE DES FORCES.** — Les forces, c'est-à-dire, d'après la définition que nous avons donnée, *toute cause susceptible de faire sortir un corps de son état de repos ou de modifier son mouvement*, sont évidemment plus ou



Le chemin de fer russe dans les jardins de Tivoli  
(gravé par M. TRICHON, d'après une gravure du temps) [page 77].

moins grandes et conséquemment susceptibles d'être mesurées; mais, comme une force n'est que la *cause* d'un mouvement, on ne peut mesurer cette cause que par l'effet produit.

Or, ces effets produits sont de différentes sortes.

PHYS. ET CHIM. POPUL.

Liv. 10.

Une machine soulève un poids de 1,000 kilogrammes, une autre soulève seulement 500 kilogrammes ; est-elle plus puissante ? Peut-être. Si nous ajoutons que la première n'élève son poids de 1,000 kilogrammes qu'à 1 mètre de hauteur et que la seconde élève ses 500 kilogrammes à 10 mètres, n'est-il pas clair que la seconde est plus puissante ? Il faut donc considérer, avant de se prononcer, non seulement le poids soulevé, mais la hauteur ou la distance à laquelle ce poids a été transporté ou élevé.

Deux machines élèvent à une même hauteur des poids égaux ; ont-elles même puissance ? Nous ne pouvons répondre, à moins que l'on nous dise si l'une et l'autre mettent des temps égaux pour faire ce travail. Nous devons encore considérer le temps employé à produire le travail.

La résistance vaincue, l'espace parcouru, le temps mis à le parcourir sont donc les trois choses qu'il faut considérer pour se rendre compte de la grandeur d'une force, ou, selon l'expression consacrée, de sa *puissance*. Or, ces trois choses peuvent se résumer, au point de vue de l'application, en une seule : le travail obtenu.

C'est pourquoi, pour évaluer la puissance d'une machine, son travail, on a pris pour unité le *kilogrammètre* ou *dynamie*, correspondant au poids de 1 kilogramme (*résistance vaincue*) élevé à 1 mètre de hauteur (*espace parcouru*) en une seconde (*temps*).

Quelquefois, au lieu du kilogrammètre, on prend pour unité de mesure le *cheval-vapeur*, qui représente 75 kilogrammètres, c'est-à-dire la force nécessaire pour élever 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en une seconde.

Ce nom de *cheval-vapeur* vient de ce que, dans les mines de charbon, quand on se servit d'abord des machines à vapeur, on désigna sous le nom de machine de 10, de 20 chevaux celles qui faisaient l'ouvrage exigeant jusqu'alors l'emploi de 10 ou 20 chevaux. Or, un cheval vigoureux élève environ 75 kilogrammes de charbon à 1 mètre de hauteur en une seconde.

Une machine de 40 chevaux est donc une machine qui serait capable d'élever 75 kilogr.  $\times$  40 = 3,000 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en une seconde, ou, pour généraliser, qui pourrait élever en une seconde un poids P de kilogrammes à une hauteur H telle que le produit  $P \times H = 3,000$  kilogrammes. Nous voulons ainsi dire que les valeurs de H et de P peuvent être variables. Ainsi P peut représenter 300 kilogr. si H en compensation représente 10 mètres :  $P \times H = 3,000$  kilogr. ;  $300 \times 10 = 3,000$ . De même, ce sera encore une machine de 40 chevaux

celle qui élèverait  $60 P \times H$  en une minute :  $3,000 \times 60 = 180,000$  kilogrammes à 1 mètre de hauteur.

De cette possibilité évidente que l'effet produit par une force est à la fois puissance et vitesse, et de ce que ces deux choses sont tellement solidaires entre elles que, si l'on ne change rien à la force, l'une ne peut grandir sans que l'autre diminue, a été tiré ce principe fondamental : *Tout ce qu'une force gagne en puissance, elle le perd en vitesse, et, réciproquement, tout ce qu'elle gagne en vitesse, elle le perd en puissance.*

## CHAPITRE IV

### DE LA FORCE CENTRIFUGE

**DU MOUVEMENT CURVILIGNE.** — Nous avons dit que tout mouvement peut être *rectiligne* ou *curviligne*, et que, dans ce dernier cas, la ligne parcourue se nomme sa *trajectoire*.

Cette trajectoire peut suivre une infinité de lignes différentes ; selon la forme qu'elle affecte, elle a reçu différents noms (*fig. 29*) : *cercle*, *parabole*, *ellipse*, *ovale*, *spirale*, etc. Nous n'avons à nous occuper ici que du mouvement *circulaire*, c'est-à-dire de celui dont la trajectoire forme une circonférence de cercle.

Tout mouvement curviligne est le résultat : 1° d'une force continue agissant obliquement sur une vitesse déjà communiquée à un corps, comme, par exemple, l'action de la pesanteur provoquant à se diriger vers la terre une pierre lancée obliquement de bas en haut ; ces deux forces se combattant obligent la pierre à un mouvement curviligne ; 2° d'une résistance qui modifie à chaque instant le mouvement communiqué à un corps, comme, par exemple, le mouvement d'un corps attaché à l'extrémité d'un fil pouvant tourner autour d'un point fixe et lancé perpendiculairement.

Le mouvement obtenu concurremment avec cette résistance a reçu le nom de *mouvement de rotation*. Tous les points d'un corps animé d'un pareil mouvement décrivent des circonférences de cercle situées dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe de rotation. Les poulies, les roues dentées, entre autres, sont animées de ce mouvement.

Ainsi (fig. 30) le point A de la poulie et le point B décrivent des circonférences situées dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe O de rotation.

Si de points quelconques du corps tournant nous abaissons sur l'axe de rotation O des perpendiculaires CO, DO, EO, FO, GO, HO, ces perpendiculaires forment différents angles avec la position première CO. Si ces

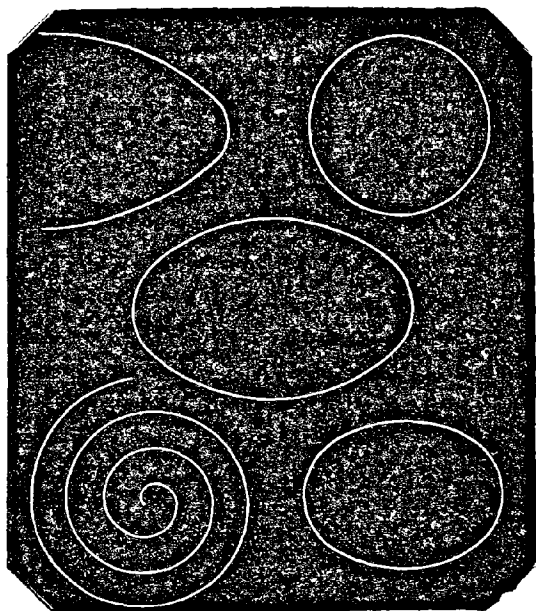


Fig. 23.

CERCLE, PARABOLE, ELLIPSE, OVALE, SPIRALE.

angles sont égaux pendant des intervalles de temps égaux, le mouvement de rotation est uniforme, et l'angle décrit pendant l'unité de temps est la vitesse angulaire du mouvement uniforme. Ainsi la terre fait un tour complet autour de son axe en vingt-quatre heures; la ligne courbe décrit donc par heure un angle égal à  $360^\circ : 24 = 15^\circ$ , tous les angles étant égaux entre eux; la terre a donc une vitesse angulaire de  $15^\circ$  par heure, et son mouvement de rotation est uniforme.

Si les angles ainsi décrits pendant des intervalles de temps égaux sont inégaux, le mouvement de rotation est dit varié.

On exprime généralement la vitesse d'un mouvement de rotation uniforme par le nombre de tours effectués dans l'unité de temps adoptée. Ainsi l'on dira : cette roue a une vitesse de 15 tours par seconde.

**FORCE CENTRIFUGE. — DÉFINITION.** — Tout mouvement curviligne engendre une force en vertu de laquelle le mobile tend sans cesse à s'éloigner du centre de rotation. Cette force est la *force centrifuge* (*centrum*, centre; *fugere*, fuir). La force qui empêche le mobile de s'écartier indéfiniment de ce centre de rotation et de poursuivre sa route en ligne droite est la *force centripète* (*centrum*, centre; *petere*, aller vers), que nous étudions ailleurs plus longuement sous le nom de *gravitation*.

Vous placez une pierre dans une fronde; tenant à la main les deux cordons, vous imprimez à l'instrument une rapide impulsion. La pierre, lancée

d'abord en ligne droite, ne poursuivra pas sa route dans cette direction. Retenue par les deux cordons, elle décrira une circonférence dont votre main sera le centre. Votre main et ces deux cordons jouent le rôle de la *force centripète*. Mais si vous lâchez brusquement un des deux cordons, la pierre, devenue libre, continuera le dernier mouvement en ligne droite, en vertu de son inertie; elle s'échappera suivant la tangente à la circonférence. Cette tendance est due à la *force centrifuge*.

**EFFETS ET APPLICATIONS DE LA FORCE CENTRIFUGE.** — C'est en vertu de la force centrifuge que les roues des voitures lancent autour d'elles de longs jets de boue liquide sur le piéton qui les approche de trop près. La boue, que le cercle de fer de la roue entraîne dans son mouvement circulaire, brise, à cause de son peu de consistance, la force centripète qui devrait la retenir contre ce cercle; elle part en suivant la tangente à la circonférence, et malheur au passant!

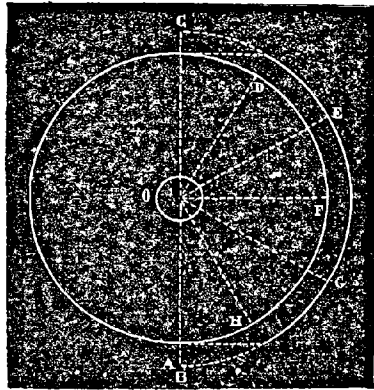


Fig. 20.

La force centrifuge jetterait sur les spectateurs le cheval et le cavalier qui, dans un cirque, galopent circulairement, si l'un et l'autre n'avaient soin de se pencher du côté opposé et de détruire ainsi la tendance qui les pousse vers l'extérieur de l'arène.

De même, on est obligé de donner aux rails extérieurs d'un chemin de fer une hauteur plus grande qu'aux rails intérieurs toutes les fois que la voie décrit une courbe. Les wagons sont maintenus sur cette courbe par la réaction des rails, et ceux-ci sont pressés par les wagons avec une force égale qui est la force centrifuge. Ainsi quand, dans un train, les wagons penchent à droite, c'est que la ligne décrit une courbe vers la droite; et plus la courbe est petite, plus les wagons doivent pencher et conséquemment plus les rails doivent être élevés du côté opposé à la direction du train.

C'est encore en s'appuyant sur la connaissance de la force centrifuge qu'on avait inventé ce jeu connu sous le nom de *chemin de fer russe*, *chemin de fer aérien* ou *chemin de fer à force centrifuge*, bien démodé aujourd'hui, mais qui jadis faisait les délices des amateurs de fêtes publiques.

On établissait deux plates-formes, dont l'une A était d'au moins  $\frac{1}{5}$  plus élevée que la seconde B. Ces deux plates-formes étaient réunies par des rails inclinés dont le tracé formait un contour d'hélice. De la plate-forme A,

un wagon, dans lequel montaient les amateurs, était lancé sur les rails; il acquérait aussitôt, à raison de son mouvement sur la portion inclinée AC, une vitesse assez grande, et, en vertu de l'inertie, il tendait à se mouvoir avec cette vitesse d'une façon rectiligne; mais, obligé de suivre les rails courbes, il réagissait sur eux avec une force assez grande pour équilibrer le poids des voyageurs et permettre que le wagon plein, arrivé au haut du cercle en D, fût retenu par la force centrifuge, ne tombât pas et pût continuer sa route circulaire et remonter en D.

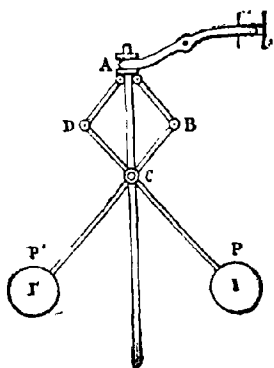


Fig. 31. — RÉGULATEUR.

Des applications plus sérieuses de la force centrifuge ont été faites. Nous citerons, entre autres, l'appareil avec lequel dans les machines à vapeur on rend régulière l'admission de la vapeur dans le corps de pompe.

Cet appareil consiste en un levier (*fig. 31*) qui régit la soupape d'admission de la vapeur. Le levier se soulève ou s'abaisse selon l'action du manchon A, auquel il est lié et qui peut se soulever ou s'abaisser le long de l'arbre, animé, au moyen d'une courroie sans fin, d'un mouvement de rotation plus ou moins rapide dépendant de celui de la machine. Au manchon, d'une

part, en A, et à l'arbre lui-même de rotation, en C, est adapté un losange ADCB formé de quatre tiges rigides AD, AB, CD, CB, articulées à charnière. A l'extrémité des tiges AD et AB sont fixées deux boules pesantes I, I' qui décrivent une circonférence autour de l'arbre. Ces boules sont ainsi soumises à la force centrifuge qui les tient écartées plus ou moins, selon la rapidité du mouvement de rotation de l'arbre; conséquemment le manchon, et par suite le levier, se lève ou s'abaisse.

Dans d'autres machines où l'arbre tournant est horizontal, c'est l'élasticité d'un ressort à boudin qui retient le manchon.

**LOIS DE LA FORCE CENTRIFUGE.** — La force centrifuge, engendrée par un mouvement circulaire, est soumise aux trois lois principales suivantes, qu'il importe de connaître et dont les applications nous serviront plus loin à expliquer certains phénomènes. Nous donnons seulement l'énoncé de ces lois que l'on démontre, en mécanique, par le calcul :

1° *L'intensité de la force centrifuge est en raison directe de la masse du mobile; autrement dit, plus la masse du mobile, c'est-à-dire plus la quantité de matière, la somme des molécules que ce corps renferme est grande, plus grande est sa tendance à s'éloigner du centre.*

2° *L'intensité de la force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse*; ainsi quand la vitesse du mobile devient 2 fois, 3 fois, 4 fois plus grande, sa force centrifuge devient 4 fois, 9 fois, 16 fois plus grande.

3° *Quand la masse et la vitesse sont égales, la force centrifuge varie en raison inverse du rayon du cercle décrit*; c'est-à-dire que plus le mobile est éloigné du centre de rotation, plus petite est sa force centrifuge.

FORME DE LA TERRE. — Dans un corps animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe passant par son centre, les forces centrifuges développées aux différents points du corps sont proportionnelles aux distances de ses points à l'axe. En effet, chacune de ses molécules décrit une circonférence, et sa force centrifuge s'accroît proportionnellement au carré de sa vitesse (2); mais cette même force décroît proportionnellement à sa distance de l'axe (3). Or, à mesure que la distance augmente, la vitesse augmente dans le même rapport; d'où il résulte que, pour une vitesse double, la force centrifuge devient 4 fois plus grande d'un côté; mais la distance étant double, la force centrifuge devient en même temps 2 fois plus petite; elle n'est donc, en définitive, que 2 fois plus grande; elle varie donc proportionnellement à sa distance de l'axe.

Si le corps est élastique, les molécules ne se séparent pas pour obéir à cette force centrifuge, mais la masse se déforme; elle s'aplatit dans le sens de l'axe et s'élargit dans le sens perpendiculaire. On constate ce phénomène au moyen d'un appareil composé de deux cercles en acier flexible (*fig. 32*) disposés en croix et reliés sur un axe A, auquel on imprime, au moyen de roues dentées, un vif mouvement de rotation. On voit bientôt la sphère s'aplatir et prendre la forme ovale. Ainsi s'explique la forme de la terre, aplatie aux pôles et légèrement renflée à l'équateur. Il est probable que, la terre étant primitivement à l'état fluide et en conséquence facilement déformable, ses molécules ont d'abord obéi à la force centrifuge, et que le

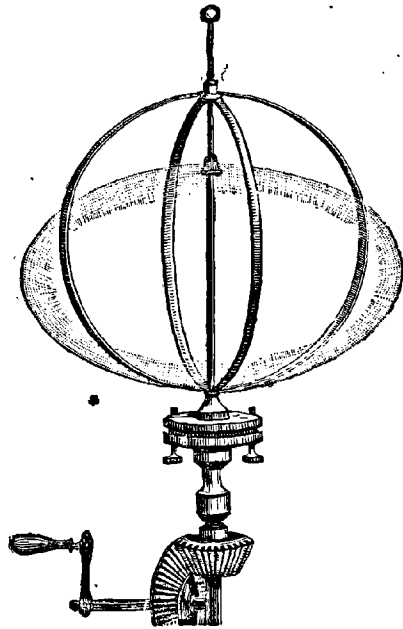


Fig. 32. — APPAREIL POUR DÉMONTRER L'APLATISSEMENT DE LA TERRE.

refroidissement qui a opéré la solidification du globe a été postérieur à l'effet produit par cette force.

Une autre expérience confirme le fait (*fig. 33*). Dans un verre à moitié plein d'eau si l'on verse une certaine quantité d'huile, cette huile

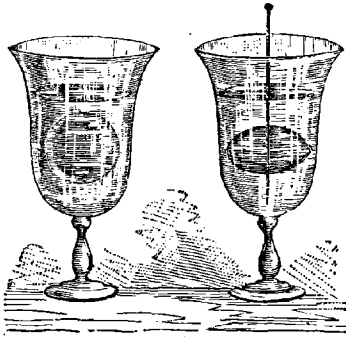
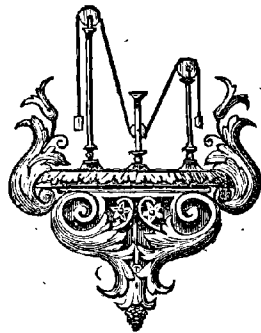


Fig. 33. — EXPÉRIENCES DÉMONTRANT  
L'APLATISSEMENT DE LA TERRE.

surveille, puisqu'elle est plus légère que l'eau; mais, comme elle est plus lourde que l'alcool, elle descend au-dessous de ce liquide si dans le verre l'eau est remplacée par l'alcool. Or, en mélangeant convenablement de l'eau et de l'alcool et en y jetant de l'huile, celle-ci reste entre ces deux liquides et se conglobe en une sphère suspendue entre eux deux. Si alors on perce cette sphère par une longue aiguille, qu'un mouvement d'horlogerie fait tourner sur elle-même rapi-

dement et sans secousses, l'huile suit le mouvement, et le globe s'aplatit en haut et en bas et se renfle sur les côtés. Plus le mouvement de rotation est vif, plus l'aplatissement des extrémités en haut et en bas, plus l'élargissement des côtés sont prononcés.





PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES







## LIVRE II

### PESANTEUR

---

#### CHAPITRE PREMIER

##### PESANTEUR — CENTRE DE GRAVITÉ

**DÉFINITION ET HISTORIQUE.** — Le fruit qui se détache de sa tige, la pierre qui échappe à la main qui la soutenait se précipitent à la surface de la terre, entraînés par une force secrète, à laquelle on a donné le nom de *pesanteur* et qui réside dans tous les corps de la nature. Ce fait a été le point de départ d'observations très importantes. La première en date est celle qui montre que tous les corps terrestres, abandonnés à eux-mêmes, tombent suivant une ligne qui forme un angle droit avec la surface d'un liquide en repos, observation qui, dès la plus haute antiquité, fit, avons-nous dit déjà, inventer à Dédale, personnage mythologique, le *niveau*, instrument composé d'un triangle en bois, au sommet duquel est attaché un fil à plomb.

Les anciens attribuaient cette propriété de la matière non pas à une qualité occulte, comme plus tard le firent Descartes, Gassendi, Cassatus et leurs disciples, mais à une tendance naturelle des particules des corps à se grouper autour d'un centre commun. C'est par là qu'ils expliquaient la forme sphérique de la lune. Mais ils supposaient à faux : 1° qu'un corps léger tend à se diriger en haut et un corps lourd à se diriger en bas ; 2° que les corps tombent dans un même milieu avec une vitesse proportionnelle à leurs masses ; et ces erreurs les empêchèrent d'arriver à la découverte des

lois de la chute des corps, réservée à Galilée. Toutefois, le poète Lucrèce (vers 95 av. J.-C.), dans son poème *De la nature des choses*, reproduisant les idées des philosophes Démocrite et Épicure, dit positivement que, « *si les corps tombent moins vite les uns que les autres, cela tient à la résistance que leur oppose le milieu dans lequel ils tombent, et que, dans un espace vide, ils tomberaient tous avec la même vitesse, les plus lourds comme les plus légers.* » Le poète entrevoyait ce que démontrèrent, après un long espace de temps, Galilée et Newton.

**ATTRACTION.** — Ce fut le jour d'un des plus grands triomphes de l'esprit humain que celui où fut découvert que la même force fait tomber une pierre sur la terre et graviter les corps célestes. C'est la comparaison des lois de la chute des corps terrestres avec celles du mouvement des astres qui a conduit Newton (1) à cette loi admirable, et l'on conçoit avec quelle passion les défenseurs du grand génie anglais luttent aujourd'hui pour lui conserver intacte toute sa gloire, en présence de documents qui attribuent à notre illustre Pascal la découverte de l'attraction universelle. Ce procès, dont on ne saurait prévoir l'issue, sera un des plus célèbres dans les annales de la science, et son importance est en raison de celle de la découverte.

Vers 1560, Galilée trouvait la loi de la chute d'un corps, que nous allons étudier dans le chapitre suivant. En 1618, Kepler (2) démontrait que les planètes décrivent des courbes elliptiques autour du soleil, situé à l'un des foyers ; il énonçait une relation numérique de la rapidité de leur mouvement ; il les comparait entre elles et découvrait la loi qui lie leurs masses

(1) **NEWTON** (Isaac), né à Woolstrop, comté de Lincoln (Angleterre), le 1<sup>er</sup> janvier 1642, montra dès la plus tendre jeunesse une étonnante application à l'étude et un goût prononcé pour la mécanique et les mathématiques. N'ayant pas encore vingt-trois ans, il était déjà célèbre par ses découvertes en mathématiques. Retiré en 1665 dans sa terre de Woolstrop, il conçut, en voyant ce fait vulgaire d'une pomme qui tombait d'un arbre, la première idée de la gravitation universelle et du système du monde. Professeur à l'université de Cambridge, il exposa différentes découvertes sur l'optique, la composition de la lumière, etc., dont une seule suffirait pour illustrer un savant et que nous étudierons en leur lieu. En 1688, il entra à la chambre des Communes et fit partie du Parlement qui exclut Jacques II du trône ; toutefois, il ne se fit nullement remarquer dans la carrière politique. Ses derniers jours furent empoisonnés par la calomnie et par une discussion fort vive avec Leibniz qu'il accusait de plagiat, au sujet de la découverte du calcul infinitésimal. Newton avait, en effet, la priorité, mais Leibniz avait fait de son côté la même découverte sans connaître les travaux de son rival. Newton mourut en 1727.

(2) **KEPLER** (Jean), né à Weil (Wurtemberg), en 1571, d'abord professeur de mathématiques à Graz en 1594, attira de bonne heure l'attention des savants par ses ouvrages. En 1600, il alla se fixer à Uranienbourg, auprès de l'astronome Tycho-Brahé, et obtint le titre de mathématicien de l'empereur Rodolphe, avec un traitement, fort mal payé d'ailleurs. C'est en effet en allant à Ratisbonne réclamer l'arriéré de cette pension qu'il mourut (1631). Ses découvertes ont presque toutes rapport à l'astronomie ; en physique, on lui doit des perfectionnements aux lunettes. Il est regrettable que ses grandes découvertes soient mêlées d'idées mystiques et d'hypothèses insensées.

et les durées de leurs révolutions. Pas de géant dans la route du progrès et de la science ! Aussi avec quel enthousiasme s'écriait-il, dans ses *Harmônies du monde* :

« Depuis huit mois, j'ai vu le premier rayon de lumière ; depuis trois mois, j'ai vu le jour ; enfin, depuis peu de jours, j'ai vu le soleil de la plus admirable contemplation. Rien ne me retient ; je me livre à la sainte fureur qui m'inspire ; je veux insulter aux mortels par l'aveu ingénu que j'ai dérobé les vases d'or des Égyptiens pour en construire à mon Dieu un tabernacle loin des confins de l'Égypte. Si vous me pardonnez, je m'en réjouirai ; si vous m'en faites un reproche, je le supporterai. Le sort en est jeté ; j'écris mon livre ; il sera lu par l'âge présent ou par la postérité, peu m'importe ; il pourra attendre un siècle son lecteur ; Dieu n'a-t-il pas attendu six mille ans un contemplateur de ses œuvres ! »

Ce langage peut nous étonner aujourd'hui, ajoute M. Cazin (*les Forces physiques*) ; mais l'état des esprits à l'époque où écrivait Kepler justifie son exaltation ; grâce à Dieu, les régions de la science sont aujourd'hui plus sereines, et les savants n'ont plus à lutter contre les superstitions qu'enfantait autrefois l'ignorance.

Newton expliqua les lois de Kepler d'après les principes de la mécanique rationnelle. Ce dernier pensait que la pesanteur était le résultat produit par des effluves magnétiques qui, émanant comme autant de rayons du centre de la terre, attireraient vers ce centre tous les corps qui tombent. Newton ne chercha point quelle était la cause, l'essence de la force dont il constatait les résultats ; il resta mathématicien, et, par suite, son œuvre, dégagée de toute obscurité métaphysique, est impérissable. Elle n'est en opposition avec aucune doctrine philosophique, et elle a satisfait si complètement l'esprit humain, que, depuis Newton, les astronomes ne cherchent guère à pénétrer le lien mystérieux qui unit les corps quelconques de l'univers. Il a expliqué sa découverte et prouvé la vérité de ses assertions dans son livre intitulé : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (1687) ; et elle a été formulée dans cette loi : *Les corps s'attirent en raison directe de leurs masses et en raison inverse du carré des distances*, c'est-à-dire que, si un corps a une masse quatre fois plus grande qu'un autre, il l'attirera avec une force quatre fois plus grande, et si les deux corps sont parfaitement mobiles, celui qui a la masse quatre fois plus grande se déplacera quatre fois moins que l'autre. De plus, si la distance qui sépare les deux corps est quatre fois, cinq fois, dix fois plus grande, ils s'attireront  $4 \times 4 = 16$  fois,  $5 \times 5 = 25$  fois,  $10^2 = 100$  fois moins.

Cette force mystérieuse, découverte par Newton, est l'*attraction*.

Lorsque l'*attraction* n'a pour objet que d'unir entre elles les différentes molécules qui constituent un corps, on l'appelle *attraction moléculaire*; quand elle préside à la conservation de l'ordre qui règne dans l'univers, en retenant les corps célestes dans les limites de leur route accoutumée, elle prend le nom de *gravitation universelle*; quand enfin elle est le lien invisible qui tient enchaînés les divers éléments qui composent notre globe, ou cette force invisible qui précipite à leur surface les corps qui en ont été séparés, c'est la *pesanteur*.

La réalité physique de l'*attraction* peut être à chaque instant constatée à la surface de la terre; tout le monde a remarqué, par exemple, que les corps légers, les grains de poussière flottant sur l'eau d'une cuvette finissent par être réunis sur les bords. Les bulles gazeuses que l'on voit sur une tasse de café, quand on y a mis du sucre, se groupent ensemble; elles s'attirent l'une l'autre, elles se réunissent, puis soudain, attirées toutes ensemble par une masse plus grande, elles courent rapidement jusqu'aux parois.

Une expérience scientifique, conçue par John Michell, en Angleterre, et faite en 1798 par Cavendish (1), ne permet plus de conserver aucun doute. Il fallait voir si deux corps terrestres, soustraits à l'action de la pesanteur, se précipiteraient vraiment l'un sur l'autre avec une vitesse proportionnelle à leur masse et à leur distance.

On ne peut évidemment soustraire un corps à l'action de la pesanteur; mais on peut disposer ce corps de manière que la pesanteur ne lui imprime aucun mouvement. Deux balles de plomb A, B, pesant chacune 729 grammes, sont adaptées aux extrémités d'un levier horizontal CD (fig. 34), suspendu par son centre à un fil très fin EH. La pesanteur ne peut, certes, déplacer ces balles dans le sens horizontal; pour les mettre à l'abri de l'agitation de l'air, on les dispose encore dans une boîte. Deux grosses sphères de plomb P, S, pesant chacune 158 kilogrammes, sont placées à côté des petites balles, de façon que la ligne de leurs centres rencontre le prolongement du fil de suspension; les centres des balles et des sphères sont dans un même plan horizontal. On enferme le tout dans une autre boîte. On observe avec des lunettes L, L' les extrémités du fléau CD, et l'on re-

(1) CAVENDISH (Henry), né à Nice en 1731, mort en 1810. Il appartenait à la noble famille des ducs de Devonshire et des ducs de Newcastle, une des plus riches d'Angleterre; mais étant de la branche cadette, il était pauvre et conséquemment méprisé et délaissé par ses puissants parents qui ne comprenaient pas son goût pour l'étude des sciences. Heureusement, un de ses oncles, revenu d'outre-mer, lui laissa par testament plus de 300,000 livres de rente, et cet héritage le fit accueillir par ses nobles cousins avec plus d'amitié et de respect, sans contredit, que ses savants travaux. Cependant il a la gloire de disputer à Lavoisier la priorité de la découverte de l'*hydrogène* et de la composition de l'eau; il trouva celle de l'acide nitrique, détermina la densité moyenne du globe et trouva l'expérience importante dont nous parlons ici. Nous cherchons vainement dans l'histoire des comtes et des ducs de la famille des titres plus beaux à la gloire et à la reconnaissance des hommes.

marque alors que, dès l'approche des grosses sphères, les petites balles se portent d'elles-mêmes à leur rencontre. La réalité de l'attraction est démontrée, quoique, dans cette expérience, l'attraction soit fort petite, puisqu'elle est ici à peu près égale à celle que la terre exerce sur un poids de  $\frac{15}{1000}$  de milligramme.

Cependant, connaissant la distance du centre de chaque balle à celui de la sphère voisine, cette expérience a pour résultat de permettre, en vertu des lois de Newton, de calculer l'attraction qu'on aurait si la sphère était au centre de la terre et de comparer cette attraction à celle que la terre exerce sur la balle de 729 grammes. Le rapport de ces deux attractions est celui des masses de la terre et de la sphère. Cavendish en a déduit la densité moyenne de la terre, qui est de 5,44.

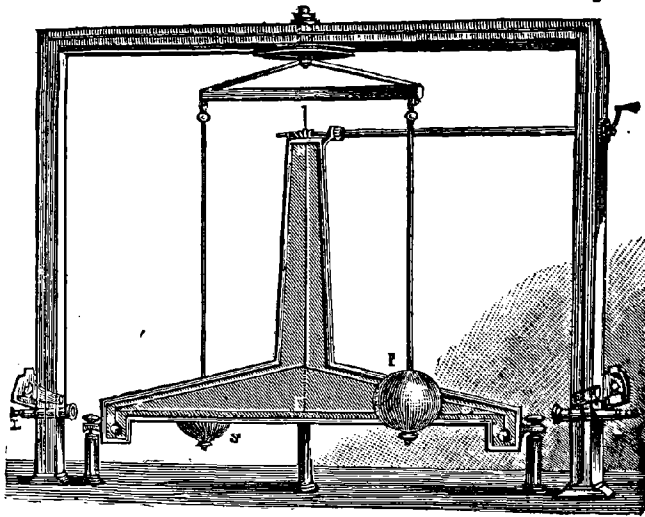


Fig. 34. — APPAREIL DE CAVENDISH.

On arrive ainsi à connaître la masse de la terre. De même, on peut peser comme avec une balance les corps célestes en appliquant les lois de Kepler qui lient la masse de ces corps célestes à la durée de leurs révolutions respectives.

Mais ceci est proprement du domaine de la *Cosmographie* et de l'*Astronomie*; nous nous arrêterons donc, non toutefois sans avoir parlé de deux instruments nouveaux, inventés par M. Siemens, savant physicien anglais, que M. de Parville décrit ainsi dans ses *Causeries scientifiques*. L'un d'eux, l'*attractionmètre*, est destiné à mesurer les plus petites variations dans la force attractive; l'autre, le *bathomètre*, se basant sur ce principe que l'attraction est moins grande si les corps attirés sont sur la mer que s'ils sont sur la terre ferme, puisque l'eau a une densité moindre et conséquemment qu'ils ont un poids moindre, doit montrer les différentes variations de poids des corps en tel ou tel lieu. On voit les applications pratiques qui découlent aussitôt : dans la navigation, pour déterminer, sans sondage, la profondeur de la mer; en géologie, pour obtenir des renseignements

sur la composition du sous-sol; en aéronautique, pour avoir un mesureur exact des hauteurs atteintes par le ballon; en astronomie, pour bien se rendre compte des attractions produites sur la mer par les actions sidérales et renseigner sur la grandeur des forces qui engendrent les marées.

Le premier de ces instruments, l'*Attractionmètre*, se compose de deux cylindres horizontaux en fonte de 6 centimètres de diamètre sur 30 de longueur, réunis par un tube en fer de 40 centimètres de longueur; un second tube en verre, immédiatement superposé au tube de jonction en fer, établit une nouvelle communication entre les deux réservoirs cylindriques. Ce système est posé sur un trépied à vis calantes. Les réservoirs et le tube métallique de jonction sont pleins de mercure; le tube de jonction en verre et la partie supérieure des réservoirs sont remplis d'alcool coloré avec de la cochenille. Une seule bulle d'air commun, dans un niveau, a été laissée dans le tube en verre.

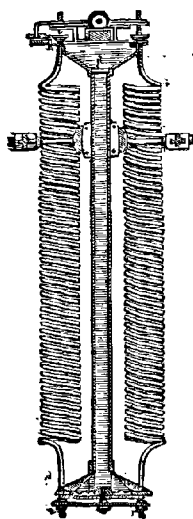


Fig. 35.

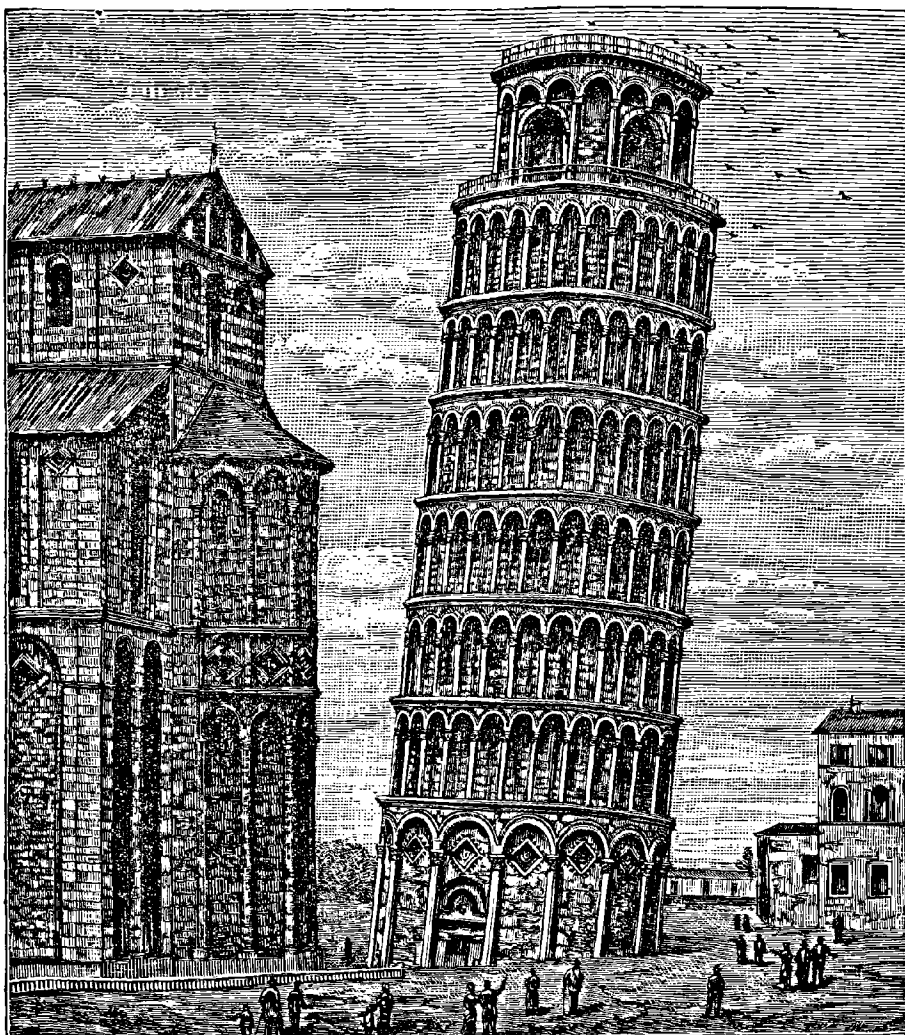
BATHOMÈTRE.

Si l'on approche d'un des réservoirs une masse pesante, immédiatement on voit la bulle se déplacer et révéler l'influence de la masse attractive. En effet, le mercure a été attiré dans le réservoir soumis à l'action de la masse que l'on a approchée; il y a eu dénivellation du liquide, et la bulle, par son déplacement, a révélé le mouvement. La sensibilité de l'instrument, qui est extrême, puisqu'il suffit d'en approcher une masse de 500 grammes pour que son influence soit manifeste, dépend des sections des réservoirs et de la section du tube en verre de jonction. Une petite masse de mercure, déplacée dans le réservoir, se traduit par une longueur assez grande de liquide dans le tube en verre de petit diamètre et par un déplacement sensible de la bulle. Les variations de température, étant égales dans chaque réservoir, n'influent pas sur la marche de la bulle d'air.

Le second de ces instruments s'appelle *bathomètre* (du grec *bathos*, profondeur, et *metron*, mesure). C'est un tube vertical en acier, plein de mercure (fig. 35). Les extrémités s'ouvrent en forme de coupe, de façon à augmenter les surfaces terminales du mercure. La coupe inférieure est fermée au moyen d'un diaphragme (légère cloison) très mince, en feuilles d'acier plissé; le poids de la colonne de mercure est équilibré au centre du diaphragme par la force élastique de deux ressorts d'acier qui descendent en spirale de chaque côté du tube et prennent leur point d'appui respectif sur la coupe supérieure. On a ainsi une colonne pesante suspendue, qui exerce sur les ressorts une traction proportionnelle aux variations de son poids.



Le tube est posé, à l'aide de tourillons, sur un trépied, de façon à conserver la position verticale. L'instrument constitue donc une balance, dans laquelle la masse à peser est constante, et la tare est invariable, puis-



La tour penchée de Pise (page 100).

qu'elle est donnée par la force élastique des ressorts, qui ne sont pas influencés par les variations de la pesanteur. La colonne de mercure agit sur le diaphragme et tend à le déprimer s'il y a augmentation de la pesanteur; s'il y a diminution, le ressort ramène, au contraire, le diaphragme

dans sa position première. Or, chaque oscillation du diaphragme abaisse ou surélève le niveau du mercure dans la coupe supérieure. Les changements de niveau accusent les changements de la pesanteur. Ces déplacements très faibles sont enregistrés à l'aide d'un contact électrique. La coupe supérieure est fermée; il ne pénètre à l'intérieur qu'une vis que l'on fait tourner avec précaution. La vis est reliée à une pile électrique; le diaphragme de la couche inférieure également; aussitôt que la vis touche la surface du mercure, le courant électrique passe et fait retentir une sonnerie. Sur la tête de la vis sont des divisions. Pour apprécier la profondeur de la mer en tel ou tel lieu, il suffit de lire.

**DIRECTION DE LA PESANTEUR.** — L'attraction étant une propriété générale de la matière, aucun corps ne peut être soustrait à la pesanteur; aucun corps, abandonné à lui-même, ne peut ne point se diriger aussitôt vers la terre. C'est à la pesanteur que sont dus la pression des corps sur ceux qui les soutiennent, l'écoulement des liquides, la suspension des corps flottants, l'élévation de la fumée et des ballons.

La suspension des corps flottants, l'élévation de la fumée et des ballons que nous citons comme des effets de la pesanteur semblent cependant, au contraire, être des exceptions. Ces exceptions ne sont qu'apparentes. La fumée, les ballons, les corps flottants sont pesants comme les autres; ce qui s'oppose à leur chute, c'est l'air ou le liquide au milieu duquel ils sont et qui est plus lourd qu'eux. Enlevez cette opposition, le corps reprend sa direction vers la terre. Un bouchon de liège pèse évidemment; abandonnez-le à lui-même dans l'air, il tombera; mais si vous l'abandonnez dans l'eau, il ne tombera plus, il flottera, parce que l'eau, plus lourde que lui, l'empêche de passer. La fumée d'une chandelle que l'on vient d'éteindre se dirige en haut; placez-la sous le récipient d'une machine pneumatique, machine dont nous parlerons et qui est destinée à pomper l'air contenu dans une cloche, la fumée, au lieu de s'élever, tombera, c'est-à-dire suivra la direction imposée à tous les corps par la pesanteur.

La direction de la pesanteur s'appelle *verticale*, et toute direction perpendiculaire à la verticale est dite *horizontale*. Cette direction est donnée par un instrument appelé *fil à plomb* (*fig. 36*), composé d'un corps pesant quelconque, en général d'un petit cylindre en plomb, terminé par un cône et suspendu à un fil. La masse de plomb tend à tomber et fait prendre au fil la direction de la pesanteur, c'est-à-dire la verticale.

Le fil à plomb est très employé dans la pratique, soit pour s'assurer de la *verticalité* d'un mur; car, s'il s'en éloignait quelque peu, chacun sait

qu'il ne tarderait pas à tomber, surtout si ce mur avait une grande hauteur; soit pour constater l'*horizontalité* d'un corps, d'un plan, constatation indispensable pour élever une construction d'aplomb. On a donné diverses formes aux instruments appelés *niveaux*, basés sur l'emploi du fil à plomb.

Pour constater la verticalité, le *fil à plomb* simple suffit; cependant on se sert aussi d'une règle à bords bien parallèles (*fig. 37*), sur le milieu de laquelle est tracée une ligne AB, nommée *ligne de foi*, bien parallèle aux bords et sur laquelle s'appuie un fil à plomb suspendu en A. On place le côté de la règle sur le corps de la verticalité duquel on veut s'assurer; si le fil à plomb couvre bien la ligne de foi, et seulement alors, la surface considérée est verticale.

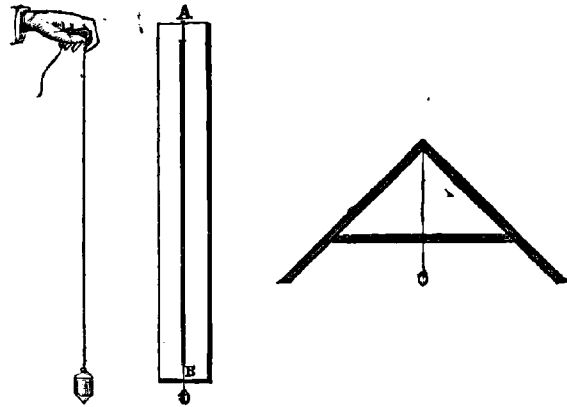


Fig. 36, 37, 38.

FIL A PLOMB. — RÈGLE. — NIVEAU DE MAÇON.

Pour constater l'*horizontalité*, on se sert du *niveau de maçon* dont l'aspect seul (*fig. 38*) indique l'usage.

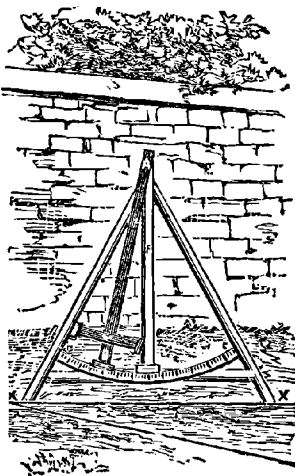


Fig. 39.

NIVEAU A PERPENDICULE DE DELAMBRE.

Lorsque l'on veut non seulement connaître si un plan ou une ligne est horizontal, mais encore de combien il s'écarte de la perpendiculaire, on se sert, particulièrement en *géodésie* (du grec *gé*, terre; *daiein*, diviser), science qui s'occupe spécialement de la mesure de la terre, ou de ses parties, ou de la détermination de la forme des surfaces terrestres, on se sert, disons-nous, du niveau à perpendicule perfectionné par Delambre, ce savant dont nous avons parlé, qui fut chargé de la mesure du méridien avec Méchain, en 1792, puis avec Arago. Dans ce niveau (*fig. 39*), le fil à plomb est remplacé par une règle AB suspendue en A, et dont l'extrémité inférieure est munie d'un vernier V. Un limbe CD divisé permet de lire la valeur de l'angle formé par la règle AB et par la ligne de foi F. On peut ainsi trouver l'inclinaison d'une ligne XX' avec l'horizon XH; car, comme on le sait en géométrie,

l'angle  $BAP = X'XH$  comme ayant leurs côtés perpendiculaires entre eux.

Des expériences faites à l'aide de ces divers instruments on a pu conclure cette définition, que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface d'un liquide en équilibre, ou, comme l'on dit généralement, à la surface des eaux tranquilles. On constate facilement cette perpen-

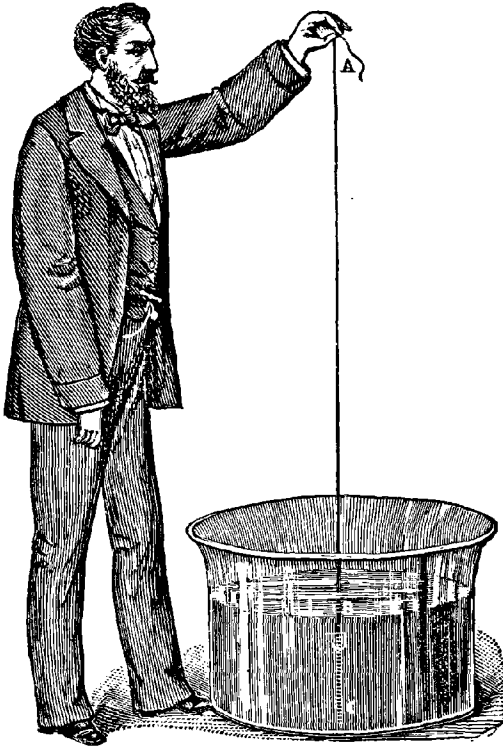


Fig. 40.

dicularité en disposant un fil à plomb AB (*fig. 40*) au-dessus de la surface bien réfléchissante d'un liquide, du mercure, par exemple, ou de l'eau noircie. On remarque alors que l'image BC du fil à plomb produite sur la surface du liquide est bien le prolongement du fil lui-même, qu'elle lui est symétrique et conséquemment que le fil est bien perpendiculaire à la surface.

Or, la surface des eaux tranquilles définit en chaque lieu ce que l'on appelle la surface de la terre. C'est la surface de l'Océan, supposée non agitée par les flots, et s'étendant sur la totalité du globe terrestre.

On sait que cette surface est sphérique.

Il suit de là que les diverses verticales vont aboutir au centre de la terre. Si la terre était percée d'outre en outre par un puits immense, nous tomberions jusqu'au centre, que nous dépasserions d'abord par suite de la vitesse acquise, puis nous remonterions au centre et au delà, attirés encore, pour redescendre, et ainsi de suite, oscillant plusieurs fois pour nous arrêter enfin au centre. La force attractive qui nous pousse ainsi dans les profondeurs du globe, la *pesanteur*, se traduit pour nous par la sensation de *poids*. Il faut faire un effort pour empêcher un corps de tomber; cet effort est ce que nous appelons son *poids*.

Nous foulons donc la terre, un peu comme les mouches qui courent au plafond, les pieds rivés au sol et la tête pendante dans l'espace. Si, par le trou dont nous parlions tout à l'heure, nous apercevions, étant placé en A

(fig. 41), un homme au côté diamétralement opposé au nôtre, cet homme B serait notre *antipode* (du grec *anti*, contre; *pous*, *podos*, pied); précipité dans le puits supposé, ses pieds viendraient se coller aux nôtres et il serait comme lorsque nous marchons sur une glace, l'image qui progresse avec nous et perpendiculairement à nous.

Les angles AOC, AOD, AOE que forment les verticales de deux points éloignés du globe sont donc, en réalité, égaux à la distance angulaire qui sépare les lieux correspondants, distance qu'il est toujours facile de calculer; ainsi, de Barcelone à Dunkerque cet angle est de  $7^{\circ} 28'$ . Mais la distance considérable du centre de la terre permet de considérer ces verticales, dans un même lieu, comme étant parallèles. En effet, le quart de la circonférence terrestre, c'est-à-dire 90 degrés, étant, on le sait, de 10 millions de mètres, un mètre représente une distance angulaire de  $\frac{90^{\circ}}{10\,000\,000}$  ou  $\frac{3}{100}$  de seconde environ, quantité complètement inappréciable, même avec les instruments les plus parfaits. On regarde donc la pesanteur, agissant verticalement sur toutes les molécules d'un corps, comme un ensemble de forces parallèles.

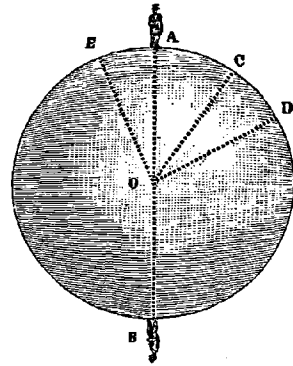


Fig. 41. — ANTIPODE.

**POIDS.** — Nous disions tout à l'heure que la force attractive, la pesanteur, se traduisait pour nous par la sensation du *poids*. Il ne faut pas confondre, en effet, comme on le fait quelquefois dans le langage vulgaire, le mot *pesanteur* avec le mot *poids*. La pesanteur désigne la *force constante* qui attire tous les corps vers le centre de la terre, tandis que le poids désigne l'*effet de cette force* sur chacun d'eux. Le *poids* est la résultante des actions que la pesanteur exerce sur toutes les molécules d'un corps; il est donc proportionnel à sa masse; et, réciproquement, la masse d'un corps est proportionnelle à son poids. Nous rappelons que le mot *masse* n'est point synonyme de volume, car il y a des corps très volumineux et très légers; la masse d'un corps est la quantité de matière enfermée sous l'unité de volume.

Il y a trois espèces de poids : 1° le *poids absolu*, qui est l'effort que l'on doit opposer à un corps, *dans le vide*, pour l'empêcher de tomber; 2° le *poids relatif*, qui est le rapport de son poids absolu à un autre poids pris pour unité. Ce poids pris pour unité est, dans notre système métrique,

le *gramme*, ou poids d'un centimètre cube d'eau distillée à son maximum de densité; 3° le *poids spécifique*; c'est le rapport du poids relatif d'un corps sous un certain volume au poids d'un même volume d'eau distillée, à son maximum de densité, s'il s'agit d'un corps solide ou liquide, et au poids d'un même volume d'air atmosphérique, s'il s'agit d'un gaz.

Exemple : Prenons un centimètre cube de platine; il tend, en vertu de la force d'attraction, à se diriger sur le centre de la terre, s'il est abandonné à lui-même. La force qu'il faudrait lui opposer dans le vide pour empêcher sa chute serait son *poids absolu*.



FIG. 42.

Nous prenons ce centimètre cube de platine; nous le comparons, au moyen d'une balance, à notre unité de mesure, le gramme, et nous trouvons qu'il faut 22 grammes pour équilibrer le morceau de platine; 22 grammes seront le *poids relatif*.

Le poids relatif étant 22 grammes, nous savons que le centimètre cube d'eau ne pèse que 1 gramme; nous dirons que le *poids spécifique* du platine est 22.

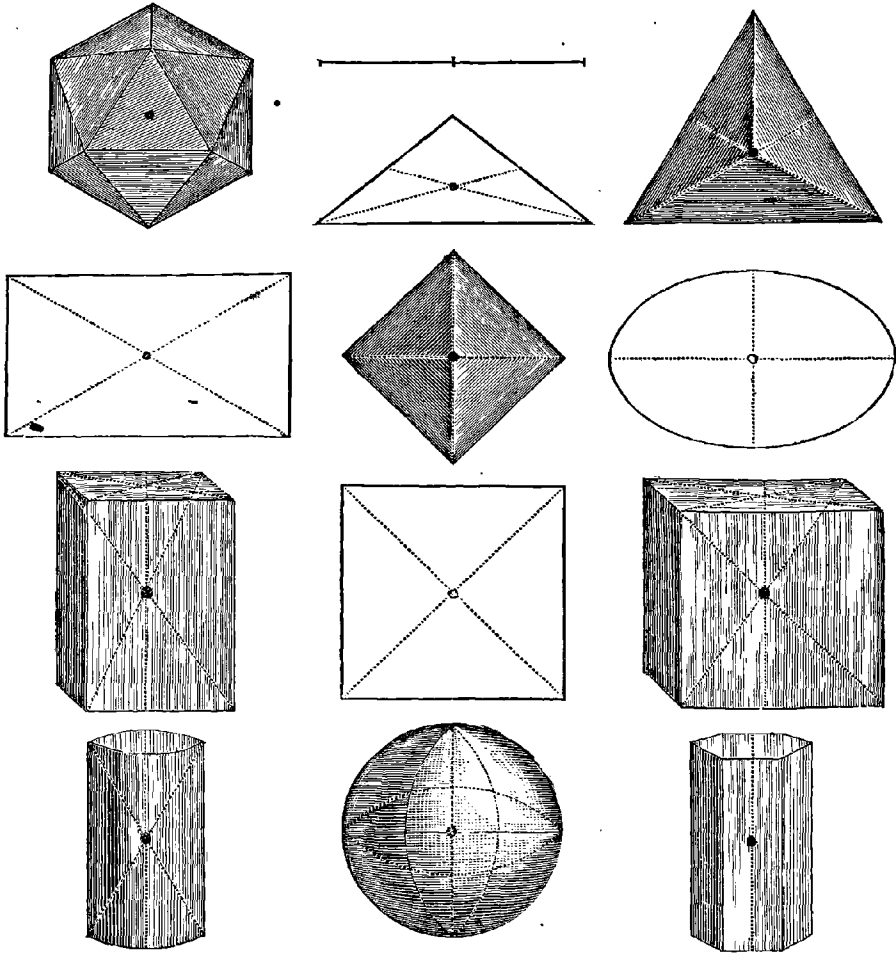
Nous verrons plus loin, en étudiant l'*intensité de la pesanteur*, que le poids absolu d'un corps n'est pas le même à tous les points du globe; mais que le poids relatif reste constant, les variations s'exerçant en égale proportion sur le corps considéré et sur l'unité qui sert à le peser.

**CENTRE DE GRAVITÉ.** — La pesanteur étant une propriété de la matière, toutes les molécules qui constituent un même corps sont soumises à son action; toutes les molécules tendent à se diriger vers le centre de la terre, et, nous le répétons, la longueur du rayon terrestre étant immense, la distance angulaire est considérée comme nulle, et les forces qui agissent verticalement sur toutes les molécules d'un corps doivent être regardées comme des forces parallèles (*fig. 42*).

Or, nous avons dit (page 69, § v) que, lorsque plusieurs forces parallèles, agissant dans le même sens, sont appliquées aux différents points d'un même corps, leur résultante générale est égale à leur somme, et que le point d'application de cette résultante passait toujours par un même point; ce point est le *centre de gravité*.

Il résulte de la loi que nous venons d'énoncer que la position de ce point ne varie pas, quand on fait varier la direction des composantes;

on peut donc faire tourner le corps sur lui-même sans que la position du *centre de gravité* change; c'est un point fixe, qui dépend seulement de la façon dont sont distribuées dans son intérieur les molécules qui le constituent.



Centre de gravité de quelques faces et de quelques solides (page 96).

Pappus, mathématicien d'Alexandrie qui vivait dans le IV<sup>e</sup> siècle de notre ère, et dont nous avons les restes d'un recueil grec intitulé *Collections mathématiques*, renfermant des documents nombreux et précieux sur l'état des sciences physiques dans l'antiquité, nous apprend que, quoique Aristote eût observé qu'un homme assis est obligé, pour se lever, ou

*de retirer ses pieds en arrière ou de porter son corps en avant*, les anciens s'étaient vainement occupés de la recherche du centre de gravité. Ce ne fut qu'au xvii<sup>e</sup> siècle que deux mathématiciens, le Père Guldin, jésuite, et Lucas Valérius, reprirent la question et calculèrent la position du centre de gravité dans les corps de forme géométrique et dont la masse est formée de molécules de même espèce.

Pour découvrir le centre de gravité d'un corps, on suspend ce corps successivement par deux points différents; le prolongement des fils dans l'intérieur du corps formerait un angle; le sommet de cet angle est le centre de gravité.

Quelquefois on peut exécuter ce prolongement, par exemple pour les corps dans lesquels l'épaisseur est assez petite pour être négligée; mais, dans le plus grand nombre de cas, on ne peut déterminer le centre de gravité d'un corps qu'au moyen de formules mathématiques souvent élevées, dont nous n'avons point à parler ici, parce qu'elles appartiennent proprement à la *mécanique*. Cependant, dans le cas de corps homogènes de forme très simple, où il existe un point de symétrie, ce point de symétrie est lui-même le centre de gravité.

Ainsi (*fig.* p. 95) le centre de gravité : 1<sup>o</sup> d'une droite est son milieu; 2<sup>o</sup> d'un triangle, le point d'intersection des perpendiculaires abaissées de ses sommets; 3<sup>o</sup> d'un cercle, d'une circonférence, d'un anneau, d'une ellipse, le centre; 4<sup>o</sup> d'un carré, d'un rectangle, d'un parallélogramme, le point de rencontre des diagonales; 5<sup>o</sup> d'une sphère, son centre; 6<sup>o</sup> d'un cylindre, le milieu de son axe; 7<sup>o</sup> d'un parallélépipède, le point de concours des diagonales, etc.

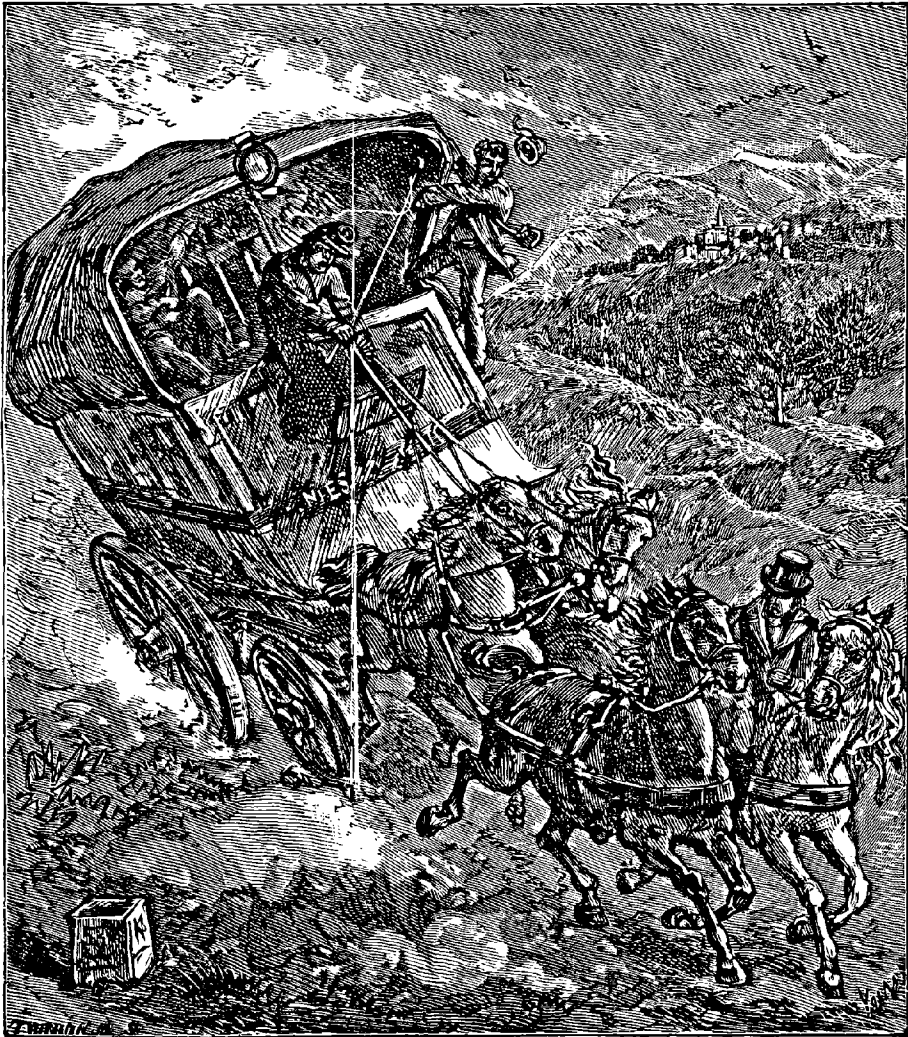
**ÉQUILIBRE DES CORPS PESANTS.** — Au point de vue mécanique, le *centre de gravité* est donc, en réalité, le centre de forces parallèles distribuées d'une manière déterminée. Toutefois, il est constant que la découverte du centre de gravité est due à la considération des phénomènes d'équilibre qui se produisent dans les corps physiques sous l'influence de la pesanteur. L'action de la pesanteur étant représentée par une résultante unique, égale à son poids, verticale et appliquée à son centre de gravité, il suffit évidemment, pour l'annihiler, de lui opposer une force égale, de même direction et appliquée au même point. Il y a, en d'autres termes, un point tel que, si on vient le fixer, le corps se trouve entièrement soustrait à l'action de la pesanteur, est *en équilibre* : ce point est le *centre de gravité*.

On peut obtenir ce résultat, c'est-à-dire soustraire un corps à l'action de la pesanteur, le mettre en équilibre, de trois manières différentes : 1<sup>o</sup> en



soutenant le centre de gravité par un fil; 2° en soutenant le centre de gravité par un axe horizontal; 3° par une surface plane fixe.

1° Dans le premier cas, il est clair qu'il faut que le centre de gravité



Centre de gravité (page 101).

et le fil se trouvent dans la même direction verticale. C'est ainsi que nous avons ci-dessus déterminé le centre de gravité d'un corps.

2° Dans le second cas, c'est-à-dire lorsqu'un corps solide est soutenu par un axe horizontal autour duquel il peut se mouvoir, l'équi-

libre ne peut avoir lieu que si la verticale du centre de gravité passe par l'axe.

Soit, par exemple, une plaque triangulaire mobile autour d'un axe de rotation  $O$ , et soit  $G$  le centre de gravité. Pour qu'il y ait équilibre, il faut que la verticale menée par ce point  $G$  rencontre l'axe. Mais cette verticale peut le rencontrer, que le centre de gravité soit au-dessus ou au-dessous de l'axe. S'il est au-dessus (*fig. 43*), évidemment le moindre mouvement imprimé au corps lui fera perdre sa position d'équilibre en vertu de sa

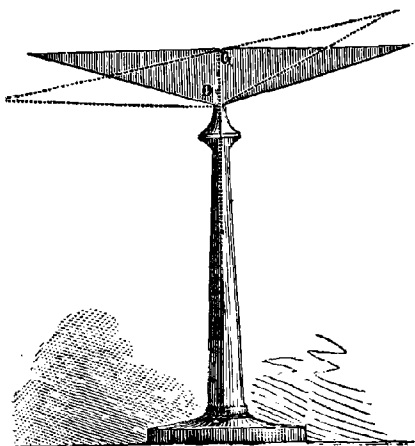


Fig. 43. — ÉQUILIBRE INSTABLE.

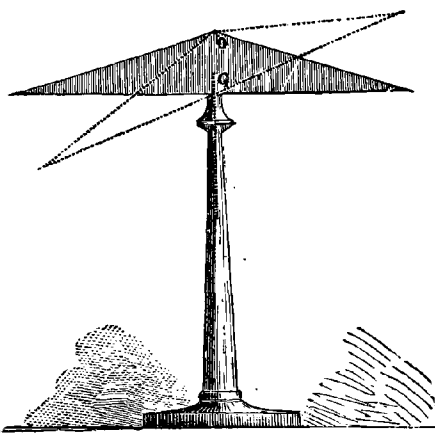


Fig. 44. — ÉQUILIBRE STABLE.

pesanteur. On dit alors que l'équilibre est *instable*. Si le centre de gravité est au-dessous de l'axe (*fig. 44*), l'action de la pesanteur tend toujours, au contraire, à rétablir cet équilibre, si l'on vient à le troubler, et l'équilibre est *stable*.

La condition d'équilibre stable est donc que *le centre de gravité soit au-dessous de l'axe ou du point de suspension*.

Ce principe a reçu une application dans le jouet connu sous le nom d'*équilibriste* (*fig. 45*). C'est une figurine en ivoire, reposant par un point sur un petit socle horizontal. Deux boules de plomb sont fixées à distance égale de la figurine par de petites tiges. Le centre de gravité se trouve au-dessous de l'axe, l'équilibre est donc stable. Aussi, quelque mouvement d'oscillation que l'on donne à l'appareil, il finit toujours par se remettre dans une position telle que la verticale menée par le centre de gravité passe par son point d'appui.

Si l'axe traversait le corps en passant précisément par son centre de gravité, l'équilibre serait *indifférent*, c'est-à-dire qu'il aurait lieu dans toutes les positions possibles. Ainsi a-t-il lieu dans les roues de mécanis-

mes qui servent à transmettre du mouvement et qui ne doivent avoir aucune position d'équilibre. Ici, en effet, l'axe passe par le centre du cercle, qui est le centre de gravité.

3° Quand le corps s'appuie sur une surface plane fixe, sur une table ou sur le sol, par exemple, il faut, pour que ce corps soit en équilibre, ou que la verticale abaissée du centre de gravité passe par le point de contact, si le corps ne touche la surface que par un point; ou, s'il touche la surface en plusieurs points, que la verticale touche dans l'intérieur de la base du polygone formé en joignant deux à deux les différents points de contact.

Dans ce cas, l'équilibre est *indifférent* si son centre de gravité est constamment à la même distance de la surface plane, comme pour un cube, une sphère posés sur une table; il est *stable* lorsque le centre de gravité est placé plus bas que dans toute autre position du corps, comme un œuf posé dans le sens de sa longueur; il est *instable* si le centre de gravité est plus haut que dans toute autre position, comme lorsqu'on pose un œuf sur sa pointe.

On comprend facilement que l'équilibre *instable*, rigoureusement possible, est en réalité impossible à obtenir. En effet, une foule de causes concourent sans cesse à le détruire; on ne peut donc le considérer que comme de l'ordre purement théorique.



Fig. 46. — POUSSAH.

Si le corps repose sur la surface par plusieurs points, il est visible que l'équilibre sera d'autant plus stable que le centre de gravité sera placé plus bas, que la base sera plus large et que la position du point où la verticale du centre de gravité tombe dans l'intérieur du polygone sera plus centrale. L'expérience le démontre journellement.

Ces principes d'équilibre trouvent leur application pratique en une infinité de circonstances.

Sans parler du jouet nommé *poussah* (fig. 46), dans lequel, l'accumu-

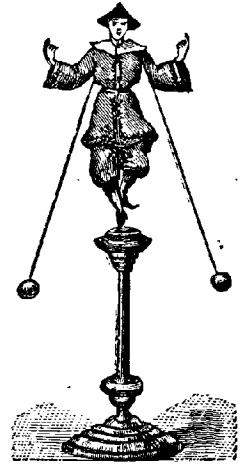


Fig. 45.

ÉQUILIBRISTE.

lation de la matière étant portée vers la partie inférieure, le centre de gravité est très bas et, conséquemment, ramène toujours le jouet à la position verticale, quelques mouvements qu'on lui imprime; sans parler non plus de ce jouet d'enfants qui consiste en un petit cylindre de sureau, au bas duquel on fixe un clou à grosse tête, et qui revient toujours debout, malgré les efforts que l'on fait pour le renverser, nous rappellerons le soin que l'on apporte dans les constructions à disposer les matériaux de façon que la verticale du centre de gravité tombe bien dans l'intérieur du corps. La négligence sur ce point amènerait infailliblement un prompt renversement de l'édifice. Il est même arrivé quelquefois que, le terrain sur lequel on a bâti éprouvant quelques tassements, la verticale de gravité change, et l'édifice court risque de s'écrouler. La fameuse tour de Pise présente un exemple de ce fait. On sait qu'elle penche de près d'un mètre. Elle ne s'écroule cependant pas, parce que, même dans l'état où elle est, si de son centre de gravité on laissait tomber un fil à plomb, le plomb ne tomberait pas en dehors du terrain occupé par sa base.

C'est encore en appliquant les principes que nous venons d'énoncer que l'homme, dont le centre de gravité est situé près du creux de l'estomac, se penche en avant pour marcher, parce que le mouvement que tend à prendre le centre de gravité facilite la marche, plus en avant encore s'il porte un fardeau sur ses épaules, se jette du côté opposé à celui qui supporte un poids, se penche en arrière pour porter quelque chose entre ses bras comme une nourrice fait d'un enfant, ou pour descendre une rampe, tandis qu'il se penche en avant pour la remonter ou bien pour se lever, étant assis. Les danseurs de corde ne conservent leur équilibre qu'en maintenant leur centre de gravité au-dessus de la corde, chose à laquelle ils parviennent au moyen d'un *balancier*, longue perche dont les deux bouts sont chargés d'une boule assez pesante, avec laquelle ils font varier non pas précisément la position de leur propre centre de gravité, mais la position de celui qu'ils auraient si le balancier faisait partie de leur corps, ce qui est en réalité tant qu'ils le tiennent à la main.

C'est encore en observant ces règles que les marins disposent à fond de cale le *lest* qui maintiendra le plus bas possible le centre de gravité de leur navire; sans cela, quand un coup de vent coucherait celui-ci d'un côté, il ne pourrait plus se relever. S'il s'élève une tempête, le capitaine quelquefois fera encore baisser ce centre de gravité en faisant enlever de dessus le pont les objets lourds, canons, marchandises, qui s'y trouvent, afin de donner plus de stabilité à son bâtiment.

Si une voiture se trouve dans un chemin dont les deux bords ne sont pas de même niveau, la voiture est inclinée; tant que son centre de gra-

vité sera assez bas pour que sa verticale tombe entre les deux roues, elle restera en équilibre; dès que, au contraire, la voiture étant mal chargée, le centre de gravité est assez haut ou assez rapproché de la roue la plus basse pour que la verticale tombe en dehors, la voiture versera. C'est pourquoi le chargement d'une voiture présente des difficultés que la routine ne parvient à vaincre qu'après de longs et coûteux tâtonnements. Tandis qu'une charrette chargée de fer ne peut être chargée en hauteur, son centre de gravité étant seulement à quelques centimètres au-dessus de son essieu, une charrette de foin peut l'être, son centre de gravité étant élevé de deux ou trois mètres, si toutefois la voiture est assez lourde par elle-même.

Il a été nécessaire de se livrer à de longues études comparatives pour arriver au type d'*omnibus* adopté aujourd'hui. Les diligences de jadis avaient la réputation, méritée d'ailleurs, de verser bien souvent; en effet, elles portaient peu de voyageurs dans l'intérieur et, sur l'impériale, de nombreux et lourds colis. On avait même imaginé des diligences dans lesquelles on chargeait les bagages sous la caisse de la voiture, afin d'éviter les accidents fréquents. Il a donc fallu prévoir, dans la construction des omnibus actuels, les cas où la voiture est entièrement vide, où son intérieur seul est chargé, où l'intérieur et l'impériale renferment des voyageurs et enfin où l'impériale seule est chargée. Le centre de gravité étant de plus en plus haut dans ces quatre cas, des accidents eussent été inévitables quand l'impériale seule est complète, si l'on n'eût habilement combiné les choses pour que le centre de gravité n'atteignît jamais une hauteur dangereuse.

## CHAPITRE II

### LOIS DE LA CHUTE DES CORPS

**HISTORIQUE.** — Dans l'Introduction de ce livre, nous déplorions les innombrables conséquences auxquelles peut entraîner une erreur scientifique; et, parlant de la nuit noire et sanglante du moyen âge, nous accusions de crimes contre les personnes, de crimes plus horribles encore contre l'intelligence humaine, l'attachement à des doctrines fausses, à des illusions religieuses, à des inepties physiques, caractéristiques de cette sombre époque.

Nous en avons un exemple dans l'histoire de la découverte des lois si importantes qui président à la chute des corps.

Le grand homme qui le premier les démontra, Galilée, dut subir à cette occasion les premières de ces persécutions qui payèrent chacune des conquêtes de son génie.

La plus célèbre de ces découvertes, celle qui reléguait dans le domaine de la Fable une terre immobile, renfermant dans ses entrailles un enfer incandescent, et au-dessus d'elle un ciel, un empyrée, peuplé d'anges, de séraphins et de bienheureux; celle qui prouvait, après Copernic, que le soleil est le centre de l'univers, et qu'autour de ce centre la Terre, humble planète, gravite comme Mercure, Vénus, Mars, Jupiter; celle qui exposait l'absurdité de cet ordre du monde révélé par la Bible, la plus grande de toutes, il la paya par la prison dans l'*in pace* du couvent de la Minerve, par la torture, par la douleur d'une rétractation arrachée à un vieillard de soixante-dix ans, soumis au supplice de la corde, du chevalet et du brodequin de fer; il la paya par l'épouvantable souffrance qui lui faisait pousser ce cri de désolation : *E pur si muove!*... « Et pourtant elle tourne!... »

Ah! maudissons ces chrétiens d'alors; bien plus que les membres de la très sainte Inquisition, Galilée croyait en Dieu, et vraies sont les paroles que lui prête le poète :

Allez, persécuteurs, lancez vos anathèmes !  
 Je suis religieux beaucoup plus que vous-mêmes.  
 Dieu, que vous invoquez, mieux que vous je le sers;  
 Ce petit tas de boue est pour vous l'univers;  
 Pour moi, sur tous les points l'œuvre divine éclate;  
 Vous la rétrécissez et, moi, je la dilate;  
 Comme on mettait des rois au char triomphateur,  
 Je mets des univers aux pieds du Créateur.

Il avait été, par grâce spéciale du saint-père, condamné, pour ce fait, à être seulement renfermé toute sa vie dans une maison d'Arcetri, avec la défense expresse de publier aucun écrit sur les sciences, et avec l'ordre formel de réciter toute l'année les sept psaumes de la pénitence, *afin qu'il eût une occupation intellectuelle*. Quelques années après, il meurt, et tout ce que l'on put trouver de ses travaux, ses observations, ses plans, ses calculs astronomiques, les manuscrits de ses expériences de physique furent détruits comme entachés d'hérésie.

Le crime qu'il avait commis en démontrant le mouvement de rotation de la terre autour du soleil avait dû être puni d'une façon exemplaire.

Celui qu'il commettait en découvrant les véritables lois de la chute des corps méritait un moindre châtement, quoiqu'on ne pût le laisser impuni : il ne contredisait point la Bible, en effet ; mais il contredisait Aristote.

Or, Aristote était le fondement de toute la science du moyen âge ; ses rêveries, ses erreurs et même les vérités qu'il avait exprimées dans ses nombreux ouvrages ayant été rendues compatibles avec les croyances catholiques. On enseignait qu' « avant la naissance d'Aristote, la nature n'était pas entièrement achevée : elle a reçu en lui son dernier accomplissement et la perfection de son être ; elle ne saurait plus passer outre ; c'est l'extrémité de ses forces et la borne de l'intelligence humaine. » Les théologiens de Cologne prétendaient qu'Aristote avait été le précurseur du Messie. Les jésuites approuvaient la croyance en la béatification du philosophe. Enfin, pour conclure, le parlement de Paris portait contre les chimistes un arrêt déclarant « qu'on ne pouvait attaquer les sentiments d'Aristote, sans attaquer la théologie scolastique reçue dans l'Église ; » et, en 1626, le même parlement bannissait trois hommes qui avaient voulu soutenir publiquement des thèses contre la doctrine d'Aristote, et faisait « défense à toute personne de publier, vendre et débiter les propositions contenues dans ces thèses, à peine de punition corporelle, et d'enseigner aucunes maximes contre Aristote, à peine de la vie. »

Aristote avait déclaré, et là il avait eu raison, que la pesanteur était un mouvement accéléré, c'est-à-dire qu'un corps acquiert d'autant plus de mouvement qu'il s'éloigne davantage du lieu où il a commencé à tomber ; cette opinion était donc autorisée au moyen âge, et le célèbre moine franciscain Duns Scot (1266-1308), le *Docteur subtil*, la soutint avec éclat dans son école à Paris. Mais, comme nous l'avons dit déjà, il mettait en opposition les corps pesants avec les corps légers, en supposant aux premiers la tendance à se diriger en bas, et aux seconds celle à se diriger en haut. Il affirmait que les différents corps tombent dans le même milieu avec une vitesse proportionnelle à leur masse, c'est-à-dire qu'un corps une fois, deux fois plus lourd qu'un autre devait tomber une fois, deux fois plus vite. Il affirmait aussi que la vitesse d'un corps qui tombe librement est proportionnelle à l'espace parcouru, c'est-à-dire qu'un corps qui, à la fin de sa chute, aurait parcouru, par exemple, un espace de 10 mètres, a acquis une vitesse dix fois plus grande que celle qu'il avait acquise après sa chute d'un mètre. Et ses disciples, au moyen âge, soutenaient ces opinions ; le fameux Baliani surtout défendait la dernière avec une certaine autorité et on désignait cette loi, prétendue naturelle, sous le nom de *loi de Baliani*.

C'est pourquoi terribles furent les persécutions qui accueillirent l'au-

dacieux Galilée, attaquant par le raisonnement et par l'expérience ces lois du maître considéré comme infaillible !

Né à Pise (d'autres disent à Florence) en 1564, d'une famille noble, mais pauvre, Galilée avait été destiné par son père à la médecine ; mais il

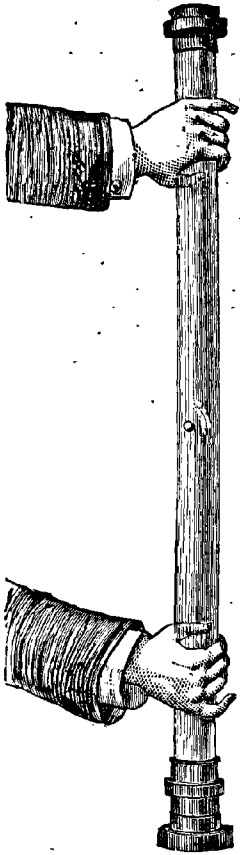


Fig. 47.

avait bientôt abandonné cette étude pour les sciences mathématiques et physiques vers lesquelles l'entraînait une irrésistible vocation. Il s'y montra bientôt tellement supérieur que les Médicis le firent nommer, dès l'âge de vingt-quatre ans, professeur de mathématiques à l'université de Pise, la plus fameuse alors de l'Italie.

Ce fut là que, en 1589, il porta le premier coup aux croyances officielles, en soutenant publiquement la thèse suivant laquelle *tous les corps, de quelque forme et de quelque grandeur qu'ils soient, arrivent en même temps au sol quand ils tombent de la même hauteur.*

C'est là la première des lois relatives à la chute des corps.

**1<sup>re</sup> LOI DE LA CHUTE DES CORPS.** — Pour mettre en évidence cette vérité, Galilée façonna de petites boules de terre de substances diverses et les laissa tomber en même temps du sommet de la coupole de la cathédrale de Pise. Ces boules vinrent toucher le sol presque en même temps. Il les déforma de manière à donner à chacune des surfaces très inégales : elles tombaient alors avec des vitesses très différentes. Il conclut de ces expériences que la pesanteur agissait avec la même intensité sur tous les corps ; que, seule,

la résistance de l'air retardait la chute de ceux qui offraient une surface plus grande à cette résistance, et que, dans le vide, tous les corps tomberaient avec la même vitesse.

Il n'était point permis à Galilée de présenter une expérience plus décisive, plus claire que celle qu'il présentait ; la machine à produire le vide, la machine pneumatique, n'était pas encore inventée de son temps. Newton réalisa cette expérience après laquelle il n'est plus possible de conserver un doute. On a un tube de 1<sup>m</sup>,50 à 2 mètres de longueur (fig. 47), dont une extrémité est garnie d'une armature de cuivre se vissant



sur le plateau de la machine pneumatique. On enlève l'air contenu dans le tube, puis on ferme le robinet pour en empêcher la rentrée; on enlève ensuite celui-ci du plateau de la machine pneumatique. On a eu soin de

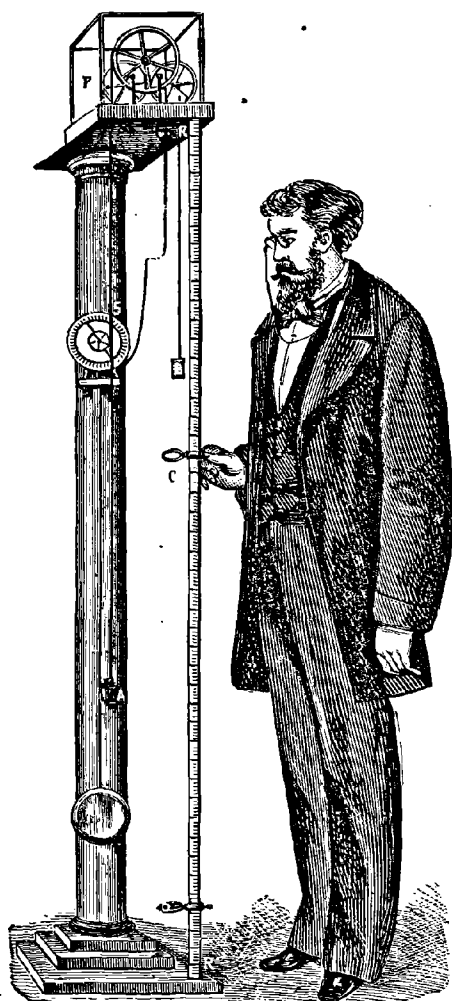


Fig. 48. — MACHINE D'ATWOOD.



Fig. 49. — APPAREIL DE M. MORIN.

placer dans le tube des corps de densités très inégales, des morceaux de plomb, une plume, un bout de papier. Renversant alors brusquement le tube de haut en bas, on voit arriver en même temps à l'autre extrémité les différents corps. Si on laisse entrer l'air dans le tube, les corps les plus

légers se laisseront de nouveau devancer par les plus lourds, et ces différences augmenteront jusqu'à ce que l'air soit dans le tube identique à l'air extérieur, c'est-à-dire ayant une même densité.

Il s'est trouvé un écrivain, le fameux abbé Delille, pour chanter en vers cette expérience.

. . . Des corps tombants à qui l'air fait passage,  
 Sa fluide épaisseur ralentit le voyage.  
 Ainsi qu'en pesanteur, en vitesse inégaux,  
 Tous, d'un cours différent, ils traversent ses flots ;  
 Mais tous, d'un mouvement également rapide,  
 Lorsque l'air est absent, retombent dans le vide ;  
 Et le métal pesant, et la plume sans poids,  
 Au terme du voyage arrivent à la fois.

La résistance de l'air seule, en effet, empêche les corps de tomber tous avec la même vitesse. Ainsi deux mêmes corps, deux feuilles de papier, par exemple, ayant même poids ne tombent pas à terre avec la même vitesse si l'une est froissée et roulée en boule et l'autre laissée dans toute son étendue. Un rond de papier de la grandeur d'un sou ne tombe pas à terre aussi vite que le sou ; placez-le contre le métal, au-dessus, la résistance de l'air est annihilée : papier et métal tombent en même temps. C'est la résistance de l'air qui permet à l'oiseau de voler, c'est-à-dire de combattre la loi de la pesanteur. En faisant effort sur l'air avec ses ailes, il s'élève ; en les déployant horizontalement ainsi que la queue, il plane ; en supprimant le plus possible la résistance de l'air, quand il ferme ses ailes et baisse la tête, il descend vers le sol. C'est en utilisant la résistance de l'air que l'on construit les *parachutes*, appareils presque abandonnés aujourd'hui, dont néanmoins nous parlerons plus tard, et qui étaient destinés à permettre aux aéronautes d'effectuer leur descente en abandonnant leur ballon. Le parachute se compose d'une pièce d'étoffe très solide, généralement en soie vernissée, ayant la forme d'un parapluie, au contour de laquelle se trouvent attachées des cordes supportant une nacelle. L'aéronaute voulant descendre ouvre l'appareil ; l'air s'engouffre sous l'appareil qui se déploie et, exerçant une résistance énorme, lui permet de descendre lentement. Pour éviter que l'air ne se dégage par les côtés et n'imprime ainsi au parachute des secousses dangereuses, un trou central établit un courant d'air et le maintient en équilibre.

C'est encore à cette même résistance de l'air qu'est due la dissémination des liquides tombant dans l'atmosphère, que la pluie nous arrive à l'état de gouttes et non en masses compactes.

Certes, il est très beau de s'écrier avec Fénelon : « Voyez-vous ces nuages qui volent comme sur les ailes des vents? S'ils tombaient tout à coup par de grosses colonnes d'eau rapides comme des torrents, ils submergeraient et détruiraient tout dans l'endroit de leur chute, et le reste des terres demeurerait aride. Quelle main les tient dans ces réservoirs suspendus et ne leur permet de tomber que goutte à goutte, comme si on les distillait par un arrosoir? » Mais, au lieu d'une stupéfaction inconsciente, n'est-il pas bon de se rappeler que la résistance de l'air brise seule ces masses liquides?

Dans le vide, en effet, les liquides tombent comme un corps solide; exemple le *marteau d'eau*, qui est un tube contenant de l'eau dont on a chassé l'air par l'ébullition du liquide et que l'on a ensuite fermé hermétiquement. En retournant le marteau d'eau, on voit l'eau qu'il contient venir frapper en masse le fond du tube avec bruit.

Galilée avait trouvé cette première loi : *Tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse.*

**2° ET 3° LOIS DE LA CHUTE DES CORPS.** — Galilée, disons-nous, avait prouvé, autant que cela pouvait se faire alors, que les corps tombaient dans le vide avec la même vitesse. Il arrachait ainsi une des pierres de l'édifice théologico-aristotélique; il fut donc puni. On l'obligea, en 1592, de quitter sa chaire de mathématiques à l'université de Pise; afin même d'éviter de plus grands châtimens à cause de son génie, il dut fuir la ville. La république de Venise, indulgente, lui offrit de professer la physique à Padoue. Véritablement incorrigible, ou, pour nous servir des expressions mêmes du *Dictionnaire de théologie* de Bergier, livre classique catholique, « véritablement entêté, trop pétulant, extrêmement emporté, plein de vanité, faisant plus de cas de son opinion que de celle de ses amis, » il persista dans ses idées, envers et contre tous; bien plus, il les appuya de nouvelles expériences, et, en 1602, il avait trouvé les deux autres lois relatives à la chute des corps. Malgré les efforts des partisans d'Aristote, les néo-péripatéticiens, malgré les objections des disciples de Descartes, les cartésiens, malgré les appuis que trouvaient ses ennemis, il put même consigner ses observations, ses expériences et ses découvertes dans son livre : *Discours et démonstration mathématique relatifs à deux nouvelles sciences se rapportant à la mécanique et aux mouvements* (Leyde, 1638, in-4°). Il ne fut cependant point pour cela châtié temporellement; il fallut que, plus tard, il fit déborder la mesure, en démontrant la rotation de la terre autour du soleil, pour que cessât l'indulgence dont il avait abusé certainement

Les deux lois qu'il avait découvertes s'énoncent ainsi :

2° loi (loi des espaces). *Les espaces parcourus par un corps qui tombe librement dans le vide croissent proportionnellement aux carrés des temps employés à les parcourir, à partir de l'origine du mouvement.*

3° loi (loi des vitesses). *Les vitesses acquises par un corps qui tombe librement dans le vide croissent proportionnellement aux temps écoulés depuis le commencement de la chute.*

Nous dirons un peu plus loin par suite de quelles considérations mathématiques, et, après quelles expériences, Galilée put confirmer les hypothèses de son génie. Il s'appuyait sur des principes que nous n'avons pas encore vus; nos explications seraient donc peu comprises.

D'ailleurs, on démontre expérimentalement les deux lois relatives à la chute des corps au moyen de la *machine d'Atwood* (1) et de l'*appareil de M. Morin* (2).

La machine d'Atwood se compose d'une poulie P (*fig. 48*) très légère et tournant très facilement autour de son axe. Sur la gorge de cette poulie est un fil de soie très fin, soutenant à chacune de ses extrémités des poids A, B, égaux, qui se font équilibre dans toutes les positions, le poids du fil pouvant être considéré comme nul. Une règle verticale RR' est placée parallèlement au fil et porte deux curseurs C et D. Le curseur C a la forme d'un anneau dont l'ouverture est juste suffisante pour laisser passer le poids B; le curseur D est plat et sert à arrêter le poids B après un temps donné. Une horloge à secondes S est fixée à l'appareil.

Pour détruire l'équilibre des poids A et B, on a une petite masse additionnelle M, bien plus légère que les poids A et B, mais ayant une forme allongée, qui l'empêche de passer à travers l'anneau du curseur C.

Or, il est évident que la petite masse M, placée sur le poids B, et forcée d'entraîner dans sa chute les masses A et B, tombera moins vite que si elle était seule. Il est facile de déterminer par le calcul le ralentissement de sa vitesse. Soit  $v$  la vitesse acquise par M après une seconde de chute libre, sa quantité de mouvement sera le produit  $Mv$ . Soit encore  $v'$  la vitesse acquise également après une seconde de course par les deux

(1) ATWOOD (Georges), physicien anglais, professeur à l'université de Cambridge, né en 1746, mort en 1807. A laissé de nombreux travaux sur la physique, entre autres une *Théorie du mouvement des balanciers des horloges*.

(2) MORIN (Arthur-Jean) [1801-1880], général de division d'artillerie, directeur du Conservatoire des arts et métiers, membre de l'Institut. Il est, avec le général Poncelet, un des savants qui ont le plus contribué aux progrès de la mécanique expérimentale.

masses A et B entraînées par M; la quantité de mouvement étant la même, on aura l'équation :

$$(A + B + M) x = Mv,$$

d'où

$$x = \frac{Mv}{A + B + M}.$$

Supposons M l'unité et chacun des poids A et B = 12, on aura :

$$x = \frac{v}{12 + 12 + 1} = \frac{v}{25},$$

c'est-à-dire que la vitesse du système sera 25 fois plus petite que si la masse M tombait seule. La force qui produit le mouvement du système est donc diminuée, relativement à celle qui produit la chute libre, dans un rapport constant, et, par conséquent, les lois du mouvement observé seront bien celles de la chute libre.

Ce principe étant posé, pour observer la loi des espaces on se sert seulement du curseur D. Si, dans une seconde, le chemin parcouru par le poids B, surmonté de la petite masse M, est de 1 décimètre, on constatera, en plaçant le curseur successivement aux distances 4, 9, 16... décimètres, que le mobile arrive au terme de sa course au bout de 2, 3, 4 secondes, ce qui prouve que les espaces parcourus *croissent proportionnellement au carré des temps*.

Si l'on appelle K l'espace parcouru pendant la première unité de temps, l'espace  $e$ , parcouru pendant le temps  $t$ , sera donc donné par la formule :

$$e = Kt^2 \quad (1).$$

Pour observer la loi des vitesses, on dispose le curseur C de façon à retenir la petite masse M supplémentaire quand le poids B traversera l'anneau. Ce poids B, ainsi soustrait à l'action de la pesanteur, se meut alors en vertu de la vitesse acquise et parcourt, pendant la seconde suivante, *un espace double* de celui qu'il a parcouru dans la première. Si on place ensuite C de façon à retenir M, après deux secondes de chute on constate que la vitesse acquise est double, après trois secondes triple, etc., ce qui démontre que les vitesses acquises par un corps qui tombe sont *proportionnelles aux temps pendant lesquels il est tombé*.

Dans la formule (1) ci-dessus, nous avons appelé K l'espace parcouru pendant la première unité de temps; la vitesse acquise est donc 2K, et,

par conséquent, la vitesse acquise au bout du temps  $t$  est donnée par cette formule :

$$V = 2Kt \text{ (2).}$$

L'appareil de M. Morin (*fig. 49*), dont la première idée est due au général Poncelet (1), se compose d'un cylindre en bois C de 3 mètres de hauteur et 1 mètre de circonférence, animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe vertical A d'une manière uniforme, lorsque tombe un poids P', suspendu à un cordon qui s'enroule sur un petit treuil horizontal, lequel porte une roue dentée R, engrenant à la fois, par une vis sans fin, avec l'axe du cylindre C et avec l'axe d'un volant V, muni de quatre ailettes. Un mobile P en plomb, cylindro-conique, afin que cette forme, jointe au peu de durée de la chute, permette de négliger l'effet de la résistance de l'air, est retenu en haut de l'appareil par une pince à déclic et peut tomber en chute libre quand on tire sur une mannette. Ce mobile P porte un pinceau imbibé d'encre de Chine, dont la pointe appuie légèrement sur une feuille de papier tendue sur la surface du cylindre et qui porte, tracées d'avance, un certain nombre d'arêtes équidistantes.

Les poids P et P' étant placés en haut de l'appareil, on rend libre d'abord le poids P' en tirant la mannette; celui-ci fait tourner la roue dentée R, qui met en mouvement le cylindre C et le volant V. Le mouvement du cylindre se régularise, grâce au volant, selon ce que nous avons indiqué ci-dessus (page 63). Alors on rend libre le poids P, qui tombe le long du cylindre, guidé dans sa chute par deux fils verticaux traversant les deux oreilles dont ce mobile est muni, et qui marque la trace de son passage au moyen du pinceau horizontalement placé dont nous avons parlé.

Cette trace serait une verticale si le cylindre était immobile; ce serait une circonférence horizontale si, le cylindre tournant, le mobile restait fixe; mais, par suite des deux mouvements, cette trace est une courbe dont les éléments s'obtiennent à chaque instant en composant le mouvement horizontal du cylindre avec le mouvement vertical du pinceau. Cette courbe porte, en géométrie, le nom de *parabole*; c'est la ligne qui résulte de la section d'un cône par un plan parallèle à l'un de ses côtés.

(1) PONCELET (Jean-Victor), né à Metz en 1788, mort en 1867; officier d'artillerie, fit la campagne de Russie et, prisonnier, il charme les ennuis de sa captivité par des études de géométrie descriptive. Rentré en France en 1816, il est nommé successivement professeur de mathématiques à l'École d'application, membre de l'Institut, professeur à la Faculté des sciences de Paris et au Collège de France. Ses travaux sur l'hydraulique ont rendu de grands services à l'industrie, particulièrement par son invention d'une roue à aubes courtes qui porte son nom.

Déroulons la feuille de papier qui recouvrait le cylindre et étendons-la (*fig. 50*).

La ligne courbe *ap*, tracée sur le papier, a rencontré les arêtes verticales et équidistantes aux points *q, r, s, p*. Abaissons de ces points des perpendiculaires sur l'arête *ak*. Si nous prenons pour unité de temps le temps qu'a mis la ligne *bl* pour prendre la place de *ak* quand le cylindre tournait, *af* sera l'espace parcouru dans une unité de temps par le poids *P*, et, puisque les lignes verticales sont équidistantes, *ag* sera l'espace parcouru dans 2 unités de temps, *ah* dans 3 unités de temps, etc. Or, en mesurant ces distances *af, ag, ah, ak*, nous voyons que

$$\begin{aligned} ag &= 4 af \\ ah &= 9 af \\ ak &= 16 af. \end{aligned}$$

Donc les espaces parcourus par un corps tombant en chute libre et comptés à partir de l'origine du mouvement croissent proportionnellement aux carrés des temps employés à les parcourir.

L'appareil de M. Morin ne peut, comme la machine d'Atwood, démontrer expérimentalement la loi des vitesses; on ne peut déduire cette loi que par raisonnement.

Puisque le poids *P* a parcouru *af* dans la première unité de temps, il a donc parcouru  $4af - 1af = 3af$  dans la seconde unité de temps;

$9af - (1af - 3af) = 5af$  dans la troisième;

$16af - (1af - 3af - 5af) = 7af$  dans la quatrième unité de temps, etc.

Or, sans la vitesse acquise au bout de chaque unité de temps, le poids *P* ne parcourrait évidemment que la distance constante *af*; donc sa vitesse acquise est la différence entre ce qu'il parcourt avec elle et ce qu'il parcourrait sans elle, soit :

Dans la 2 <sup>e</sup> unité de temps.....	$3af - af = 2af.$
Dans la 3 <sup>e</sup> unité de temps.....	$5af - af = 4af.$
Dans la 4 <sup>e</sup> unité de temps.....	$7af - af = 6af.$

C'est-à-dire que les vitesses acquises sont entre elles comme 2, 4, 6, etc.,

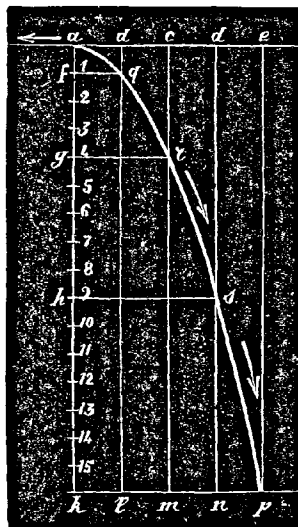


Fig. 50. — COURBE DÉCRITE PAR L'APPAREIL DE M. MORIN.

ou proportionnelles aux temps écoulés à partir du commencement de la chute.

Cette quantité  $2af$ , dont la vitesse augmente pendant chaque unité de temps, est ce qu'on nomme l'*accélération due à la pesanteur*. En prenant la seconde pour unité de temps, cette quantité, désignée habituellement par la lettre  $g$ , est appelée l'*intensité de la pesanteur*.

Nous verrons tout à l'heure que :

A l'équateur.....	$g = 9^m,78103$
A Paris.....	$g = 9^m,80896$
Aux pôles.....	$g = 9^m,83109$

## CHAPITRE III

### PEN D U L E

**DÉFINITIONS.** — On désigne sous le nom de *pendule* tout appareil composé d'un corps pesant suspendu à l'extrémité inférieure d'une tige rigide, dont l'extrémité supérieure est attachée à un point fixe autour duquel elle puisse se mouvoir.

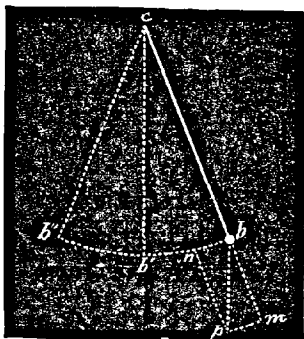


Fig. 51. — MOUVEMENT OSCILLATOIRE DU PENDULE.

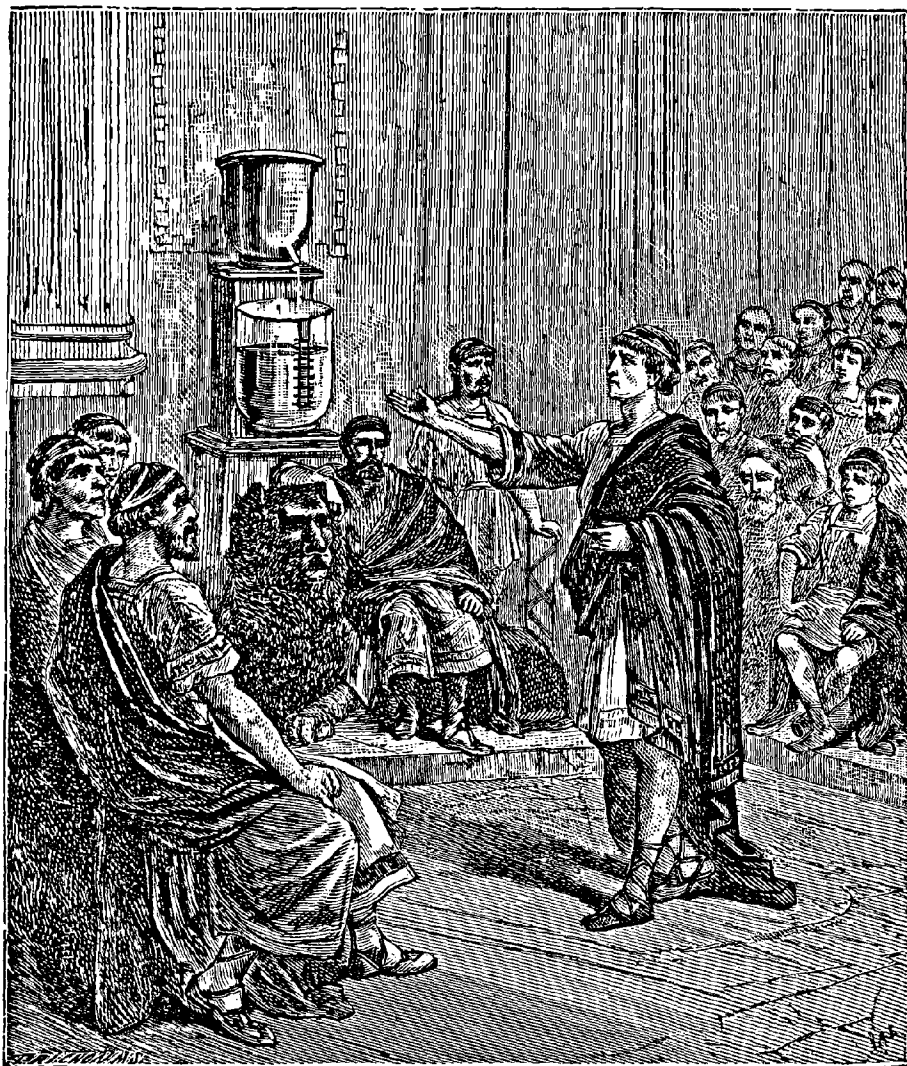
Abandonnée à elle-même, cette tige prend évidemment la direction de la verticale.

Si on l'écarte de cette direction, elle tend à y revenir, en vertu de la pesanteur, après avoir dépassé plusieurs fois de part et d'autre la verticale et avoir accompli une série de mouvements de va-et-vient auxquels on a donné le nom d'*oscillations*.

Ainsi, soit (*fig. 51*) un point matériel  $b$  suspendu à l'extrémité d'une tige  $cb$ , fixée en  $c$ . Sous l'influence de la pesanteur, la ligne  $cb$  resterait en équilibre dans la position verticale  $cb'$ , comme le fil à plomb. Si on l'écarte pour mettre le point matériel en  $b$ , son poids  $p$  se décompose en deux forces, l'une  $bm$  dirigée suivant le prolongement du fil  $cb$  et qui est détruite par la résistance



du point  $c$ , l'autre  $nb$  perpendiculaire au fil  $cb$ , qui, agissant seule, sollicite le pendule à revenir en équilibre en  $cb'$ . Le point  $b$  parcourt donc avec une vitesse croissante l'arc  $bb'$ , puis s'élève en  $b''$ , en vertu



A Athènes la Clepsydre était gardée par un lion d'airain... (page 128).

de la vitesse seconde, pour redescendre aussitôt en  $b'$ , remonter en  $b$  et continuer ainsi une série d'*oscillations*, dont l'*amplitude* est mesurée par l'arc  $b''b'$ .

Les deux arcs  $b''b'$  et  $bb'$  sont continuellement égaux en théorie;

mais l'expérience démontre que cette amplitude est décroissante dans l'air; que le frottement qui se produit toujours au point *c* de suspension, que surtout la résistance du fluide amortissent rapidement les oscillations. Et plus le fluide est dense, plus il offre de résistance, plus promptement cessent les oscillations, fait qui peut se vérifier facilement en faisant osciller un pendule dans l'air, puis dans l'eau.

**LOIS DU MOUVEMENT DU PENDULE.** — Les mouvements du pendule sont soumis aux quatre lois suivantes :

1<sup>re</sup> LOI. *Pour un même pendule et dans le même lieu, la durée des oscillations, dont l'amplitude ne dépasse pas 3 degrés, est constante, c'est-à-dire que ces oscillations s'exécutent dans des temps égaux et sont ainsi appelées ISOCHRONES (du grec isos, égal; chronos, temps).*

2<sup>e</sup> LOI. *Pour des pendules de même longueur et dans le même lieu, la durée de l'oscillation est indépendante du volume et de la nature de la substance du pendule.*

3<sup>e</sup> LOI. *Pour des pendules de longueurs différentes, dans le même lieu, les durées des oscillations sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs des pendules.*

4<sup>e</sup> LOI. *Pour des pendules de même longueur, oscillant en différents lieux de la terre, les durées des oscillations sont en raison inverse des racines carrées des intensités de la pesanteur dans ces différents lieux.*

Nous avons dit par quel hasard le génie de Galilée fut mis sur la voie de ses fameuses découvertes relatives au pendule (page 31); nous avons remarqué que, partant de cet axiome fondamental : « *Il n'y a pas d'effet sans cause,* » le célèbre physicien, le premier, pratiquait cette méthode expérimentale, fondement de la science moderne, qu'avait d'abord exposée et développée Bacon. Nous avons enfin décrit la série d'expériences auxquelles il s'était livré avant de démontrer définitivement ces lois. Il nous reste à les formuler mathématiquement.

Soit *t* la durée d'une oscillation d'un pendule dans le vide, *l* la longueur du pendule, *g* l'intensité de la pesanteur et  $\pi$  le rapport de la circonférence au diamètre; on a, en appliquant le calcul au mouvement du pendule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1)$$

Cette formule ne contenant ni l'amplitude de l'oscillation, ni la densité de la substance du pendule, la valeur de *t* est indépendante de de ces deux quantités et la 1<sup>re</sup> et la 2<sup>e</sup> loi s'en déduisent immédiatement.

Pour la 3<sup>e</sup> loi, supposons un second pendule d'une longueur  $l'$  et appelons  $t'$  la durée d'une oscillation de ce second pendule; nous aurons comme tout à l'heure :

$$t' = \pi \sqrt{\frac{l'}{g}}.$$

La valeur de  $g$  reste la même, puisque, pour les deux pendules, les oscillations se font dans le même lieu. Divisant les deux égalités ci-dessus l'une par l'autre, en supprimant les facteurs communs, on aura :

$$\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l'}}. \quad (2)$$

Donc, en un même lieu, les durées des oscillations sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs des pendules.

Enfin, pour la 4<sup>e</sup> loi, appelons  $g'$  l'intensité de la pesanteur dans le lieu autre de la terre où nous faisons osciller le pendule et  $t''$  la durée d'une oscillation; on aura, en appliquant la formule (1) :

$$t'' = \pi \sqrt{\frac{l}{g'}}.$$

Divisant les deux égalités (1) et (3) l'une par l'autre, en supprimant les facteurs communs, nous trouverons :

$$\frac{t}{t''} = \frac{\sqrt{g'}}{g};$$

d'où l'on voit qu'en différents lieux de la terre les durées des oscillations d'un même pendule ou de deux pendules de même longueur sont en raison inverse des racines carrées des intensités de la pesanteur en ces différents lieux.

**PENDULE SIMPLE ET PENDULE COMPOSÉ.** — Toutes les lois que nous venons d'exprimer s'appliquent au *pendule simple*, pendule idéal; mais elles s'appliquent également au *pendule composé*, évidemment le seul réalisable dans la pratique. Il y a toujours, en effet, un pendule simple qui a le même mouvement qu'un pendule composé; il s'agit seulement de bien déterminer ce que l'on entend par la longueur du pendule.

Nous nous expliquons.

Le *pendule simple* serait formé d'un point matériel pesant, suspendu par un fil rigide, inextensible, impondérable et oscillant sans frottement autour de son extrémité supérieure.

Le *pendule composé* est, en général, suspendu par un axe horizontal, autour duquel il oscille. Or, ses points les plus rapprochés de l'axe de suspension tendent, d'après la 3<sup>e</sup> loi des mouvements pendulaires énoncée ci-dessus (page 114), à osciller très vite; ceux, au contraire, qui sont éloignés de l'axe tendent à osciller très lentement; de sorte qu'il existe un point intermédiaire qui oscille comme s'il était seul, c'est-à-dire comme un pendule simple qui aurait pour longueur la distance de ce point à l'axe de suspension. Ce point est appelé *centre d'oscillation*, et l'on nomme la longueur du pendule composé la distance de ce point, *centre d'oscillation*, à l'axe de suspension. C'est précisément la longueur du pendule simple qui ferait le même nombre d'oscillations que le pendule composé considéré et que l'on désigne, pour cette raison, sous le nom de *pendule simple synchrone* (du grec *sun*, avec; *chronos*, temps) ou *isochrone*.

**INTENSITÉ DE LA PESANTEUR.** — Nous avons vu ci-dessus (page 112) que l'intensité de la pesanteur, habituellement désignée par la lettre *g*, était la *valeur en nombre de la vitesse acquise au bout d'une seconde par un corps tombant librement dans le vide*, ou, en d'autres termes, *l'accélération communiquée par la pesanteur à un corps qui tombe*.

Pour trouver, en un endroit quelconque, la valeur en nombre de *g*, c'est-à-dire l'intensité de la pesanteur, la machine d'Atwood ou l'appareil de M. Morin seraient théoriquement suffisants; mais le pendule offre un moyen bien plus simple.

Prenons la formule (1) que nous avons trouvée (page 114)

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

et élevons ses deux termes au carré, nous avons :

$$t^2 = \frac{\pi^2 l}{g};$$

d'où nous tirons la valeur de *g*,

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2}.$$

Il suffit donc de mesurer exactement, ou le plus approximativement possible, la durée *t* d'une oscillation dans le lieu où l'on

cherche la valeur numérique de  $g$ , et de connaître avec la plus grande précision la longueur  $l$  du pendule que l'on observe.

Cette formule a été démontrée expérimentalement par Borda (1), lors de l'établissement du système métrique, et les expériences ont été reprises par Biot (2) et Mathieu (3) de notre temps, sur la Méditerranée.

Voici comment procédaient ces physiciens.

Borda, voulant se rapprocher le plus possible des conditions du pendule simple, du pendule idéal, établissait son pendule (*fig. 52*) avec une sphère très grosse et d'un métal très dense, le platine, afin d'abord que la résistance de l'air altérât peu les mouvements du pendule, puis pour que le poids du fil fût peu appréciable et que le pendule *synchrone* du pendule employé eût ainsi presque précisément pour longueur la distance du centre de la sphère à l'axe de suspension. De plus, le fil était attaché à une calotte sphérique du même diamètre intérieur que celui de la sphère, calotte façonnée de telle façon qu'en plaçant la sphère dans la calotte, le contact était si parfait que l'air ne pénétrait point entre les deux surfaces et que seule la pression atmosphérique les maintenait l'une contre l'autre. Ce fil était attaché par le haut à un couteau, reposant sur deux couteaux d'agate polis, parfaitement horizontaux, afin que le frottement fût très faible, et fixés à une muraille par des potences en fer.

A cette même muraille (*fig. 53*) est appliquée une horloge bien réglée, enfermée dans une armoire de verre. Une seconde armoire de verre contient celle où est l'horloge, et entre les deux glaces est le pendule. Le balancier porte un repère R, généralement un trait noir sur une petite plaque blanche. A l'état de repos, le fil du pendule et ce trait noir sont juste en



Fig. 52.  
PENDULE  
DE BORDA.

(1) BORDA (Jean-Charles), né à Dax (Landes) en 1733, mort en 1799, d'abord employé dans l'administration de la marine, fit un grand nombre de travaux relatifs à l'art nautique, fut capitaine de vaisseau et accompagna La Pérouse dans son voyage de circumnavigation, puis se livra entièrement à la science pure et devint membre de l'Académie des sciences. Outre les découvertes que lui doivent les sciences physiques, il a laissé une Carte exacte des îles Canaries, des relations de voyages, etc.

(2) BIOT (Jean-Baptiste), célèbre mathématicien et physicien français (1774-1862), d'abord officier d'artillerie, puis élève de l'École polytechnique, professeur de sciences à Beauvais, professeur de physique générale et de mathématiques au Collège de France, astronome à l'Observatoire, membre du Bureau des longitudes, de l'Académie des sciences et de l'Académie française. Nous avons déjà parlé de sa mission en Espagne pour mesurer, avec Arago, l'arc du méridien terrestre. Ses ouvrages sont très nombreux et touchent à toutes les questions de physique et de mathématiques.

(3) MATHIEU (Claude-Léon), né à Mâcon en 1783, mort à Paris en 1865, était fils d'un menuisier. A force de travail et de volonté, il entra à l'École polytechnique, fut nommé ingénieur en 1805,

face l'un de l'autre, si on regarde d'une distance d'une dizaine de mètres avec une lunette immobile et dirigée perpendiculairement au mur.

Si l'on met le pendule et le balancier de l'horloge en mouvement en même temps, il est clair que le fil du pendule et le trait du balancier arri-

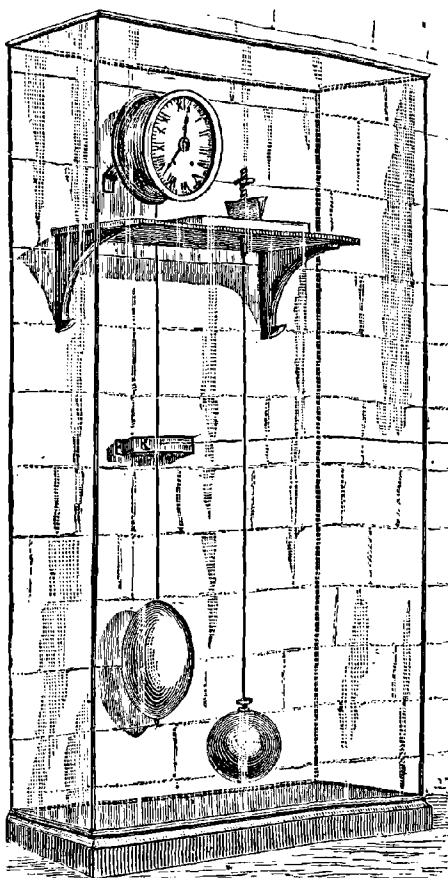


Fig. 53. — APPAREIL DE BORDA.

veront ensemble dans la verticale; mais comme il est, pour ainsi dire, impossible de les mettre en mouvement en même temps, on attend une première fois qu'il y ait *coïncidence*, ce que l'on constate au moyen de la lorgnette. Bientôt ils commencent à se quitter, et il arrive un moment où le pendule, par exemple, est au haut de son arc *d'amplitude*, tandis que le balancier de l'horloge est dans la verticale; le pendule avance alors d'un quart d'oscillation. Puis le balancier et le pendule se retrouvent à la verticale, mais marchant en sens contraire. Le pendule avance d'une demi-oscillation. Enfin, après avoir gagné de la même façon une autre demi-oscillation, le pendule et le balancier se retrouvent dans la verticale, marchant dans le même sens. Or, à chaque nouvelle *coïncidence* semblable, le pendule a gagné une avance entière d'oscillation sur le balancier.

Soit alors  $T$  le temps (exprimé en secondes) pendant lequel on a observé  $n$  coïncidences.

Supposons de plus que le balancier batte la seconde, c'est-à-dire fasse une oscillation complète en deux secondes. Entre deux *coïncidences*, le balancier a donc effectué  $\frac{T}{2n}$  oscillations, et le pendule  $\frac{T}{2n} + 1$ . Donc, dans le temps  $T$ , il y a eu  $n \left( \frac{T}{2n} + 1 \right)$  oscillations complètes; d'où l'on peut dé-

puis successivement secrétaire du Bureau des longitudes, astronome à l'Observatoire de Paris, membre de l'Institut. Il était le beau-frère d'Arago, et, comme celui-ci, fut élu député en 1834 et en 1848. Ses rapports sur les chemins de fer, sur la loi du système métrique obligatoire et sur un grand nombre de sujets scientifiques, l'avaient fait remarquer. Il va sans dire qu'il était républicain.

duire la durée d'une oscillation complète, et, en mesurant la longueur du pendule, la valeur de  $g$ .

Nous avons déjà donné ces chiffres. Cette valeur est :

A l'équateur.....	$g = 9^m,78103$
A Paris.....	$g = 9^m,80896$
Aux pôles.....	$g = 9^m,83109$

En faisant usage des formules que la mécanique fait connaître sur ce sujet, on a pu également déterminer la longueur du pendule. Celui qui bat la seconde est :

A l'équateur.....	$l = 994^{mm},03$
A Paris.....	$l = 993^{mm},90$
Aux pôles.....	$l = 996^{mm},49$

On peut aussi, pour trouver exactement cette longueur, utiliser la réciprocité des axes de suspension et d'oscillation en se servant du pendule dit *reversible*, dont la première idée appartient à de Prony (1). Il y a, dans l'appareil, deux couteaux de suspension : l'un d'eux est fixe, l'autre est mobile et peut être arrêté aux différents points d'une rainure, sur les bords de laquelle se trouve une graduation. Après avoir fait osciller le pendule autour du premier axe, on le fait osciller autour du second, et on fait varier la position de celui-ci jusqu'à ce que la durée de l'oscillation soit la même. La longueur du pendule simple est alors la distance qui sépare les *arêtes des deux couteaux*.

**VARIATIONS DE L'INTENSITÉ DE LA PESANTEUR.** — Deux causes principales expliquent l'augmentation que l'on remarque dans l'intensité de la pesanteur de l'équateur aux pôles : 1° l'aplatissement du globe terrestre aux pôles ; 2° la force centrifuge.

En effet, les points situés à l'équateur sont plus éloignés du centre de la terre que ceux qui sont aux pôles ; conséquemment, la force d'attraction est moins grande, puisque (page 85) *la force d'attraction varie en raison inverse du carré des distances*.

(1) PRONY (Gaspard RICHÉ, baron de), membre de l'Académie des sciences, né à Chamelet, près de Lyon, en 1755, mort en 1839, fut chargé par la Convention d'établir les tables de logarithmes suivant le système décimal. Professeur à l'École polytechnique dès la création de cette école, il exécuta d'admirables travaux en Italie, améliora les ports de Gênes, d'Ancône, de Venise ; s'occupa de prévenir les débordements du Rhône (1827) et fut, en récompense, créé baron par Charles X. Il a laissé des ouvrages remarquables, parmi lesquels il faut citer une *Description des Marais Pontins*, qu'il avait tenté de dessécher.

Deuxièmement, nous avons formulé (page 79) cette loi à laquelle est soumise la force centrifuge : *L'intensité de la force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse.* Or la terre, dans son mouvement de rotation sur elle-même, engendre une force centrifuge dont l'intensité est sans contredit plus grande à l'équateur qu'aux pôles, attendu que les rayons des cercles parallèles à l'équateur sont le plus grands possible à ce point et nuls aux pôles. Cette force centrifuge à l'équateur est de  $\frac{1}{289}$  de la pesanteur.

Remarquons que 289 est le carré de 17, et, comme la force centrifuge varie proportionnellement au carré de la vitesse, on en conclut que, si la terre tournait dix-sept fois plus vite, à l'équateur les corps n'auraient pas de poids.

A mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, d'une part la force centrifuge diminue, d'autre part elle n'est plus directement opposée à la pesanteur et ne diminue celle-ci que d'une partie de sa valeur. Pour cette double raison, la pesanteur doit être moins diminuée ; il est donc bien démontré que la pesanteur décroît.

La force centrifuge, d'ailleurs, n'influe pas seulement sur l'intensité de la pesanteur, elle modifie sa direction. L'angle que fait la verticale réelle avec la verticale qui serait, si la terre était immobile, varie d'une latitude à l'autre ; à Paris, où sa valeur est à peu près maximum, elle est de 5 à 6 minutes.

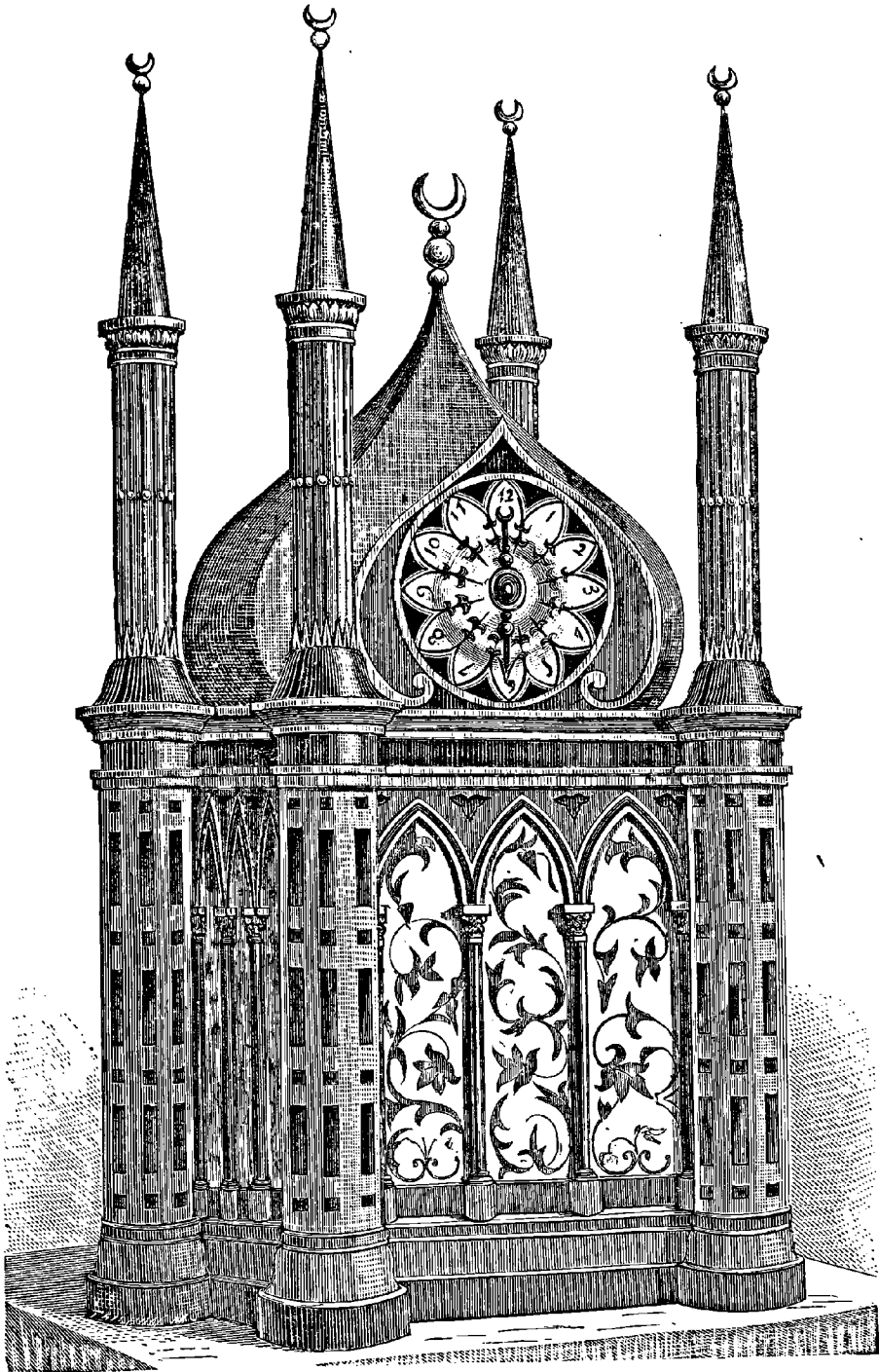
De même, quand on s'élève, la pesanteur diminue et le nombre des oscillations du pendule aussi. Bouguer (1) reconnut que le pendule, battant la seconde au Pérou, avait une longueur de 0<sup>m</sup>,99076 au niveau de la mer, et seulement 0<sup>m</sup>,98963 sur le Pichincha, à 4,750 mètres d'altitude.

Un aéronaute pèse moins à une grande hauteur qu'il ne pèse à terre, puisqu'il est moins attiré ; s'il pouvait s'élever assez haut, il finirait par ne plus peser du tout. Cependant, il ne faudrait pas croire que, placé dans le plateau d'une balance, il verrait s'incliner le fléau au fur et à mesure qu'il monterait ; il ne constaterait aucun déplacement appréciable de la balance. S'il diminue de poids en s'élevant, les poids qui lui feraient équilibre dans l'autre plateau diminueraient proportionnellement, et l'équilibre ne serait pas modifié.

Si l'on pénètre dans l'intérieur du globe, la loi de l'action que subit

(1) BOUGUER (Pierre), membre de l'Académie des sciences, né au Croisic en 1698, mort à Paris en 1758. Il fut chargé en 1736, avec La Condamine et Godin, d'aller à l'équateur, afin de déterminer la grandeur et la figure de la terre. Il a laissé de nombreux et précieux travaux relatifs à l'astronomie et à l'art nautique.





Horloge offerte par le calife Aroun-al-Raschid à Charlemagne (page 130).



le corps devient plus complexe. Si la terre était d'une matière homogène, l'attraction devrait diminuer d'une manière continue; mais la densité du globe va en croissant à mesure qu'on avance. Cela résulte de ce que la densité moyenne est égale à 5,5 environ, tandis que les couches superficielles ont une densité qui n'atteint pas 3; cette augmentation de densité tend à augmenter la force attractive. L'expérience a montré que, dans les premières couches, cette augmentation de la force attractive due à la densité est plus puissante que la diminution résultant de l'approche du centre. Ainsi, on a calculé que l'intensité de la pesanteur au fond d'un puits de mine de 385 mètres était plus considérable qu'à la surface du globe de  $\frac{1}{19150}$ . Il faut donc conclure qu'à l'intérieur du globe la pesanteur va d'abord en augmentant, puis diminue ensuite.

La pesanteur varie non seulement pour chaque latitude, pour chaque altitude, mais encore pour bien d'autres raisons. Le voisinage d'une montagne la modifie; car celle-ci agit sur les corps légers par sa masse. La direction du fil à plomb est modifiée par les grands massifs montagneux; il dévie dans leur voisinage. Avec des instruments plus sensibles, on pourrait même trouver des déviations correspondantes à des attractions locales, dues à des sols plus ou moins compacts, à des roches plus ou moins denses. Chaque couche de la surface terrestre exerce, en effet, son attraction propre d'autant plus énergiquement que la matière dont elle est formée est plus serrée, d'autant moins que le terrain est plus perméable et plus creux.

Cependant de ces variations dans l'intensité de la pesanteur sous l'influence de l'attraction, de l'évidence que le poids des corps change, il ne faudrait pas conclure qu'il faille en tenir toujours compte dans la pratique. C'est surtout à l'aplatissement des pôles qu'il faut attribuer la plus grande influence; c'est surtout à cette cause qu'est dû, par exemple, ce fait, qu'une horloge réglée pour l'équateur avance au fur et à mesure qu'on la transporte vers les pôles.

En effet, remarque M. de Parvillé, le poids d'un corps résulte de l'attraction de la terre, mais aussi de l'attraction du soleil, qui exerce également, bien que très éloigné de nous, son influence attractive. Or cette action solaire peut, selon la position de l'astre par rapport à nous, s'ajouter à l'action terrestre ou s'en retrancher. De même, quand la lune passe au méridien au-dessus de nos têtes, elle diminue un peu notre poids; quand il est midi, tous les corps pèsent un peu moins qu'à six heures du soir. Pour des corps énormes, la diminution peut être sensible; pour un homme, elle ne dépasse guère la valeur de quelques grains de blé.

## CHAPITRE IV

## APPLICATIONS DIVERSES DES LOIS DU PENDULE

**DÉMONSTRATION DE LA LOI DES ESPACES PAR LE PLAN INCLINÉ.** — Sans contredit, la plus belle application que pût faire Galilée de sa magnifique découverte des lois d'oscillation du pendule était d'en tirer une preuve scientifique de la vérité des lois de la chute des corps.

Nous consacrerons un des chapitres suivants aux applications pratiques des lois de la chute des corps. Avant d'examiner ici celles qui, directement, ont été tirées industriellement des lois du pendule, nous voulons dire, avec quelques détails, comment l'illustre physicien de Pise s'en servit pour démontrer les premières.

Quelque aride que cela semble peut-être de prime abord, cette conquête du génie sur l'ignorance, armée de toute la puissance temporelle de l'époque, est certainement, croyons-nous, intéressante et utile à raconter.

Nous avons rappelé (page 31) comment, en 1583, Galilée, en voyant une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise et que le hasard avait mise en mouvement, avait été frappé de la régularité de ses oscillations, et comment il fut amené à découvrir ainsi les lois relatives aux oscillations du pendule.

Il s'appuya sur la troisième de ces dernières lois (page 114), « *la durée des oscillations d'un pendule est en raison directe de la racine carrée des longueurs,* » pour démontrer que « *les espaces parcourus dans la chute naturelle des corps sont entre eux comme les carrés des temps employés à les parcourir.* » (2<sup>e</sup> loi de la chute des corps.)

Voici comment il procéda :

Il posait d'abord en principe évident que deux corps ont la même *vitesse* lorsque les espaces parcourus sont comme les temps employés à les parcourir.

Or, si l'on suspend à un point A (fig. 54) un pendule AB, et qu'on le porte en C, il remontera en D; joignant CD, on a une ligne que l'on considère comme rigoureusement horizontale. Si l'on suspend ensuite le pen-

dule à un autre point II, situé sur la même verticale, en lui donnant seulement une longueur HB, et que l'on le transporte en E, on aura  $IIH = IIE$ ; et, si on l'abandonne à lui-même, il passera par B pour remonter en F situé sur la même ligne horizontale CD.

Ceci établi, Galilée raisonna ainsi :

Puisque, arrivé en B, le corps formant le pendule remonte d'une quantité égale à celle dont il était descendu pour arriver en B ( $CB = BD, EB = BF$ ), il aurait acquis la même vitesse en B s'il était tombé librement. Il en est de même s'il était descendu suivant les plans inclinés DB, FB, ou d'autres semblables. Donc, les corps qui roulent suivant les plans DB, FB pour s'arrêter sur le plan horizontal BGH auront acquis une vitesse égale à celle qu'ils auraient acquise par leur chute verticale GF, GD.

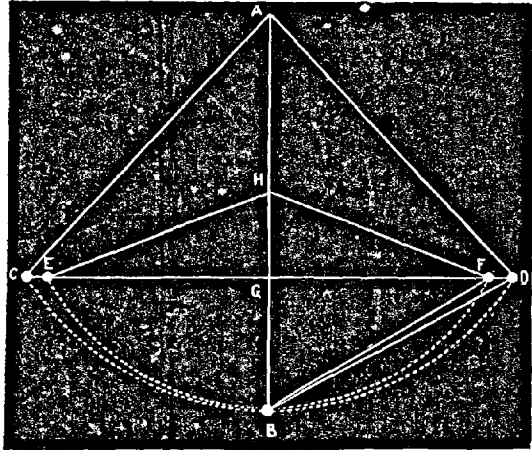


Fig. 54.

En conséquence, si on fait rouler une boule sur un plan incliné (fig. 55) ou oblique MN, formé par la réunion du plan horizontal PN et du plan vertical MP, le temps employé par cette boule pour tomber sur le plan incliné MN est au temps employé par la chute verticale MP comme MN est à MP.

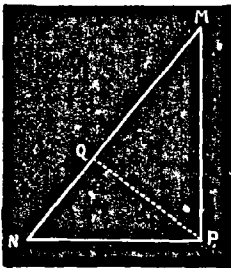


Fig. 55.

Mais les vitesses acquises par un corps qui tombe librement sont proportionnelles aux temps (page 108). Donc les vitesses acquises dans le même temps par un corps, soit qu'il roule sur le plan incliné MN, soit qu'il tombe par la verticale MP, sont entre elles comme les espaces parcourus.

Si l'on veut géométriquement déterminer sur un plan incliné MN et sur la verticale MP l'espace parcouru par un corps dans le même temps, du sommet de l'angle droit P abaissons sur MN la perpendiculaire PQ; alors MP sera le chemin qu'un corps aura parcouru sur un plan incliné dans un temps égal à celui qu'il aurait employé à tomber par la hauteur verticale MP, car le triangle MPQ est semblable à MPN; par conséquent,  $MQ : MP :: MP : MN$ , c'est-à-dire que l'espace parcouru sur le plan incliné est à l'espace

parcouru en même temps par la verticale, comme la hauteur du plan incliné MP est à la longueur MN; et, puisque les vitesses acquises dans un même temps par la chute oblique, sur le plan incliné, et par la chute verticale, c'est-à-dire par la pesanteur, sont comme MQ est à MP, ces vitesses doivent être entre elles dans le même rapport que la hauteur du plan incliné à la longueur de ce plan.

D'autres considérations géométriques, que nous ne pouvons citer ici, vinrent corroborer ces assertions de Galilée, et enfin l'expérience que nous avons décrite (page 108) rendit irréfutables les lois qu'il avait découvertes.

**APPLICATION DES LOIS DU PENDULE A L'HORLOGERIE.** — La plus importante des applications des lois du pendule à l'industrie est certainement celle de l'*isochronisme* des oscillations du pendule à l'horlogerie.

Dès la plus haute antiquité, vers 640 avant Jésus-Christ, Bérosus, astronome chaldéen, inventa les cadrans solaires. Ayant quitté Babylone, sa patrie, où il était prêtre de Bélus, pour aller visiter la Grèce, il fit connaître ses inventions aux Grecs et inspira une telle admiration aux Athéniens que ceux-ci lui élevèrent une statue. Bientôt perfectionnés par un philosophe ionien, Anaximandre (610-547 avant J.-C.), ou plutôt par Anaximène de Milet, son disciple (550-500 avant J.-C.), les cadrans solaires, qu'on appelait alors *horoscopions* (du grec *hóra*, heure; *skopeó*, je considère) ou *horologions* (du grec *hóra*, heure; *legó*, je dis), ou *cadrans sciothériques* (du grec *scia*, ombre; *théra*, recherche), passèrent en Sicile, puis furent introduits à Rome, après la première guerre punique, par Valerius Messala (260 avant J.-C.). Des horloges publiques furent alors établies dans toutes les villes; c'étaient des colonnes ou des murailles, supportant un cadran sur lequel l'ombre projetée indiquait l'heure de la journée. On imagina même de petits cadrans solaires portatifs pour les moments où l'on ne pourrait avoir sous les yeux les colonnes et les murailles des villes.

Un huissier des consuls, posté sur la terrasse du palais, annonçait officiellement à grands cris le moment où le soleil se levait, et celui de son passage au méridien.

Pline nous décrit avec un enthousiasme peu dissimulé le cadran solaire, ou mieux le *gnomon* (du grec *gnomon*, indice), destiné à indiquer l'heure de ce passage du soleil au méridien :

« De l'obélisque [de Sésostris] qui est dans le Champ-de-Mars, le dieu Auguste fit une admirable application; pour marquer l'ombre projetée par le soleil, et reconnaître ainsi les longueurs des jours et des nuits, on

étendit un lit de pierre dans un tel rapport avec l'obélisque, que l'ombre fût égale à ce lit le jour du solstice d'hiver, à midi; puis, pour chaque jour, l'ombre subissait des décroissements et, plus tard, des accroissements correspondant à des règles d'airain incrustées dans la pierre : construction mémorable et digne du génie fécond du mathématicien Novus. Celui-ci plaça au haut de l'obélisque une boule dorée dont l'ombre se ramassait sur elle-même, au lieu que l'ombre projetée par la pointe même s'étendait énormément ; on dit que ce procédé lui fut suggéré par l'aspect de la tête humaine. »

La présence du soleil était indispensable pour se servir de ce moyen de mesurer le temps, premier inconvénient, car les jours de brouillard, de pluie, ou pendant la nuit, on restait dans l'ignorance ; puis le cadran solaire ne marque que le *temps vrai*, c'est-à-dire le passage du soleil au méridien. Or, le soleil ne revient que quatre fois par an à la même heure au méridien. Tantôt il avance, tantôt il retarde ; le jour solaire, l'intervalle compris entre deux passages consécutifs n'est pas constamment de vingt-quatre heures. Et pour ceux qui ont besoin d'une exactitude quelque peu rigoureuse, le cadran solaire ne remplissait pas le but qu'ils désiraient.

Aussi, de nos jours, est-il tout à fait abandonné ; vainement, au XVIII<sup>e</sup> siècle, essaya-t-on de le remettre à la mode, et sur les fausses ruines de temples écroulés, dont on ornait les jardins, on manquait rarement de construire un cadran solaire. C'était un prétexte à inscriptions philosophiques. Ducis écrivait sous l'un d'eux :

Passant, arrête et considère,  
Avec mon ombre passagère,  
Glisser l'image de tes jours.  
Le doigt du Temps, sur la lumière,  
De tes heures écrit le cours ;  
Ton sort dépend de la dernière.  
Pour ne rien craindre sur la terre,  
Trop heureux qui la craint toujours !

Voltaire, lui, évoquait des idées moins lugubres que celles de l'éternité :

Vous qui vivez dans ces demeures,  
Êtes-vous bien ? Tenez-vous-y ;  
Et n'allez pas chercher midi  
A quatorze heures !

Le canon du Palais-Royal, comme les cadrans solaires, ne donne que l'heure vraie ; c'est-à-dire que le meilleur moyen de n'avoir l'heure

de tout le monde que quatre fois par an est de régler sa montre sur sa détonation. En effet, depuis 1816, M. de Chabrol étant préfet, toutes les horloges de Paris sont réglées sur le *temps moyen*, c'est-à-dire sur une moyenne fixant la durée invariable du *jour moyen* se rapprochant le plus possible de la durée sans cesse variable du *jour solaire*.

Le cadran solaire étant déconsidéré, on imagina l'horloge d'eau, ou *clepsydre* (du grec *klepto*, je cache; *udor*, eau; parce que l'eau s'y dérobe à la vue en s'écoulant). Nous avons donné (page 13) le dessin d'un de ces instruments. Son usage était général dans l'Inde, dans la Chine, chez les Hébreux, en Égypte, en Grèce, où elle fut introduite par Platon, et à Rome, qui la dut au consul Scipion Nasica, deux siècles environ avant Jésus-Christ.

La *clepsydre simple* se composait de deux fioles d'égale grandeur, placées l'une au-dessus de l'autre, en sens opposé, et se joignant par leur ouverture, comme deux bouteilles dont les goulots seraient appliqués l'un contre l'autre par leur extrémité.

La fiole supérieure laissait tomber goutte à goutte le liquide dont elle était pleine dans la fiole inférieure. Quand celle-ci était remplie, on retournait l'appareil, opération qui se faisait toutes les heures. On pouvait ainsi compter, par le nombre de fois que l'on avait renversé la clepsydre, quelle heure il était.

Une de ces horloges était toujours placée dans le barreau d'Athènes et dans celui de Rome. A Athènes, la clepsydre était gardée par un lion d'airain sur lequel s'asseyait celui qui avait l'emploi de distribuer l'eau. Les avocats, orateurs politiques et orateurs sacrés d'alors, n'avaient le droit de parler que pendant le temps que durait l'écoulement de la mesure d'eau qui leur était assignée. Beaucoup prétendent que cet usage aurait dû être conservé dans toutes les villes où il y a des orateurs.

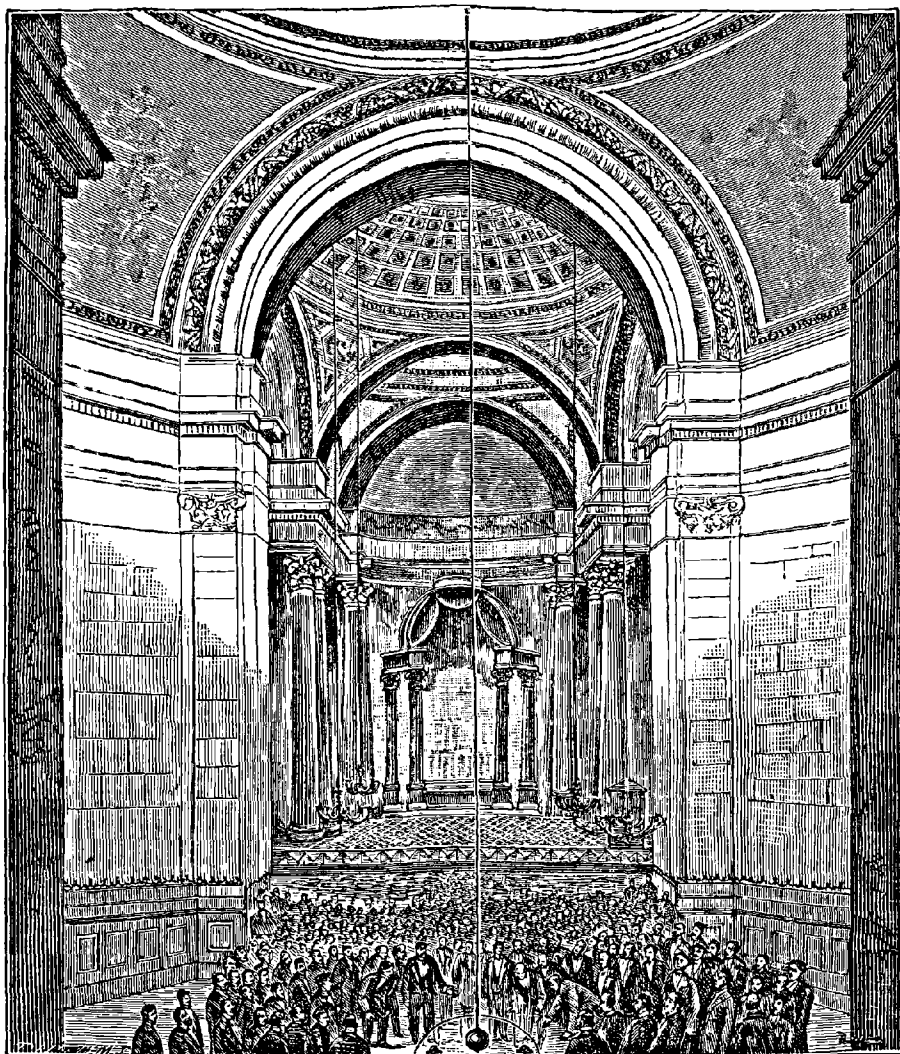
Pendant la nuit, l'eau, en s'écoulant, faisait résonner une flûte, qui, en cessant de jouer, indiquait que l'eau était toute descendue dans le vase inférieur et qu'il fallait retourner l'appareil.

Mais l'inconvénient de ce soin continuel était extrême; puis, si elle mesurait la durée d'une heure, la clepsydre n'indiquait pas combien de fois, à tel moment du jour, elle avait déjà été retournée. On chercha donc quelque chose de plus commode pour remplacer, soit la *clepsydre*, soit le *sablrier*, horloge semblable, dans laquelle il y avait, au lieu d'eau, du sable très fin et soigneusement tamisé. Les *sabliers* sont encore conservés, cependant, dans la marine, à bord d'un grand nombre de bâtiments. Ils se vident en une demi-heure, et les matelots appellent cette demi-heure une horloge. Ils divisent les vingt-quatre heures en quarante-huit horloges,



et être de quart, c'est veiller pendant un laps de temps qui dure six horloges.

Comme, depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, il est de mode d'attribuer aux Chinois



Expérience de M. Foucault, faite au Panthéon  
pour démontrer le mouvement de rotation de la terre (page 135).

les inventions dont les auteurs sont inconnus, nous dirons que le paysan chinois demande l'heure à un cadran qui exige, certes, la sagacité d'un sauvage, mais que nous croyons peu exact. Ce cadran, c'est l'œil de son chat. Il prend l'animal, lui regarde la pupille et juge, par le degré de dila-

tation qu'elle présente, l'heure qu'il est, sinon pendant la nuit, au moins depuis l'aurore jusqu'au crépuscule. Tout le monde sait que la pupille des animaux de race féline se contracte au jour et se dilate pendant les ténèbres; mais il paraît que la contraction et la dilatation suivent avec tant de régularité les heures de la journée qu'un regard exercé les devine à ce seul signe. Au matin, la pupille est ovale, après avoir été ronde pendant la nuit; du matin à midi, elle rétrécit son diamètre, jusqu'à devenir un simple trait, et, de midi au soir, elle reprend insensiblement la forme ovale.

Certes, les Chinois ont de l'esprit; mais nous préférons un chronomètre de Bréguet.

Ce ne fut que vers le VIII<sup>e</sup> siècle de notre ère que furent retrouvées ces machines hydrauliques que quelques-uns prétendent être dues à Ctésibius, espèces de clepsydres perfectionnées, qui marchaient à l'aide d'une roue à palettes sur laquelle l'eau tombait goutte à goutte et faisait tourner des rouages qui conduisaient des aiguilles sur un cadran. La première dont il soit question dans l'histoire est celle que le pape Paul I<sup>er</sup> offrit, en 760, à Pépin le Bref. On cite ensuite celle que, en 807, le calife Haroun-al-Raschid envoya à Charlemagne et qui excita une si prodigieuse admiration. Cette horloge sonnait les heures, et, au moment où le dernier coup de midi se faisait entendre, douze cavaliers paraissaient, armés de toutes pièces, et défilaient aux yeux des spectateurs.

Le pape Sylvestre II, célèbre avant son élévation sous le nom de Gerbert, archevêque de Reims, et qui était si savant qu'il eût été certainement brûlé comme sorcier s'il n'avait été pape, inventa, dit-on, vers 993, l'horloge à roues, ayant des poids pour moteur, et l'on prétend même qu'il trouva l'échappement qui fut seul en usage jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle.

Cependant les horloges sonnantes ne furent répandues en Europe que vers le XII<sup>e</sup> siècle, et l'on ignore le nom de l'inventeur. Sous le règne de Louis XI, on commença à fabriquer de petites horloges à sonnerie qui pouvaient se transporter et servir, quoique bien moins commodément, au même usage que nos montres. C'était alors un objet de luxe réservé aux princes et aux rois.

Jusqu'à cette époque, l'heure était annoncée aux populations, soit, comme en Allemagne, en Flandre, dans l'Artois, par un homme qui frappait avec un marteau sur une cloche le nombre de coups nécessaire, soit par des veilleurs de nuit, appelés *clocheteurs des trépassés*, parce qu'en criant l'heure, ils ajoutaient : « Gens qui veillez, priez pour les trépassés ! » Tout le monde se plaignait vivement de cet usage lugubre et

incommode, de ces hommes vêtus d'une dalmatique blanche, chargée de têtes de mort, d'ossements et de larmes noires, qui parcouraient les rues pendant toute la nuit :

Le clocheteur des trépassés,  
 Sonnant de rue en rue,  
 De frayeur rend les cœurs glacés,  
 Bien que le corps en sue;  
 Et mille chiens oyant sa triste voix  
 Lui répondent à longs abois.  
 Ces tons ensemble confondus,  
 Font des accords funèbres,  
 Dont les accents sont épanchus  
 En l'horreur des ténèbres,  
 Que le silence abandonne à ce bruit,  
 Qui l'épouvante et le détruit.

Aussi fut-ce un véritable bienfait pour les peuples quand, au XII<sup>e</sup> siècle, furent établies les premières horloges publiques sonnantes. Un mécanicien de Padoue, nommé Dondus ou de Dondis (Jacques), surnommé *Horologius* (1298-1360), en construisit une des premières, qui fut placée, en 1344, sur la tour du palais de Padoue et qui marquait, outre les heures, le cours du soleil, les révolutions des planètes, les phases de la lune, les mois et les fêtes de l'année.

Vinrent ensuite les perfectionnements, et de toutes parts s'élevèrent des horloges, parmi lesquelles on doit citer celle de Jean de Dondis, fils du précédent, placée à Pavie; celle du bénédictin Walingford, à Londres; celle de Courtrai; celle du Palais de justice de Paris, construite en 1370 par l'horloger allemand Henri de Vic; celle du château d'Anet, où l'on voyait un cerf frappant de ses pieds les heures et une meute de chiens qui couraient en aboyant; celle de Lyon, exécutée en 1598 par Lippe de Bâle, et enfin l'horloge astronomique de Strasbourg, merveille à la construction de laquelle Isaac Habrech consacra sa vie, et qui, achevée en 1573, a été reconstruite sur un plan tout nouveau par M. Schwilgué (1838-1843).

Du XVI<sup>e</sup> siècle datent de nouveaux perfectionnements: on commença, sous Charles VII, à remplacer les poids, qui jusqu'alors avaient servi de force motrice, par des ressorts en spirale; cela permit à Pierre Hell de rendre les horloges portatives, d'inventer les montres, d'abord appelées *œufs de Nuremberg*, à cause de leur forme et du pays où elles étaient fabriquées, puis de placer les horloges sur les meubles, au lieu de les suspendre le long de la muraille, comme aujourd'hui encore les *coucous* que l'on voit dans les campagnes.

Galilée découvre alors les lois du pendule.

De la loi de l'*isochronisme* des oscillations, LORSQUE LEUR AMPLITUDE EST TRÈS PETITE, il veut tirer des conséquences pratiques, et d'abord il invente un instrument appelé *pulsilogue*, simple pendule destiné à mesurer exactement les pulsations artérielles.

Puis, le premier, il songe à appliquer l'*isochronisme* du pendule à l'horlogerie.

Un savant professeur italien, M. Eugenio Alberi, éditeur des *Œuvres complètes* de Galilée, envoya, en 1858, à l'Académie des sciences, une dissertation tendant à prouver que celui-ci, en 1641, dans la dernière année de sa vie, avait trouvé le moyen de modérer et de régulariser par le pendule la descente du poids moteur des horloges mécaniques; mais que, étant aveugle et prisonnier, il laissa à son fils le soin de l'exécution, et que celui-ci fit, en 1649, à Venise, un essai qui réussit. L'Académie reconnut, par l'organe de M. Biot, l'exactitude du fait.

Néanmoins, l'expérience était peu connue, et c'est à Huyghens (1) qu'appartient la gloire de cette application du pendule à l'horlogerie, application qui est, selon l'expression du célèbre Laplace, « un des plus beaux présents que l'on ait faits à l'astronomie et à la géographie. »

Le problème à résoudre était celui-ci :

Le moteur des horloges est ou un ressort qui s'enroule en spirale quand on les monte avec une clef, comme dans les pendules ordinaires, et qui, en se déroulant lentement, fait marcher toutes les pièces pendant un certain nombre de jours, ou bien par un poids qui, en descendant, imprime à tous les rouages un mouvement. Or, en vertu de la 3<sup>e</sup> loi de la chute des corps, *les vitesses acquises par un corps croissent proportionnellement aux temps écoulés depuis le commencement de la chute*, le poids, en descendant, le ressort, en se déroulant, augmenterait la vitesse de son mouvement de plus en plus, et la régularité de la marche des rouages

(1) HUYGHENS DE ZUYLICHEM (Christian), né à La Haye en 1629, mort en 1695, était fils d'un ministre de Guillaume III, prince d'Orange. Au lieu de s'adonner à la politique, il s'occupa de science, surtout de physique et d'astronomie. Connu, dès 1651, par des travaux de géométrie, il découvrit en 1656, au moyen d'instruments qu'il avait construits lui-même, un satellite de Saturne, et, en 1659, l'anneau qui entoure cette planète. Outre ses travaux d'application relatifs à l'horlogerie, il accomplit de merveilleuses découvertes en physique, principalement en optique. Louis XIV, jeune et aimant les savants qui faisaient la gloire de son règne, l'avait attiré en France, où il se fit recevoir docteur en droit à la Faculté protestante d'Angers. Le roi lui accorda alors une pension considérable et le fit entrer un des premiers à l'Académie des sciences (1665); mais Louis XIV, étant devenu vieux et dévot, força l'illustre savant, par la révocation de l'édit de Nantes, de quitter, comme Denis Papin et comme tant d'autres gens d'élite, le pays où il avait publié ses principaux ouvrages. On lui reproche d'avoir été injuste à l'égard de Newton et de Leibniz; mais les querelles de savants sont plutôt utiles que nuisibles à la science, et la postérité les oublie pour ne se souvenir que des bienfaits.

serait impossible. Il fallait un *régulateur* établissant un mouvement parfaitement régulier et uniforme, malgré toutes les causes d'altération et les résistances variables offertes par le jeu d'un nombre de pièces assez grand.

Voici comment Huyghens conçut et réalisa ce modérateur.

Parmi toutes les roues d'une horloge, il en est une R (*fig. 56*), qu'on nomme *roue de rencontre*, qui communique le mouvement à toutes les autres roues d'engrenage et qui elle-même dépend du pendule ou *balancier*. En effet, le balancier est pris dans une fourchette F, qui est adaptée à une tige T, fixée par son extrémité supérieure à un axe A horizontal mobile. A l'extrémité de cet axe est une pièce EH, à qui sa forme particulière a fait donner le nom d'*échappement à ancre*. Cette pièce est terminée à ses deux extrémités par des palettes destinées à engrener dans les dents de la *roue de rencontre* R.

Or l'ancre EH suit les mouvements du balancier; à chaque oscillation de celui-ci, une palette de l'ancre saisit d'un côté une des dents de la roue et empêche celle-ci de tourner plus que de la distance d'une dent à l'autre; en même temps, l'autre palette s'est dégagée et a permis cette descente, qui a bien lieu par un mouvement accéléré, mais dans un temps fort court pour se produire et qui est d'ailleurs ralenti par le frottement des pivots et des engrenages et est ainsi presque insensible.

Les mouvements du pendule ou *balancier* étant *isochrones*, celui de la roue dentée et par suite de tous les autres rouages est donc régulier.

Quant à régler ce mouvement du pendule, il suffit de l'allonger ou de le raccourcir; c'est ce que l'on appelle *régler* l'horloge. Pour cela, le poids du pendule n'est point fixé à la tige, mais peut être remonté ou abaissé à l'aide d'une vis. Si l'horloge *retarde*, c'est que le pendule oscille trop lentement, c'est-à-dire est trop long; on remonte le poids; dans le cas contraire, si la pendule *avance*, on l'abaisse.

Pour le poids de la sonnerie, comme il ne descend pas constamment comme celui des heures, mais seulement quand l'horloge va sonner,

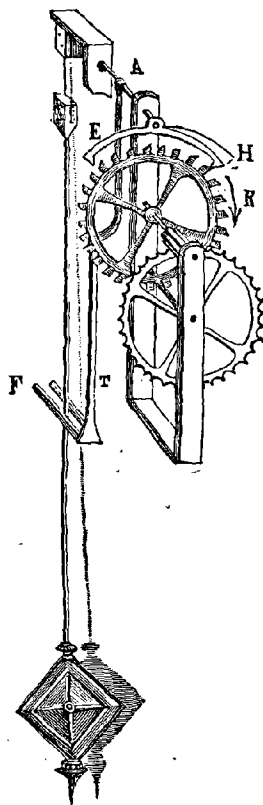


Fig. 56.

ÉCHAPPEMENT À ANCRE.

comme il est facile d'espacer les dents qui soulèvent les marteaux de la sonnerie de manière que les coups se succèdent à intervalles à peu près égaux, on n'a point eu besoin de chercher à arrêter l'accélération du mouvement d'une façon plus exacte que par l'adjonction d'un petit moulinet qui, en tournant, frappe l'air de ses ailes, et cette résistance de l'air suffit pour retarder suffisamment la descente du poids.

Dans les usages ordinaires de la vie, le moyen ci-dessus de régler les horloges et de régulariser les mouvements du moteur de la *roue de rencontre* suffit généralement ; cependant il est des cas où il faut considérer bien d'autres causes de variation ; entre autres, nous citerons la température, qui, en vertu d'une des lois relatives à la chaleur, fait allonger ou raccourcir le pendule. Nous verrons, dans le chapitre consacré aux applications de la chaleur, comment on parvient à surmonter cette difficulté.

C'est à Huyghens, disons-le en terminant, que l'horlogerie doit d'être devenue un art de précision et de produire ces merveilles qui ont fait faire de si grands pas aux sciences exactes.

Entre tous les arts, c'est d'ailleurs l'horlogerie qui, en revanche, a reçu le plus de perfectionnements par les indications des savants. On sait qu'Arago fit longtemps, depuis 1832, un cours spécial sur cette branche d'industrie. Il réunissait autour de lui, rapporte M. Audigane dans une Étude sur ce grand savant, dans une des salles de l'Observatoire, une quinzaine d'horlogers, parmi lesquels plusieurs se sont élevés au premier rang. Je nomme, entre ses auditeurs habituels, M. Perrelet, qui a tenu à Paris une école publique d'horlogerie dans laquelle le gouvernement a entretenu pendant plusieurs années un certain nombre d'élèves ; M. Jacob, le fabricant de chronomètres, etc.

L'abbé Talbert s'écriait en 1754, dans un poème, en parlant des horloges :

Labyrinthes savants habités par les heures,  
Quels dieux vous ont construits pour être les demeures  
Où circulent sans cesse et les nuits et les jours ?  
Un élastique acier suit leur marche secrète ;  
Du temps que j'interroge un timbre est l'interprète ;  
Mon oreille et mes yeux sont instruits de son cours.

Aujourd'hui, ces dieux-là sont des hommes de talent que la science élève et non plus l'aveuglement des peuples ! Qu'il nous soit permis de citer les noms de quelques-uns : Julien Leroy (1686-1759), J.-A. Lepaute (1707-1789), Ferd. Berthoud (1727-1807), Graham (1675-1751), Harrison (1693-1776), J.-B. Lepaute (1712-1802), qui construisit l'horloge de l'Hôtel-

de-Ville de Paris; P.-Basile Lepaute (1759-1843), qui fit celles des Tuileries et du Palais-Royal; Bréguet (1747-1823), Janvier (1751-1835), Bréguet fils (1738-1849), Pierre Leroy (1717-1785).

Nous parlerons plus loin d'une autre sorte d'horloges appelées *horloges électriques*.

**MÉTRONOME.** — Un mécanicien allemand, Maelzel (1), tira une application pratique de l'isochronisme des oscillations du pendule en inventant le *métronome*. On sait que ce petit instrument sert aux musiciens pour marquer la mesure. Cette mesure variant en vitesse suivant le morceau à exécuter, il fallait pouvoir varier la durée des oscillations.

Le *métronome* (*fig. 57*) consiste en une tige d'acier oscillant autour d'un axe O et supportant à son extrémité inférieure une boule pesante B et au-dessus de son axe une autre masse M glissant de haut en bas le long d'elle, à frottement doux. Plus on élève cette masse M, plus les oscillations évidemment sont lentes; plus on la rapproche de l'axe de suspension, plus elles sont rapides. Une échelle, placée sur l'instrument, in-

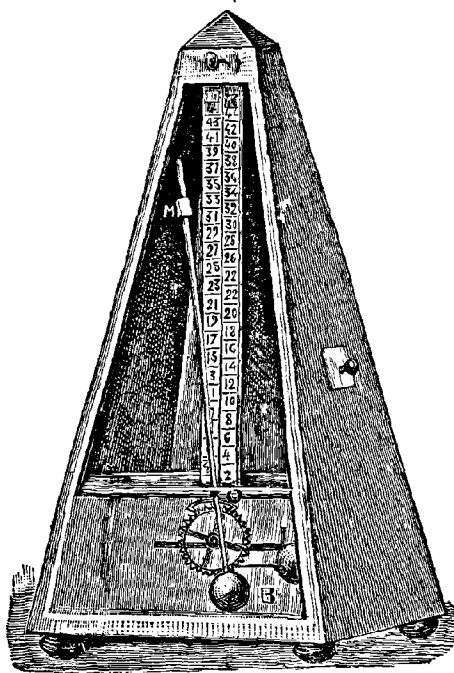


Fig. 57. — MÉTRONOME.

dique le nombre d'oscillations que l'on obtient par minute, en mettant la masse M à tel ou tel endroit de la tige. Un mouvement d'horlogerie est mis en rapport avec le pendule par une roue à échappement qui s'échappe avec un bruit assez fort pour indiquer chaque oscillation; de plus, un timbre, frappé toutes les 2, 3 ou 4 oscillations, indique la mesure.

**APPLICATION A LA DÉMONSTRATION DU MOUVEMENT DE ROTATION DE LA TERRE.** — Cette démonstration expérimentale a été imaginée par

(1) MAELZEL (Léonard), mécanicien autrichien (1776-1855), a construit des automates vraiment admirables, entre autres le *panharmonica*, en 1807, orchestre composé de quarante-deux musiciens automates exécutant parfaitement des ouvertures d'opéras. Cette machine est aujourd'hui à Boston.

M. Léon Foucault (1) et exécutée par lui en 1851, à Paris, sous le dôme du Panthéon.

M. Guillemin, dans ses *Applications de la physique*, décrit ainsi cette expérience, basée sur un principe de mécanique qui, appliqué au mouvement de rotation d'un sphéroïde comme la terre, se résume en trois propositions.

1° Un pendule, placé à l'un des pôles de la terre et dont le point de suspension serait sur le prolongement de l'axe de rotation terrestre, oscillerait de façon qu'en réalité le plan de ses oscillations successives conserverait dans l'espace une direction invariable. Dès lors, un observateur posté en ce lieu, se trouvant entraîné par la rotation de la terre sans avoir conscience de son propre mouvement, croirait voir le pendule osciller dans des plans variables coïncidant successivement avec tous les méridiens; après un jour sidéral, c'est-à-dire après 23 heures 56 minutes de temps moyen, le plan d'oscillation du pendule lui semblerait avoir effectué une révolution complète autour de la verticale, et dans un sens précisément opposé à celui de la rotation réelle.

2° A l'équateur, au contraire, le mouvement de rotation du globe n'aurait aucune influence sur la direction apparente du plan des oscillations, qui semblerait et serait en effet immobile, relativement à l'horizon.

3° Enfin, la théorie démontre qu'à une latitude différente de 90° ou de 0°, la déviation apparente du plan des oscillations du pendule se ferait dans le même sens qu'au pôle le plus voisin. Seulement, cette déviation serait d'autant plus lente que le lieu de l'expérience serait plus voisin de l'équateur. Le calcul montre qu'à Paris (latitude de 48° 50'), le pendule mettrait environ 32 heures pour faire le tour entier de l'horizon, si l'on fait abstraction, bien entendu, des retards occasionnés par le frottement au point de suspension et par la résistance de l'air.

Or, pour vérifier ce résultat, voici de quelle manière opéra M. Léon Foucault :

Au point culminant de la coupole du Panthéon se trouvait solidement encastré dans une plaque métallique un fil d'acier de 64 mètres de longueur qui portait à son extrémité inférieure une sphère de laiton très pesante. Écarté de sa position verticale et abandonné à lui-même, ce pendule exécutait, avec une grande lenteur, une série d'oscillations

(1) FOUCAULT (Jean-Bernard-Léon), né à Paris en 1819, mort en 1868, était fils d'un libraire et étudia d'abord la médecine; puis, il quitta cette étude pour s'occuper de daguerréotypie et de physique. Nommé préparateur du cours de microscopie médicale du docteur Doiné, il résolut dès cette époque (1844-1847) divers problèmes de lumière et d'optique. Il était membre de l'Institut.



dans un plan dont la théorie démontre l'invariabilité. Dans l'hypothèse de l'immobilité de la terre, l'orientation primitive de ce plan aurait dû être constante. Or les nombreux spectateurs de cette expérience curieuse



Malheur aux vaincus ! (page 142).

purent constater la déviation apparente d'orient en occident du plan vertical dans lequel oscillait le pendule. En une heure, l'arc mesurant cette déviation était, à fort peu de chose près; celui qu'indiquait la théorie, c'est-à-dire  $11^{\circ} 17' 39''$ .

## CHAPITRE V

## BALANCE

**DU LEVIER.** — Il importe, avant de commencer l'étude de la balance, que nous exposions encore quelques principes de *mécanique*, que nous parlions des machines (qui ne sont autre chose que les moyens matériels par l'emploi desquels les forces peuvent être utiles), que nous disions quelques mots du *levier*, la plus simple de toutes les machines.

Le *levier* est une barre de bois ou de métal, inflexible, droite ou courbe, mobile autour d'un point fixe, appelé *point d'appui*, et qui est sollicitée par deux forces en sens contraire. Celle des deux forces qui agit comme moteur est dite la *puissance*; l'autre est la *résistance*.



Fig. 58. — LEVIER DU PREMIER GENRE.

On désigne sous le nom de *bras de levier* les distances du point d'appui à la *puissance* et à la *résistance*.

D'après la position relative de la *puissance* et de la *résistance* par rapport au point d'appui, on distingue trois sortes de leviers :

1° *Levier du premier genre* (fig. 58), dans lequel le *point d'appui* sur lequel s'exerce le levier et autour duquel il tourne est situé entre la *puissance*, point où s'applique l'effort, qui, dans le cas représenté par la figure, s'exerce de haut en bas, et la *résistance*, point qui supporte le poids du corps, qui est la *résistance* à soulever. Outre la balance, dont nous allons nous occuper longuement, les brimbales des pompes, les ciseaux sont des applications du levier du premier genre.

2° *Levier du second genre* (fig. 59), dans lequel la *résistance* est

située entre le point d'appui et la puissance. Les avirons des bateaux, pour lesquels l'eau est le point d'appui, la main du batelier la puissance et le bord du bateau la résistance, sont une application du levier du second genre.

3° *Levier du troisième genre*, dans lequel la puissance est appliquée entre la résistance et le point d'appui. La pédale qui sert à faire tourner la meule du remouleur que nous représentons (*fig. 60*), celle en usage dans les pianos, dans les tours, les pincettes de nos foyers, et surtout le système musculaire des animaux dont presque tous les mouvements s'effectuent par ce mécanisme, sont des exemples d'application du levier du troisième genre.

D'ailleurs, dans les différents os du squelette de l'homme, nous trouvons les trois genres de levier (*fig. 61*). Ainsi, l'avant-bras représente un levier du troisième genre dont le point d'appui est à l'articulation du coude A, la résistance à la



Fig. 59. — LEVIER DU DEUXIÈME GENRE.

main R, et la puissance à l'insertion P des deux muscles biceps et brachial antérieur. Le pied nous offre un exemple de levier du second ordre. Le point d'appui A' est en avant pendant la marche, la puissance au talon P', c'est-à-dire à l'insertion du tendon d'Achille, et dont la résistance, qui est le poids du corps, porte verticalement sur l'articulation R du tarse avec la jambe. Enfin, comme levier du premier genre, nous avons la tête, dont le point d'appui se trouve à la partie supé-

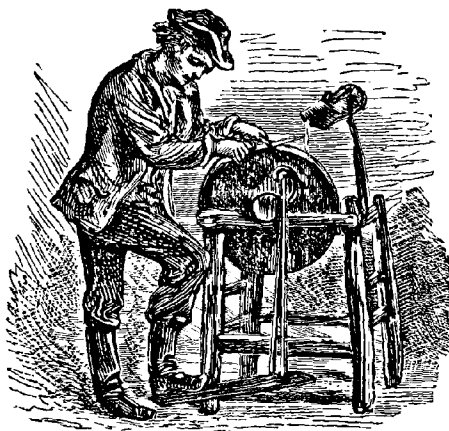


Fig. 60. — LEVIER DU TROISIÈME GENRE.

rieure A" de la colonne vertébrale, dont la résistance est le poids de la face R" qui tend sans cesse à l'entraîner en avant, et dont la puissance est en arrière, c'est-à-dire à l'insertion occipitale P" des muscles postérieurs du cou.

**EFFET DES LEVIERS. — CONDITIONS D'ÉQUILIBRE.** — Les effets du levier sont connus. A l'aide de cette machine, un homme parvient à soulever des fardeaux qu'il lui serait impossible de remuer sans ce secours.

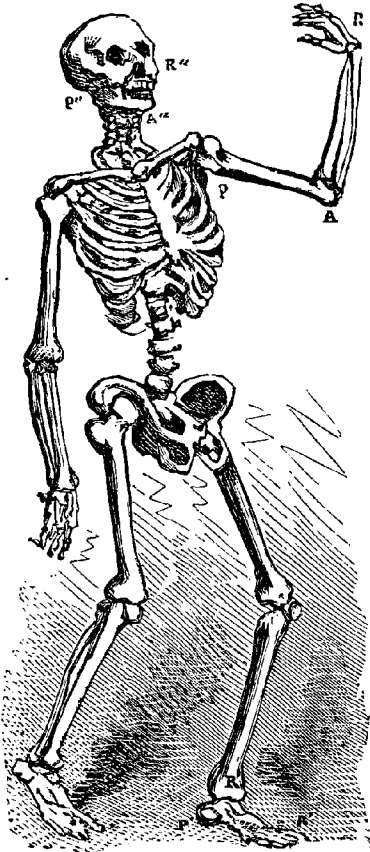


Fig. 61.

Cependant, quelque immenses que puissent être les résultats obtenus, ils ont évidemment des bornes, et très justement Joseph de Maistre sourit du mot célèbre attribué à Archimède : *Donnez-moi un point d'appui, et je soulèverai le monde !* Un savant mécanicien écossais, Jacques Fergusson, raconte-t-il, s'est amusé à calculer que, si, au moment où Archimède prononçait ce mot, Dieu l'avait pris au mot, en lui fournissant, avec ce point d'appui donné à trois mille lieues du centre de la terre, des matériaux d'une force suffisante et un contrepoids de deux cents livres, il aurait fallu à ce grand géomètre un levier de douze cent milliards de cent milliards, ou douze quadrillions de mille, et une vitesse à l'extrémité du long bras égale à celle d'un boulet de canon, pour élever la terre d'un pouce en vingt-sept centaines de milliards, ou vingt-sept trillions d'années.

On peut donc mettre en doute l'authenticité de l'orgueilleuse parole, ou ne la considérer que comme une exagération, tendant à bien faire comprendre

la vérité du principe qu'il avait découvert et que l'on exprime ainsi :

*Deux forces agissant sur un levier se font équilibre lorsqu'elles sont entre elles en raison inverse des bras de levier aux extrémités desquels elles sont appliquées, ou, en d'autres termes : Pour que deux poids se fassent équilibre, il faut que, multipliés par la longueur de leurs bras de levier respectifs, ils donnent des produits égaux.*

Soit, en effet (fig. 62), un levier du premier genre AB, dont les bras AC, CB, sont inégaux, et deux poids E, D suspendus aux extrémités de

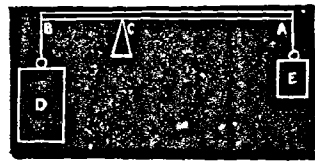


Fig. 62.

ces bras. Si ces poids se font équilibre, on devra avoir la proportion suivante :

$$\frac{E}{D} = \frac{CB}{AG};$$

ou bien  $E \times AC = D \times CB.$

C'est-à-dire que les poids seront en raison inverse des longueurs des bras du levier ; que si, par exemple, le bras AC est trois fois plus long que CB, le poids E sera trois fois plus petit que D ; que, si les deux bras du levier sont égaux, les poids devront être égaux. C'est le cas de la balance ordinaire.

Précisons bien ce que nous voulons faire comprendre.

Un maçon veut soulever une pierre de taille pesant 500 kilogrammes. Il prend une barre de fer, un levier, ayant 100 centimètres de longueur (nous choisissons des nombres ronds pour être plus clair). — Il place, auprès de la pierre à soulever, un bloc de 0<sup>m</sup>,50 de hauteur à 0<sup>m</sup>,02 de l'extrémité de son levier, glissé sous la pierre et reposant sur ce bloc. Il suffira qu'il exerce sur l'extrémité de la barre opposée à l'extrémité placée sous la pierre une action égale à celle qu'exercerait un poids de 10 kilogrammes pour que cette extrémité s'abaisse et pour que l'autre, en se soulevant, soulève la pierre. En effet, puisque le grand bras a 100 centimètres de longueur, il est 50 fois plus long que le petit, qui n'a que 0<sup>m</sup>,02. Il suffira donc, pour obtenir l'équilibre, de presser d'un poids 50 fois plus petit que le poids de la pierre, c'est-à-dire de 10 kilogrammes.

Le fait est parfaitement explicable. Le maçon, en vérité, a soulevé 500 kilogrammes en une seconde, si l'on veut. En pesant sur le grand bras de son levier, qui était à 0<sup>m</sup>,50 de hauteur, l'autre bras, qui était 50 fois plus court, n'a pu s'élever qu'à une hauteur 50 fois moindre, c'est-à-dire de 1 centimètre. Le maçon n'a donc, en réalité, élevé que 500 kilogrammes de 1 centimètre en une seconde, ou, ce qui revient au même, élevé un poids 100 fois plus petit, c'est-à-dire 5 kilogrammes, à une hauteur 100 fois plus grande, c'est-à-dire à 1 mètre, chose peu remarquable.

Le levier a donc simplement permis au maçon de mieux employer ses forces, en gagnant en puissance ce qu'il perdait en vitesse ; c'est une simple application des lois qui président aux forces parallèles, et que (page 75) nous avons exprimées ainsi : *Tout ce qu'une force gagne en puissance, elle le perd en vitesse, et, réciproquement, tout ce qu'elle gagne en vitesse, elle le perd en puissance*, application dont le but est d'obtenir

l'équilibre du levier, en faisant agir sur les deux bras du levier deux forces qui s'entre-détruisent.

Nous donnerons, dans le chapitre consacré aux applications des lois diverses de la pesanteur, quelques-unes des applications du levier. Elles sont nombreuses; car la plus grande partie des machines sont basées sur le levier. En ce moment, nous ne parlerons que de son application la plus simple, des *Balances*.

**HISTORIQUE DE LA BALANCE.** — Nous avons rappelé (page 10) que l'invention des balances était attribuée par les anciens soit à Phidon, tyran d'Argos, soit à Palamède, fils d'un roi d'Eubée; que la Bible nous montre Abraham pesant les 400 sicles d'argent qu'il remet à Éphron, fils de Séor, en présence des enfants de Heth, pour prix du sépulcre de sa femme dans la caverne de Macphéla, et qu'Homère dit, en parlant de Jupiter :

« Le dieu étendait les plateaux de sa balance d'or; il plaça les deux destins... Il tenait la balance par le milieu... Le destin des Achéens s'abaissa vers la terre, celui des Troyens s'éleva vers le ciel. »

Ce passage semble bien indiquer que la balance ordinaire, composée de deux plateaux et d'un levier, était connue de son temps. On n'en trouve cependant aucune trace dans les hiéroglyphes; les seuls monuments égyptiens où l'on puisse en rencontrer sont un scarabée de Sidoine de Stosch, et quelques momies. Les Romains se servaient aussi de balances à plateaux; on en a trouvé dans les fouilles faites à Herculanium, telles qu'elles sont représentées sur les médailles et les monuments; et l'histoire du Brenn gaulois, jetant sa lourde épée dans le plateau qui contenait le prix de la rançon de Rome et s'écriant : « Malheur aux vaincus! » nous montre que l'on pesait avec des balances ordinaires à plateaux. On en trouve cependant quelques-unes qui n'avaient qu'un plateau, à la place qu'occupe le crochet dans nos *pesons* ou *balances romaines*; ce plateau tenait par trois ou quatre chaînes bien travaillées et passées dans une plaque ronde qui donnait la facilité de les serrer. Les fléaux étaient artistement ciselés, et, comme les poids, représentaient des têtes de dieux, principalement celle de Mercure, qui présidait au commerce. Parmi celles trouvées à Herculanium, il en est de l'une et l'autre forme, et quelques-unes si petites, que l'on pourrait les prendre pour des *trébuchets*. Cela s'explique par l'usage, rapporté par Pline, qu'avaient les Romains de porter à la ceinture de petites balances, afin de peser l'or ou l'argent dont ils se servaient dans leurs transactions.

Cependant les Romains ne connaissaient pas la *balance romaine* proprement dite; ce n'est point de Rome qu'elle tire son nom. Elle est

appelée ainsi parce qu'elle nous vient des Arabes, qui nomment *roumain* (pomme de grenade) l'unique poids de cette balance.

On sait que les anciens avaient fait de la balance un des signes du zodiaque. Leur mythologie nous apprend que cette balance céleste est celle d'Atrée, retirée dans le ciel quand arriva, sur la terre, l'époque de l'âge de fer.

La balance est restée, depuis eux, l'attribut de la justice, de Thémis. Quelques médailles nous l'indiquent aussi comme attribut de la déesse *Moneta* (monnaie).

Les Chinois attribuent la plus haute antiquité à leurs balances, qui se composent, comme dans les romaines, d'un bras unique, en ivoire, triangulaire, de la grosseur d'une plume à écrire, divisé en petites mesures, marquées sur ses trois faces. Ce bras est suspendu à l'un des bouts par des fils de soie, en trois points différents, afin de pouvoir peser les choses les plus légères. Ils les portent enfermées dans de petits étuis de bois.

Pendant tout le moyen âge, les travaux des alchimistes rendirent nécessaires une grande justesse et une grande sensibilité dans les balances. Cependant, ce n'est guère qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle que l'on apporta quelques perfectionnements à cet instrument. Parmi ceux qui s'occupèrent de cet objet, il faut citer les savants anglais Hooke (1), Ramsdem (2), le professeur italien Fontana (3), le Hollandais Mussenbroeck (4) et, en France, Varignon (5), Brisson (6), le célèbre Hassenfratz (7).

(1) Voir ci-après *Baromètres*.

(2) RAMSDEN (Jessé), opticien anglais (1735-1800). Il perfectionna les instruments astronomiques principalement et trouva un moyen d'apprécier la dilatation des corps solides.

(3) FONTANA (Félix), né à Pomarole (Tyrol) en 1737, mort en 1805. Professeur de philosophie à Pise, il devint directeur du muséum de Florence, pour lequel il fit exécuter un grand nombre d'instruments, et surtout une célèbre collection anatomique en cire. Napoléon lui commanda une collection semblable, qui fut donnée à la Faculté de médecine de Montpellier. Son frère, entré dans la communauté des Écoles pies, sous le nom de Père Grégoire (1735-1803), fut un savant mathématicien.

(4) Voir ci-après *Électricité*. — *Bouteille de Leyde*.

(5) VARIGNON (Pierre), né à Caen en 1654, mort en 1722, d'abord théologien, se livra ensuite aux mathématiques, dans lesquelles il excella. Membre de l'Académie des sciences, professeur de mathématiques au Collège de France.

(6) BRISSON (Mathurin-Jacques), physicien et naturaliste français (1723-1806), censeur royal, professeur de physique au Collège de Navarre, membre de l'Académie des sciences. De ses nombreux et savants ouvrages, il ne reste qu'un livre : *Pesanteur spécifique des corps*, livre important par la variété et l'exactitude des expériences, et une *Ornithologie* très exacte citée à chaque instant par Buffon.

(7) HASSENFRAZ (Jean-Henri), né à Paris en 1755, mort en 1827, d'abord charpentier, devint, à force de travail, ingénieur ; alla en Styrie et en Carinthie, pays alors célèbres par leur fabrication du fer, afin d'étudier les procédés employés. Revenu en France à la Révolution, il fut un ardent républicain, prépara le 10 août avec Danton, démasqua le traître Dumouriez. Il quitta la scène politique à la chute de Robespierre, fut un des créateurs de l'École polytechnique, membre de l'Institut, professeur à l'École des mines. La Restauration, considérant qu'il était peut-être très savant, très Français, mais qu'il n'était point noble, lui ôta tous ses emplois.

De nos jours, les balances ont été portées à un haut point de perfection ; nous parlerons ci-après de celles qui se recommandent le plus particulièrement à l'attention.

Ce fut Wallis (1), mathématicien anglais, et Jacques Leupold (2), qui, les premiers, ont donné une théorie complète de la balance.

**THÉORIE ET DESCRIPTION DE LA BALANCE.** — La balance se compose essentiellement (*fig. 63*) d'une barre métallique AB, appelée *fléau*, tra-

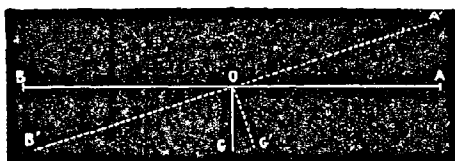


Fig. 63.

versée par un prisme triangulaire O, appelé *couteau*, dont l'arête inférieure repose sur deux coussinets en matière dure, généralement en agate ou en acier trempé et poli, afin de rendre les frottements plus doux, et qui sert ainsi d'axe au fléau. Ce fléau doit être parfaitement horizontal lorsqu'il est en équilibre sur son axe. Pour obtenir cette condition, il suffit que son centre de gravité G soit sur la verticale qui passe par le point d'appui. En effet, toutes les actions de la pesanteur sur AB peuvent se remplacer par une force unique P égale au poids du fléau et appliquée au point G (page 69) ; la direction de cette force passant par O ne peut produire aucune rotation autour de cet axe. Si l'on incline le fléau en A'B', par exemple, le centre de gravité étant passé en G', le poids qui lui est appliqué tend à le faire tourner pour le ramener dans sa position première ; ce qui montre que non seulement il y a équilibre, mais que l'équilibre est stable. Si le centre de gravité était en O, l'équilibre serait indifférent ; enfin, s'il était au-dessus de O, l'équilibre serait instable ; le fléau, à peine sorti de sa position d'équilibre, tournerait complètement ; la balance serait dite *folle*.

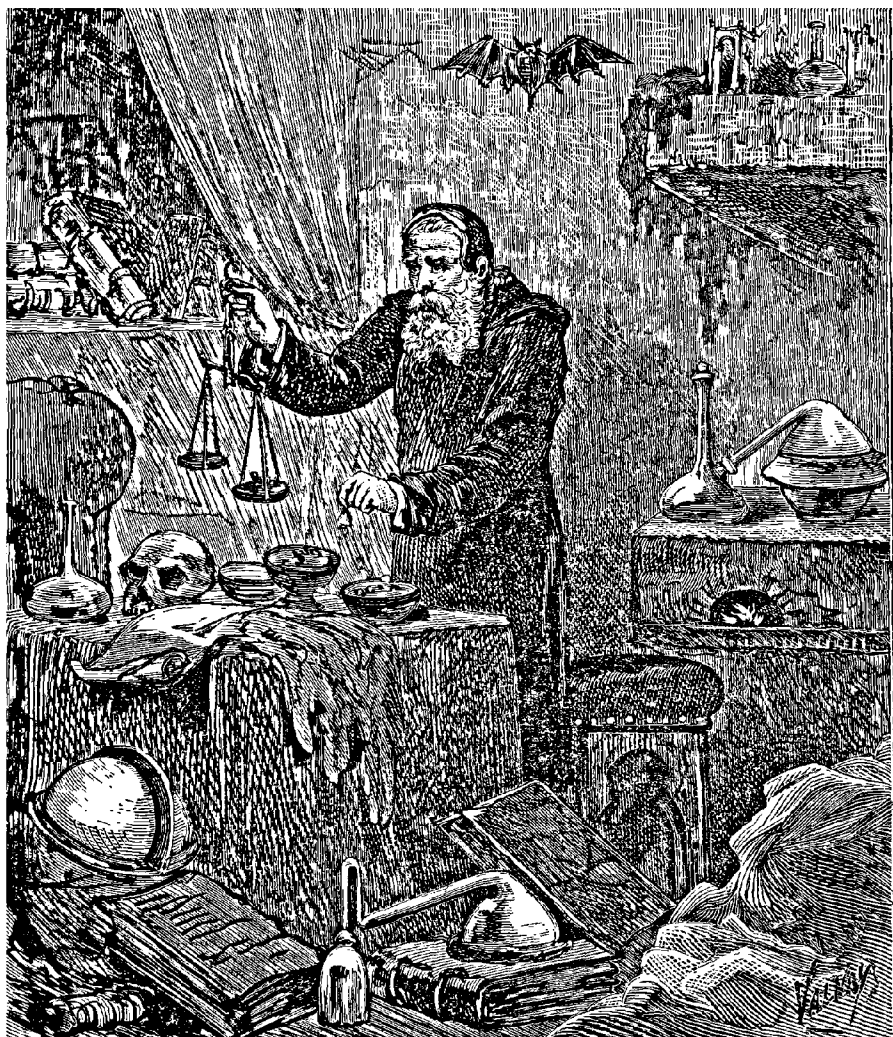
En A et en B sont placés, sur la même ligne horizontale, deux autres couteaux où sont suspendus, soit en dessus du fléau, soit en dessous, les *bassins* ou *plateaux* de la balance. Les poids de ces bassins étant égaux entre eux, leur ensemble pourra être remplacé par leur poids total appliqué au point O ; le fléau restera donc horizontal. Il en sera évidemment

(1) WALLIS (Jean) [1616-1703]. D'abord pasteur, il fit des sermons, des ouvrages de théologie et s'occupa de l'enseignement des sourds-muets, dans lequel il obtint des succès prodigieux ; mais il est surtout célèbre par ses travaux mathématiques.

(2) LEUPOLD (Jacques), mécanicien saxon (1674-1727), excella dans la construction des instruments de précision, inventa une marmite plus simple que celle de Papin et perfectionna la pompe pneumatique de Hauksbec



de même si nous augmentons chaque plateau d'un poids égal, parce que ces deux poids produiront au point O un poids égal à leur somme; mais il en serait autrement si un des plateaux B' recevait un poids plus fort



L'alchimiste pesant.

que l'autre; le fléau s'inclinerait jusqu'à ce que AB devint vertical dans un nouvel état d'équilibre AB'.

Pour que l'on puisse facilement juger de l'horizontalité du fléau, une aiguille verticale est placée d'habitude, dans les balances ordinaires,

au-dessus ou au-dessous de l'axe d'oscillation. Cette aiguille correspond exactement au milieu où se trouve le zéro de la division d'un cadran quand le fléau est parfaitement horizontal et indique ainsi les plus petits mouvements de ce fléau.

De ce qui précède, on peut déduire immédiatement les deux conditions essentielles pour qu'une balance soit bonne. Il lui faut *justesse* et *sensibilité*.

Pour obtenir la *justesse*, c'est-à-dire une horizontalité parfaite du fléau quand il est sollicité par des poids égaux, il est indispensable :

1° Que le centre de gravité soit au-dessous de l'axe de suspension; sans quoi, comme nous l'avons dit ci-dessus, l'équilibre ne serait point stable, ou la balance n'oscillerait plus et serait *indifférente*.

2° Que les points de suspension des plateaux soient à des distances constantes de l'axe de suspension du fléau, quelle que soit la position de celui-ci; c'est-à-dire que les deux bras du fléau restent égaux, afin que la résultante des poids égaux, placés dans les plateaux, passe toujours par l'axe de suspension et que chaque poids agisse toujours à l'extrémité du même bras du levier. Ce résultat s'obtient en faisant supporter les crochets et le fléau par des pièces à arête très aiguë.

3° Que les plateaux soient de même poids, de même volume, de même nature, c'est-à-dire aussi identiques que possible.

4° Que les bras du levier soient rigoureusement égaux; parce que, pour qu'il y ait équilibre, il faut, comme nous l'avons vu, que la puissance et la résistance soient égales, c'est-à-dire que les bras du levier sur lesquels agissent ces forces soient égaux. Il peut arriver cependant que, cette condition n'étant point remplie, le fléau de la balance reste horizontal quand aucun poids n'est placé dans les bassins. Il suffit que le bassin suspendu au plus long bras soit plus léger que l'autre. Des marchands de mauvaise foi ont usé de ce moyen pour tromper les acheteurs. Pour s'assurer de cette égalité des fléaux, on n'a qu'à changer de plateau l'objet à peser et les poids qui lui ont fait équilibre, après une première pesée. L'horizontalité du fléau obtenue d'abord sera remplacée par une obliquité d'autant plus appréciable que la différence de poids entre les plateaux et l'inégalité des bras du levier seront plus grandes.

Pour obtenir la *sensibilité*, pour que la balance ne soit pas *paresseuse*, c'est-à-dire pour que le plus petit poids placé dans un seul des plateaux fasse osciller aussitôt la balance, il faut :

1° Que le fléau soit très mobile autour de l'axe de suspension. Pour cela, le fléau doit être très léger, afin que son poids ait une faible influence sur le centre de gravité, et être suspendu par un couteau

d'acier dont le tranchant repose sur un corps très poli, très lisse et très dur.

2° Que les bras du fléau soient très longs, afin que l'influence d'un poids placé dans un plateau soit plus grande, en s'exerçant sur un bras de levier plus grand.

3° Que la distance du centre de gravité au centre de suspension soit la plus courte possible; parce qu'alors le poids du fléau, agissant sur un très petit bras de levier, oppose peu de résistance à l'excès de poids d'un des plateaux.

Cependant, cette distance ne doit être ni nulle ni trop petite. On la détermine par la valeur en poids qui correspond aux divisions de l'arc gradué sur lequel se meut l'aiguille. Si, par exemple, il y a 20 divisions de chaque côté du zéro et qu'il faille 2 milligrammes pour le déplacement total de l'aiguille, chaque division correspondra à un excédent de poids de  $\frac{2}{20}$  ou  $\frac{1}{10}$  de milligramme. Il faut donc avoir une distance convenable, que l'on parvient à régler avec précision au moyen d'un écrou placé au-dessus du fléau et qui permet de changer un peu la position du centre de gravité.

**DÉTAILS DE CONSTRUCTION.** — Le fléau est en acier fondu et trempé, et d'une seule pièce, quelquefois en cuivre. Fortin, qui a construit des balances très estimées, employait des règles d'acier placées de champ; les fléaux en étaient très lourds. La forme du fléau est, en général, celle d'un losange très allongé, dont la grande diagonale est horizontale quand la balance est en équilibre. Il doit être très léger; quelquefois même on l'évide pour le rendre encore moins lourd; mais il faut avoir soin de lui laisser une rigidité parfaite. Ainsi s'applique ce principe que nous avons énoncé (page 52), que les organes creux, à égalité de poids, résistent davantage que les organes pleins, et, par conséquent, à égalité de résistance, sont plus légers. On a essayé de faire servir à la construction des fléaux l'aluminium, dont la rigidité est égale à peu près à celle du cuivre et dont la densité est près de quatre fois moindre; mais le prix encore trop élevé de ce métal, peut-être aussi son inaltérabilité moins grande que l'on ne l'avait supposé d'abord, ont obligé à y renoncer. Les arêtes des couteaux, quoique très vives, ne doivent point l'être trop, de peur qu'elles ne s'émoussent facilement. Habituellement, on adapte aux balances une pièce appelée *fourchette*, qui sert à élever le fléau seulement quand on a besoin de se servir de la balance. L'aiguille fixée au fléau, qui indique, sur le cadran divisé, le plus ou moins d'horizontalité du fléau, est longue, afin

que ses indications soient plus appréciables. Enfin on enferme souvent les balances dans des cages de verre pour les préserver de la poussière et de l'agitation de l'air, et l'on place dans ces cages du chlorure de calcium fondu, pour dessécher l'air et préserver ainsi les couteaux de l'oxydation.

Il y a encore à remarquer que, malgré la rigidité du fléau, ses deux extrémités tendent quelquefois à fléchir sous l'action des poids dans les plateaux. Il arrive alors que le fléau, qui dévie si l'on met le plus petit poids dans ses plateaux vides, restera insensible si ce poids est placé en surplus d'une *charge* déjà placée. Il faut donc examiner si les trois couteaux sont toujours bien en ligne droite.

**DOUBLE PESÉE DE BORDA.** — L'égalité des bras du fléau est très rarement exacte dans la pratique. Toutes les fois qu'il est nécessaire d'obtenir une grande rigueur, on se sert de la *méthode des doubles pesées*. Ce procédé, dû au physicien Borda, consiste à tarer d'abord le corps à peser avec des substances quelconques, du sable ou de la limaille de plomb; puis on retire le corps et on met à sa place des poids marqués jusqu'à ce que l'équilibre soit de nouveau rétabli. Il est évident que les poids marqués représentent exactement le poids du corps, en vertu de l'axiome : « Deux quantités égales à une troisième sont égales entre elles. » Cette pesée sera donc rigoureusement exacte.

**PRINCIPALES SORTES DE BALANCES.** — Toutes les balances peuvent être rapportées à deux classes : les balances à bras égaux, dont la balance ordinaire est le type, et les balances à bras inégaux, comme la bascule ou la balance romaine. Nous allons décrire les plus communément employées de l'un et de l'autre type; telles sont la *balance de Roberval*, la *balance de Quintenz*, la *balance romaine*, le *peson* et les *dynamomètres*.

**BALANCE DE PRÉCISION.** — Tout le monde connaît la balance ordinaire, composée de deux plateaux suspendus par des chaînes au fléau, que supporte une colonne, ou que l'on tient par un anneau placé au-dessus du fléau. Nous n'en dirons rien; nous nous contenterons de parler de la balance de précision, dont on se sert dans les laboratoires de physique, de chimie et de pharmacie, qui n'est qu'une balance ordinaire, construite avec beaucoup de soin et présentant toutes les garanties possibles de justesse et de sensibilité.

La figure 64 représente une balance de précision si sensible qu'un excès de poids de 1 milligramme la fait osciller, même quand elle est déjà chargée de 1 kilogramme. Elle est enfermée dans une cage de verre

pour la préserver de la poussière et de l'humidité, des agitations de l'air, et l'on a soin qu'elle ne soit pas exposée dans uné de ses parties plus que dans d'autres à l'action d'une source de chaleur, telle que la radiation directe du soleil ou d'un poêle; sans quoi, outre les courants d'air qui pourraient se produire à l'intérieur de la cage et faire osciller le fléau, des modifications surviendraient peut-être dans les corps eux-mêmes qui entrent dans la construction de la balance. On voit en bas l'extrémité

d'un levier qui permet de soulever le fléau et d'empêcher le couteau de se fatiguer quand on ne se sert pas de l'appareil. L'horizontalité se reconnaît au moyen d'une très longue aiguille fixée au fléau, et dont la pointe correspond à un arc de cercle gradué placé sur le pied de la balance. Enfin elle porte à sa partie supérieure un écrou, qui sert à augmenter sa sensibilité en élevant successivement jusqu'à la limite du possible le centre de gravité.

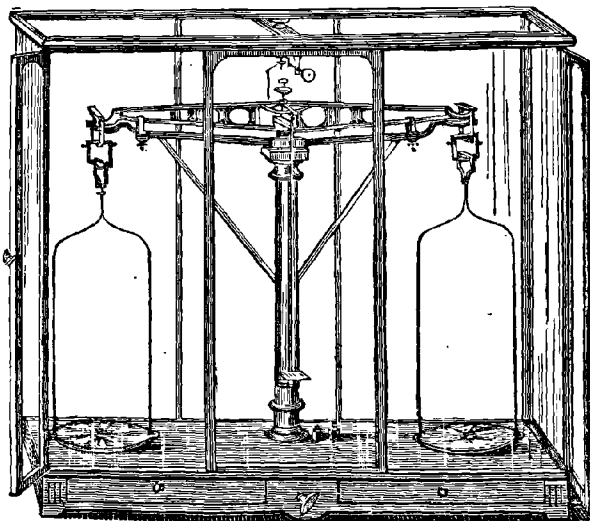


Fig. 64. — BALANCE DE PRÉCISION.

Le nombre des balances dites de *précision* est très grand. Chaque constructeur a trouvé un modèle nouveau. La plus connue aujourd'hui est celle de MM. Deleuil père et fils, que M. Regnault présenta, il y a quelques années, à l'Académie des sciences. Cette balance, montée en fonte, ce qui lui donne une grande solidité, a ses montures en fonte vernie, afin de rester propre, même dans les laboratoires où se dégagent des vapeurs acides.

Le fléau est en laiton bronzé, pour obvier de même à l'altération; les trois couteaux sont sur des plans en agate. Destinée à peser de 150 à 200 grammes, elle est sensible à un dixième de milligramme; l'aiguille parcourt alors une division du cadran dont l'écartement a  $1^{\text{mm}},5$ . Elle est munie de cavaliers à qui l'on fait parcourir les divisions tracées sur le fléau; on évite ainsi de se servir des poids de milligrammes et des divisions.

**BALANCE HORIZONTALE OU ANGLAISE.** — Cette balance (*fig. 65*), connue aussi sous le nom de *Balance de Roberval*, parce qu'elle est une application d'un principe donné par ce géomètre (1), ne diffère de la balance ordinaire qu'en ce que les deux plateaux, au lieu d'être au-dessous du fléau, reposent sur deux couteaux dont les tranchants sont tournés vers le haut et sont fixés à deux tiges mobiles égales, reliées entre elles à leurs extrémités

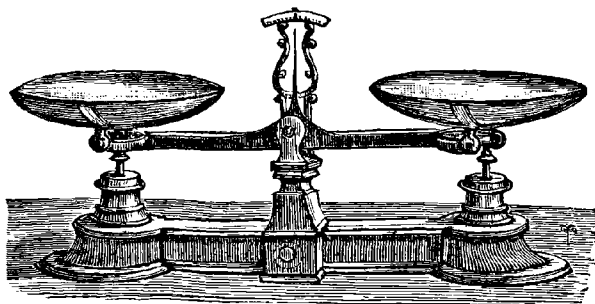


Fig. 65. — BALANCE DE ROBERVAL.

inférieures par un levier également mobile autour de son milieu. Elle devient ainsi beaucoup plus commode, surtout pour peser les objets volumineux, qu'embarrassent les chaînes des plateaux suspendus ; mais elle est généra-

lement moins précise, à cause des frottements auxquels sont assujettis les leviers. Néanmoins, comme elle peut être fort juste jusqu'aux décigrammes, son usage est de plus en plus répandu dans le commerce.

Un constructeur de Lyon, nommé Béranger, a perfectionné la balance de Roberval en la combinant avec la balance de Quintenz, dont nous allons parler. Il voulait que l'équilibre de la balance fût indépendant de la position de la charge, ce qui, nous l'avons dit, s'obtient difficilement dans la balance de Roberval, à cause des frottements. Pour cela, il ajoutait un troisième levier, parallèle au fléau. Ce troisième fléau porte une tige recourbée, dont les deux pointes sont vis-à-vis l'une de l'autre, lorsque la balance est en équilibre (*fig. 66*).

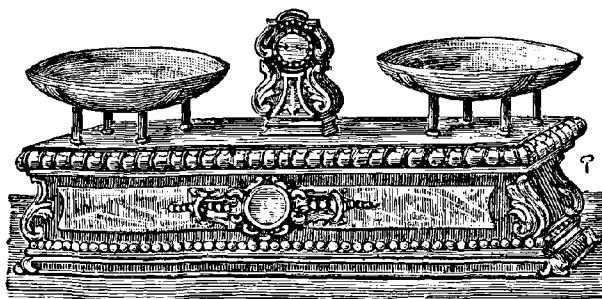


Fig. 66. — BALANCE DE BÉRANGER.

(1) GILES PERSONE DE ROBERVAL (1602-1675), géomètre, professeur de mathématiques au Collège de France, a donné de savants mémoires à l'Académie des sciences, dont il était membre; fit de précieuses découvertes en géométrie et eut de vives discussions avec Descartes, sur le système du monde. Il a laissé une traduction du *Traité d'Aristarque de Samos* sur ce sujet. Très lié avec Pascal, il engagea celui-ci dans ses disputes contre Torricelli et Descartes.

**BALANCE COULON.** — Nous ne pouvons énumérer les différentes formes de balances que journellement des inventeurs proposent et qui, par le fait, ne sont guère que des modifications plus ou moins heureuses, et souvent insignifiantes, des systèmes connus. Cependant nous dirons un mot d'une nouvelle balance, dite *balance Coulon*, du nom de son inventeur, et qui, admise très récemment au poinçon de l'État (19 avril 1880), signalée aux préfets, est appelée, croyons-nous, à un grand succès.

Nous empruntons, en la résumant, la description à M. Vignes, l'éminent professeur de physique du collège Chaptal, qui l'a ainsi présentée aux lecteurs du journal la *France*, dans sa Revue scientifique hebdomadaire :

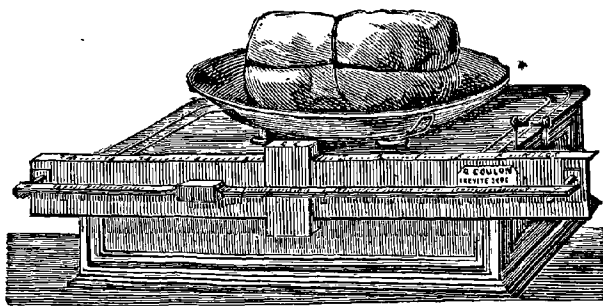


Fig. 67. — BALANCE COULON.

« Cette balance (fig. 67) n'a qu'un seul plateau ; par conséquent elle occupe, à force égale, moitié moins de place sur la

table ou sur le comptoir que les autres balances. Ce plateau unique est disposé comme ceux des balances de boulanger. Elle supprime totalement l'usage des poids, usage incommode, encombrant et coûteux. En supprimant les poids, on évite, outre l'inconvénient résultant de la facilité avec laquelle ils s'égarerent, l'incommodité des longs tâtonnements qu'exige leur emploi dans la plupart des pesées. Avec la nouvelle balance, les pesées se font pour ainsi dire instantanément, et cela simplement au moyen de deux petites masses inégales, *deux* seulement, *toujours les mêmes* pour toutes les pesées. Ces deux masses peuvent cheminer, à la volonté de l'opérateur, le long de deux règles graduées. En raison de leur mobilité, ces masses sont désignées sous le nom de *courseurs*.

» Les deux règles, de même longueur, sont disposées parallèlement l'une à l'autre et reliées bout à bout. Chacun des deux *courseurs* se meut sur une règle spéciale. Celui dont la masse est la plus forte glisse sur la première règle et y fournit l'indication des kilogrammes et des hectogrammes. Le *courseur* dont la masse est moindre se déplace sur la seconde règle et donne ainsi, en décagrammes et en grammes, le complément du poids cherché.

» Dans l'état de vacuité du plateau, les *courseurs* occupent les zéros

des deux règles situés à l'une des extrémités de celles-ci. Le double fléau formé par ces deux règles est alors horizontal.

» Lorsqu'on a une pesée à faire, on place dans le plateau l'objet à peser; sous l'action de cette charge, le double fléau se relève du côté opposé aux zéros. On fait alors glisser le long de sa règle le curseur le plus fort pour avoir le nombre des kilogrammes et des hectogrammes, puis le curseur de faible masse pour avoir les décagrammes et les grammes, jusqu'à ce que le double fléau ait pris la position horizontale.

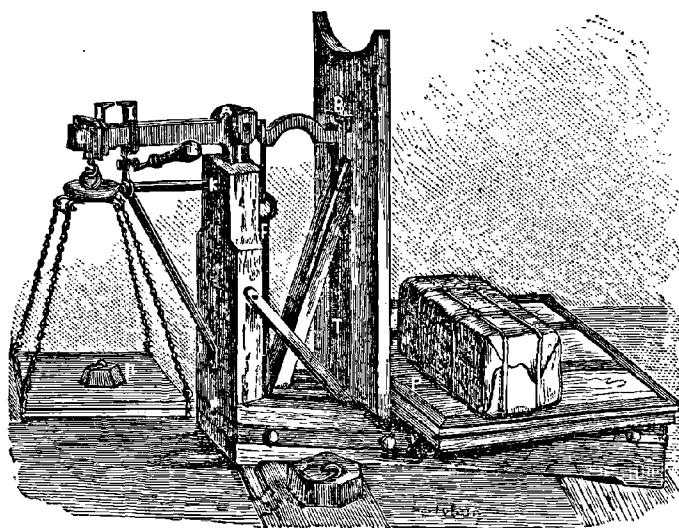


Fig. 68. — BALANCE DE QUINTENZ OU BASCULE.

» Il n'y a plus qu'à enregistrer les chiffres marqués en regard des raies.

» Le mécanisme de cette balance, dont nous venons d'indiquer le mode d'emploi, est uniquement composé de leviers. On peut le considérer comme un demi-système Béranger associé à une romaine. »

Nous ne voyons à cette balance qu'un inconvénient, c'est que les marchands qui fraudent sur le poids des marchandises vendues (et les ménagères en connaissent beaucoup) pourront difficilement continuer leur fraude fructueuse. On ne peut satisfaire tout le monde. Nous croyons que l'inventeur a rendu un grand service à l'immense majorité, et nous plaignons peu ceux qui seront forcés de renoncer à leurs vieilles habitudes.

**BALANCE DE QUINTENZ.** — Cette balance, ainsi nommée du nom de son inventeur, mais désignée le plus souvent sous le nom de *bascule*, est



employée surtout dans les bureaux de chemins de fer, dans les fabriques, les usines, etc., partout où l'on a besoin de connaître le poids d'objets très lourds. Elle est un des types les plus usités de la balance à bras inégaux.

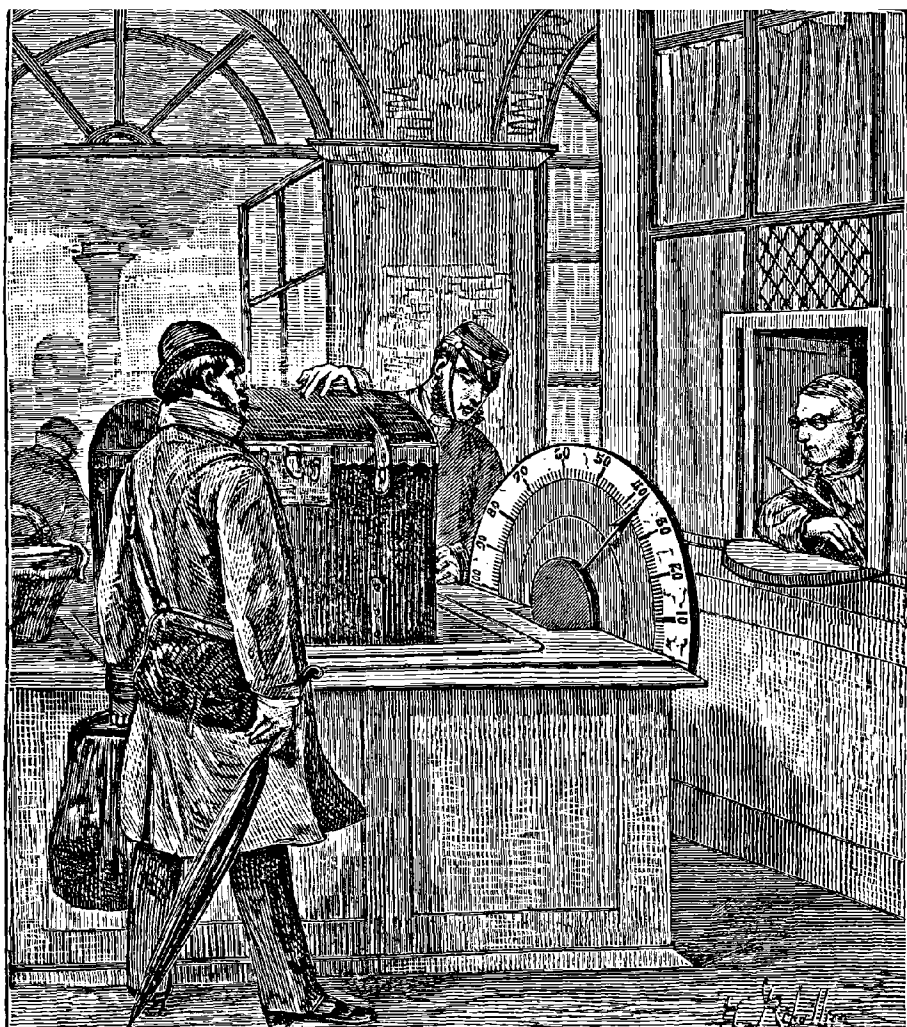


Fig. 69. — Emploi de l'appareil autopeseur-dynamique-circonvecteur (page 154).

Elle se compose (*fig. 68*) d'un plateau P en bois, plateau plus ou moins grand, quelquefois même placé à terre, afin que des voitures chargées puissent se poser dessus, et suspendu par deux tiges de fer T et F au bras du levier AB ; puis d'un autre plateau *p*, suspendu à l'extrémité

d'un bras de levier AC, et qui devra recevoir les poids destinés à faire équilibre au corps à peser, placé sur le plateau P. Ce plateau P est disposé de telle sorte que tout le poids du corps à peser est transmis intégralement en B sur le levier CAB dont le point fixe est en A, point où le couteau qui soutient le fléau est adapté par deux pièces de fer au montant de la bascule. Le bras CA est dix fois plus grand que AB. D'après la loi que nous avons établie ci-dessus (page 140), il suffit donc de mettre sur le plateau *p* un poids dix fois plus petit pour obtenir l'équilibre. Pour soulager les couteaux qui supportent les plateaux et éviter les chocs brusques lorsqu'on les décharge après une pesée, on soulève le bras AC en relevant, au moyen d'une poignée *z*, une pièce K qui est au-dessous du fléau. Enfin l'horizontalité est marquée par deux indicateurs I, I', fixés le premier I à la charpente même de la bascule, le second I' au fléau, et qui doivent être bien en face l'un de l'autre quand l'équilibre est établi.

La bascule a reçu de nombreuses modifications de détail, et, entre mille, il y a quelques années, il avait été proposé, à l'usage des gares de chemins de fer, des entrepôts, des fabriques, etc., un nouveau système de bascule très simple, obviant à tous les inconvénients et inexactitudes des balances ordinaires, permettant de mettre la pesée sous le contrôle de l'acheteur et rendant toute erreur ou toute fraude impossible.

L'inventeur avait donné à cet appareil le nom quelque peu compliqué d'*autopeseur-dynamique-circonvecteur*. *Autopeseur*, parce qu'il indique de lui-même le poids des colis et autres objets; *dynamique*, parce qu'il est construit sur le système des bascules et du levier; *circonvecteur*, parce que le point d'appui du levier, au lieu d'être un couteau à lame aiguë, était, paraît-il, un système de rouleaux ou cylindres tournant sur eux-mêmes.

Tous ceux qui ont voyagé et qui savent la confiance absolue qu'il faut avoir dans l'homme de peine qui pèse les bagages, tous ceux qui ont assisté aux discussions violentes auxquelles donne lieu le pesage aux octrois des villes, à l'entrée et à la sortie des usines et dans mille circonstances, regretteront que cet appareil ou un appareil analogue ne soit pas adopté partout.

La gravure qui accompagne notre texte le fait mieux comprendre que toute explication. Cette gravure représente la partie de la gare d'un chemin de fer où l'on pèse les bagages, avec la table longue sur laquelle ceux-ci se déposent, et le bureau de l'employé, toujours très pressé et quelquefois peu aimable, qui inscrit les poids, donne le bulletin et perçoit la somme due en cas d'excédent du poids transporté gratuitement avec le voyageur (*fig. 69*).

L'homme d'équipe a déposé les colis d'un voyageur sur le plateau de l'appareil qui est au niveau de la table destinée à cela. Ce plateau est celui de la bascule qui est dissimulée au-dessous. Aussitôt la pesée se fait, et sur un demi-cadran à double face, l'une tournée du côté du public, l'autre du côté des employés, portant les chiffres indicateurs des différents poids par grandes divisions de 10 ou 12 kilogrammes, avec sous-divisions par kilogrammes, l'aiguille, qui correspond avec le levier de manière à en subir toutes les influences, marque le poids des objets en s'élevant d'autant plus qu'il est plus lourd. Ainsi l'employé voit, par son guichet, le poids des colis et l'inscrit ; mais en même temps le voyageur lit lui-même ce poids, et il est certain qu'il n'y a pas erreur, ce qui évite toute contestation.

Il va sans dire que la portée de l'appareil peut s'élever jusqu'à un nombre quelconque de kilogrammes ; mais, pour les colis des voyageurs, on peut se contenter d'un cadran qui marquerait seulement jusqu'à 100 kilogrammes, comme celui de notre gravure.

De l'emploi de cet appareil, que nous regrettons de ne point voir adopté partout, résulterait de plus une grande simplification, qui ferait disparaître des allées et venues, des déplacements de colis, des recherches de poids égarés, des tâtonnements sur le balancier de la bascule, etc., et, par suite, plus de célérité et moins d'encombrement. Ceux qui, dans nos campagnes, ont assisté à la réception des betteraves dans une fabrique de sucre, par exemple, partageront certainement nos regrets.

C'est encore sur les principes de la balance de Quintenz que sont construits les *ponts à bascule* ou balances de *Sanctorius* (1), auquel on attribue l'invention de ces instruments.

Une loi du 29 floréal an X établissait des *ponts-bascules* à l'entrée et à la sortie de toutes les villes pour peser les voitures publiques et s'assurer si leur chargement n'excédait pas le poids déterminé par les règlements. Cette loi a été abrogée par celle du 30 mai 1851.

**BALANCE ROMAINE.** — La balance romaine (*fig. 70*) est basée sur le même principe que la balance de Quintenz, c'est-à-dire que les poids de deux corps pesants agissant aux extrémités de deux bras de levier inégaux, sont, quand l'équilibre est établi, en raison inverse de la longueur des bras de levier. Mais elle est plus commode que celle-ci, parce qu'elle

(1) SANCTORIUS (1561-1626), médecin italien, professeur à l'université de Padoue, mort à Venise, imagina un *mesureur de chaleur*, nom dont *thermomètre* n'est que la traduction grecque, et qui était dans l'origine destiné à indiquer seulement la chaleur des fébricitants. Il prétendait que la cause de la santé et des maladies dépendait de la transpiration, et chaque jour il se pesait pour calculer les déperditions que subit le corps humain. Cette habitude de pesage lui donna l'idée de créer une balance spéciale et commode, et il trouva le pont-basculé.

n'exige pas l'emploi de poids marqués. Elle se compose d'un fléau AB, dont la plus petite partie OA forme un bras de levier d'une longueur constante, qui porte à son extrémité un crochet destiné à supporter les fardeaux à peser. Sur le grand bras OB, gradué préalablement, c'est-à-dire garni de petits crans convenablement disposés, glisse un poids P suspendu par un anneau, lequel poids, avancé ou reculé le long de ce levier gradué, fait équilibre aux corps pesants suspendus au crochet placé à

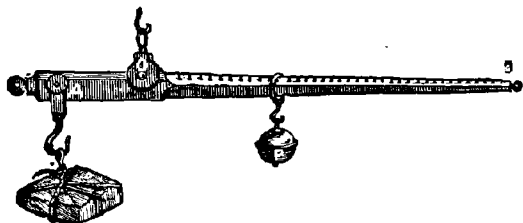


Fig. 70. — BALANCE ROMAINE.

l'extrémité de OA. On reconnaît que l'équilibre a lieu quand, après quelques oscillations, le fléau reste horizontal. Généralement, le centre de gravité O de l'appareil est sur la verticale qui passe par l'arête du couteau de suspension et un peu au-des-

sus. Le zéro de la graduation est donc au point de suspension, puisque, sans poids d'aucun côté, le fléau reste horizontal.

Cette balance, utile seulement pour peser les fardeaux considérables, quand on ne tient pas à une rigoureuse exactitude, n'est rien moins que sensible; aussi n'est-elle légalement autorisée que si elle oscille pour un excès de poids égal à la 500<sup>e</sup> partie de sa charge maximum.

**PESON.** — Le peson (*fig. 71*) ne s'emploie guère que pour peser les matières légères, par exemple, dans les filatures, de la soie, du coton, de la laine, ou des lettres (*pèse-lettres*). Comme la romaine, le peson n'a pas besoin de poids marqués. C'est un levier coudé, du premier genre, à bras inégaux AOB, mobile autour du point O. Ce levier porte à son extrémité A une petite masse de fer, et, à l'autre extrémité B, un crochet, auquel est suspendu un plateau. Au point O du levier est une aiguille qui oscille le long d'un cercle gradué CD, fixé sur le support de l'instrument. Quand le peson est vide, l'aiguille est verticale; plus lourds sont les poids placés dans le plateau, plus l'aiguille monte le long de l'arc.

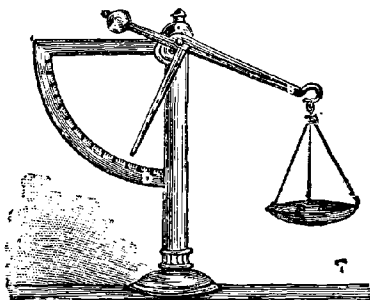


Fig. 71. — PESON.

**BALANCES DIVERSES.** — Il existe encore un nombre infini de balances,

variant soit de forme, soit de prix de fabrication ; mais toutes ne sont que des modifications plus ou moins heureuses des types que nous avons décrits. Ces modifications sont quelquefois nécessitées par la destination de ces instruments, par la place qu'ils doivent occuper dans une usine, par le milieu dans lequel ils doivent rester.

Ainsi la balance de M. *Pherson*, qui fonctionne sans poids et avec un seul plateau, comme la romaine. Elle consiste principalement dans un disque annulaire mobile, susceptible de tourner horizontalement sur un autre disque et dans un plateau qui s'en détache au-dessus. Le disque porte un contrepoids, auquel le plateau fait équilibre. Dès qu'on met la marchandise dans le plateau, cet équilibre est rompu, ce qu'on voit par une aiguille indicative ; mais il suffit de faire tourner horizontalement le plateau mobile pour rétablir l'équilibre. Or, une échelle est dessinée sur le disque inférieur, et cette échelle donne le poids de la marchandise, laquelle pèse plus ou moins selon qu'il a fallu faire tourner plus ou moins le premier disque pour que l'équilibre soit rétabli.

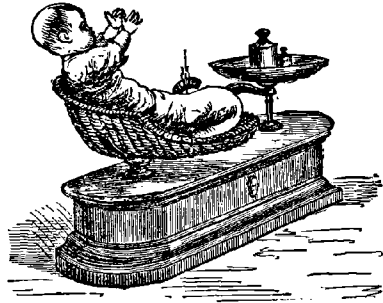


Fig. 72. — PÈSE-BÉBÉ.

Nous voulons encore signaler à l'attention un appareil de pesage spécialement applicable aux bébés, et, pour cela, nommé *pèse-bébé* ou *berceau-balance*. Cet appareil est dû à M. le docteur Groussin, médecin en chef de l'établissement hydrothérapique de Bellevue. C'est tout simplement un berceau auquel est adaptée une balance du système Béranger extrêmement sensible (*fig. 72*). On sait que, pour qu'un petit enfant se porte bien, il faut que chaque jour il augmente de poids ; s'il n'augmente ni ne diminue, l'attention est éveillée ; s'il diminue, l'enfant est malade. *En moyenne*, l'enfant, jusqu'à cinq mois, doit augmenter de vingt-cinq grammes par jour ; à partir de cinq mois, il n'augmentera plus que de quinze grammes ; mais l'important est qu'il augmente. On voit donc la nécessité d'un pesage au moins hebdomadaire, et l'utilité d'un appareil qui, sans déplacement, sans embarras, permet de constater chaque jour le poids de l'enfant.

**DYNAMOMÈTRES.** — L'appareil que nous avons décrit (*fig. 17*, page 51) pour mesurer l'élasticité de flexion n'est pas autre chose qu'un dynamomètre. Les divisions de l'arc de cercle MN, au lieu d'indiquer les milli-

mètres d'écart, indiquent les poids du corps qui, suspendu en K, fait marquer à l'aiguille telle ou telle division de l'arc.

Remarquons que toutes les balances dont nous avons parlé ne donnent que le *poids relatif* des corps, tandis que le dynamomètre en donne le *poids absolu*. (Voir page 93.) C'est dire que les corps pesés dans une balance conserveront le même poids sous quelque latitude qu'ils soient pesés, parce que l'intensité de la pesanteur, comme nous l'avons vu, s'exercera sur les poids qui servent à peser, aussi bien que sur le corps à peser, tandis qu'en transportant le dynamomètre de l'équateur au pôle, on verrait le ressort fléchir de plus en plus à mesure qu'on s'élèverait en latitude.

**POIDS.** — Les balances, excepté le dynamomètre, donnent le poids relatif des corps, c'est-à-dire le rapport de leur poids absolu à un autre poids pris pour unité (page 93); on a toujours rapporté le poids des corps à peser à un poids étalon invariable, identique pour tous les habitants d'un même pays et d'où découlent tous les autres. C'est ce qu'on appelle un *système légal de poids*.

Ces systèmes ont été dissemblables pour chacun des peuples de l'antiquité, et, aujourd'hui encore, on cherche à obtenir pour toutes les nations une uniformité qui, malgré ses avantages évidents, n'est point encore atteinte. Nous donnons la série des principaux poids dans l'antiquité, et, de nos jours, chez les peuples étrangers, en les rapportant au système métrique.

On verra, d'après le tableau ci-contre, que les systèmes adoptés chez les divers peuples, soit de l'antiquité, soit des temps modernes, diffèrent entre eux, tant par la grandeur des différentes unités que par la loi d'après laquelle les divisions de l'unité principale correspondante se déduisent de celle-ci.

Le plus frappant des inconvénients de chacun de ces systèmes particuliers est qu'ils sont tous absolument différents de ceux des autres peuples, quelquefois même de ceux des habitants d'une province voisine, dans le même pays.

*Poids en usage chez les différents peuples de l'antiquité  
et des temps modernes.*

NATIONS.	UNITÉ de poids.	VALEUR en grammes.	MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES.
Judée .....	Sicle.	14,200	$\frac{1}{3000}$ talent = $\frac{1}{60}$ mine = 2 béka = 4 drachmes = 20 gherach.
Grèce antique..	Drachme.	4,363	$\frac{1}{6}$ talent = 10 mines = 3 grammes ou scrupules = 6 oboles.
Rome antique...	Livre.	327,180	12 onces = 288 scrupules = 1728 grains.
France ancienne	Livre.	489,500	$\frac{1}{2000}$ tonneau = $\frac{1}{100}$ quintal = 2 marcs = 16 onces = 128 gros.
D <sup>o</sup>	Gros (médecine).	0,00383	3 deniers ou scrupules = 72 grains = 288 carats.
Angleterre .....	Livre troy	373,100	12 onces = 240 pennyweights = 5,760 grains.
D <sup>o</sup>	Livre avoir du poids	453,400	$\frac{1}{2240}$ tonne = $\frac{1}{112}$ quintal = 16 onces = 256 drams.
Antriche .....	Livre.	560,000	$\frac{1}{100}$ quintal = 16 onces = 32 lotis = 128 drachmes = 512 pfennig.
Bavière.....	Livre.	501,100	$\frac{1}{100}$ quintal = 32 loth.
Berne .....	Livre.	520,100	$\frac{1}{100}$ quintal = 16 onces = 32 loth.
Danemark .....	Livre.	499,200	$\frac{1}{100}$ quintal = 32 loth.
Espagne.....	Livre de Castille.	460,300	$\frac{1}{50}$ quintal macho = $\frac{1}{100}$ quintal = $\frac{1}{25}$ d'arrobe = 2 marcs = 16 onces = 256 drachmes.
Prusse.....	Livre.	458,500	$\frac{1}{10}$ quintal = 2 marcs = 32 loth.
Russie.....	Livre.	409,500	$\frac{1}{400}$ Berkovetz = $\frac{1}{40}$ pound = 60 zolotniks = 926 doleis.
Suède.....	Livre.	425,100	
Zurich.....	Livre.	528,400	$\frac{1}{100}$ quintal = 18 onces = 36 loth.
D <sup>o</sup>	Livre (soieries).	489,700	2 marcs = 16 onces = 32 loth.

Dès l'antiquité, les civilisateurs avaient songé à obvier à cet inconvénient. Maître du monde, Jules César voulait imposer à tous les peuples l'unité des poids et mesures, en même temps qu'il réformait le calendrier pour que les mois fussent d'accord avec le soleil. La mort l'arrêta. Mécène proposait la même chose à Auguste, au rapport de Dion. Charlemagne le tenta. Prenant pour étalon la livre romaine, il la faisait égale à 12 onces ou à 96 drachmes (deniers), ou à 288 scrupules. Le moyen âge ne pouvait conserver quelque chose d'utile. La *livre* de Charlemagne n'a été conservée intacte, sous le nom de *poids de médecine*, que dans les pharmacies. Mais, partout ailleurs, il y eut autant de livres, de pieds, de perches, de pintes, de boisseaux différents qu'il y a de contrées et de

villes. Cette unité, dont tout le monde sentait le besoin, que vainement décrétait en France Philippe V (1320), était devenue la confusion des langues, une vraie tour de Babel.

En cela, comme en mille autres objets, il fallait la Révolution française, non seulement pour détruire le mal, mais pour le remplacer par le bien.

Ce fut le 8 mai 1790 que l'Assemblée nationale décréta la suppression de l'ancien système des poids et mesures français et la création d'un système plus conforme à l'état de la science. Une commission nommée par l'Académie des sciences, et qui comptait parmi ses membres Berthollet, Borda, Lagrange, Delambre, Laplace, Méchain et Prony, fut chargée d'en étudier les bases.

Comme nous l'avons dit (page 34), pour imprimer à ce nouveau système une durée qui fût à l'abri des révolutions qui ont bouleversé le monde, les auteurs résolurent d'abord de donner aux nouvelles mesures une base commune et de prendre cette base dans la nature même. En conséquence, Delambre et Méchain mesurèrent l'arc du méridien compris entre Dunkerque et Barcelone et établirent ainsi la longueur du mètre. En second lieu, les unités secondaires étant, dans presque tous les anciens systèmes, de huit en huit fois ou de douze en douze fois plus petites ou plus grandes, et cela donnant lieu, pour les moindres calculs, à des opérations très compliquées, notamment pour la multiplication et la division, ils voulurent que les multiples et les sous-multiples d'une même unité principale suivissent la subdivision décimale.

Un décret de la Convention, daté du 1<sup>er</sup> août 1793, fixa la date à laquelle le nouveau système serait obligatoire; mais les travaux matériels de fabrication des nouvelles mesures n'étant point terminés, ce délai fut prorogé par la loi du 18 germinal an III (7 avril 1795), qui cependant déclarait définitive, en principe, l'adoption du système métrique décimal.

Nous donnons les principaux articles de cette loi fondamentale, telle que la publia le *Bulletin des Lois*, afin de montrer combien parfaites étaient, dès l'origine, les dispositions prises, et combien il faut accuser les gouvernements qui ont pendant si longtemps hésité à les faire rigoureusement exécuter :





Par suite de la rupture des digues, 200,000 Chinois furent noyés (page 176).





LOIS  
DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

AN III  
DE LA RÉPUBLIQUE UNE ET INDIVISIBLE

N° 133.

(N° 749. *LOI relative aux poids et mesures.*

Du 18 Germinal.

LA CONVENTION NATIONALE,

Voulant assurer au peuple français le bienfait des poids et mesures uniformes et invariables précédemment décrétés et prendre les moyens les plus efficaces pour en faciliter l'introduction dans toute la République, après avoir entendu le rapport de son comité d'instruction publique, DÉCRÈTE ce qui suit :

ART. 1<sup>er</sup>. L'époque prescrite par le décret du 1<sup>er</sup> août 1793 (*vieux style*), pour l'usage des nouveaux poids et mesures, est prorogé, quant à la disposition obligatoire, jusqu'à ce que la Convention nationale y ait statué de nouveau en raison des progrès de la fabrication; les citoyens sont cependant invités de donner une preuve de leur attachement à l'unité et à l'indivisibilité de la République, en se servant dès à présent des nouvelles mesures dans leurs calculs et transactions commerciales.

II. Il n'y aura qu'un seul étalon des poids et mesures pour toute la République; ce sera une règle de platine sur laquelle sera tracé le mètre, qui a été adopté pour l'unité fondamentale de tout le système des mesures.

Cet étalon sera exécuté avec la plus grande précision, d'après les expériences et les observations des commissaires chargés de la détermination, et il sera déposé près du Corps législatif, ainsi que le procès-verbal des opérations qui auront servi à le déterminer, afin qu'on puisse les vérifier dans tous les temps.

III. Il sera envoyé dans chaque chef-lieu de district un modèle conforme à l'étalon prototype dont il vient d'être parlé, et en outre un modèle de poids exactement déduit du système des nouvelles mesures. Ces modèles serviront à la fabrication de toutes les mesures employées aux usages des citoyens.

IV. L'extrême précision qui sera donnée à l'étalon en platine ne pouvant pas influer sur l'exactitude des mesures usuelles, ces mesures continueront d'être fabriquées d'après la longueur du mètre adoptée par les décrets antérieurs.

V. Les nouvelles mesures seront distinguées dorénavant par le surnom de *républicaines*; leur nomenclature est définitivement adoptée comme il suit :

On appellera,

*Mètre*, la mesure de longueur égale à la dix millionième partie de l'arc du méridien terrestre compris entre le pôle boréal et l'équateur;

*Are*, la mesure de superficie pour les terrains, égale à un carré de 10 mètres de côté;

*Stère*, la mesure destinée particulièrement aux bois de chauffage, et qui sera égale au mètre cube;

*Litre*, la mesure de capacité, tant pour les liquides que pour les matières sèches, dont la contenance sera celle du cube de la dixième partie du mètre ;

*Gramme*, le poids absolu d'un volume d'eau pure, égal au cube de la centième partie du mètre, et à la température de la glace fondante ;

Enfin l'unité des monnaies prendra le nom de *franc*, pour remplacer celui de *livre* usité jusqu'aujourd'hui.

(*Les articles VI et VII donnent la nomenclature des multiples et sous-multiples de chaque unité ; l'article VIII autorise le double et la moitié des poids et des mesures de capacité.*)

IX. Pour rendre le remplacement des anciennes mesures plus facile et moins dispendieux, il sera exécuté par parties et à différentes époques. Ces époques seront décrétées par la Convention nationale aussitôt que les mesures républicaines se trouveront fabriquées en quantités suffisantes et que tout ce qui tient à l'exécution de ces changements aura été disposé. Le nouveau système sera d'abord introduit dans les assignats et monnaies, ensuite dans les mesures linéaires ou de longueur et progressivement étendu à toutes les autres.

X. Les opérations relatives à la détermination de l'unité des mesures de longueur et de poids, déduites de la grandeur de la terre, commencées par l'Académie des sciences et suivies par la commission temporaire des mesures, en conséquence des décrets des 8 mai 1790 et 1<sup>er</sup> août 1793 (*vieux style*), seront continuées jusqu'à leur entier achèvement par des commissaires particuliers, choisis principalement parmi les savants qui y ont concouru jusqu'à présent et dont la liste sera arrêtée par le comité d'instruction publique. Au moyen de ces dispositions, l'administration dite *commission temporaire des poids et mesures* est supprimée.

XI. Il sera formé en remplacement une agence temporaire composée de trois membres et qui sera chargée, sous l'autorité de la commission d'instruction publique, de tout ce qui concerne le renouvellement des poids et mesures, sauf les opérations confiées aux commissaires particuliers dont il est parlé dans l'article précédent.

Les membres de cette agence seront nommés par la Convention nationale, sur la proposition de son comité d'instruction publique. Leur traitement sera réglé par ce comité.

XII. Les fonctions principales de l'agence temporaire seront :

1<sup>o</sup> De rechercher et employer les moyens les plus propres à faciliter la fabrication des nouveaux poids et mesures pour les usages de tous les citoyens ;

2<sup>o</sup> De pourvoir à la confection et à l'envoi des modèles qui doivent servir à la vérification des mesures dans chaque district ;

3<sup>o</sup> De faire composer et de répandre les instructions convenables pour apprendre à connaître les nouvelles mesures et leurs rapports avec les anciennes ;

4<sup>o</sup> De s'occuper des dispositions qui deviendraient nécessaires pour régler l'usage des mesures républicaines et de les soumettre au comité d'instruction publique, qui en fera rapport à la Convention nationale ;

5<sup>o</sup> D'arrêter les états de dépenses de toutes les opérations qu'exigeront la détermination et l'établissement des nouvelles mesures, afin que ces dépenses puissent être acquittées par la commission d'instruction publique ;

6<sup>o</sup> Enfin, de correspondre avec les autorités constituées et les citoyens dans toute la République, sur tout ce qui sera utile pour hâter le renouvellement des poids et mesures.

(*Les articles XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX et XXI règlent la fabrication, les formes, le contrôle des nouvelles mesures et le paiement des dépenses y afférentes.*)

XXII. La disposition de la loi du 4 frimaire, an II<sup>e</sup>, qui rend obligatoire l'usage de la division décimale du jour et de ses parties, est suspendue indéfiniment...

XXIV. Aussitôt après la publication du présent décret, toute fabrication des anciennes mesures est interdite en France, ainsi que toute importation des mêmes objets venant de l'étranger, à peine de confiscation et d'une amende du double de la valeur desdits objets.

XXV. Dès que l'étalon prototype des mesures de la République aura été déposé au Corps législatif par les commissaires chargés de sa confection, il sera élevé un monument pour le conserver et le garantir de l'injure des temps.

L'agence temporaire s'occupera d'avance du projet de ce monument destiné à consacrer de la manière la plus indestructible la création de la République, les triomphes du peuple français et l'état d'avancement où les lumières sont parvenues dans son sein.

Visé, signé : S.-E. MONNEL.

Collationné. Signé : BOISSY, *président*; BAILLEUL, F. LANTHENAS, *secrétaires*.

*Certifié conformes aux originaux, visés et collationnés par les Représentants du peuple inspecteurs, président et secrétaires dénommés :*

Les membres de l'Agence de l'envoi des lois :



*Dumoulin*  
= *Chauge* =

A PARIS, DE L'IMPRIMERIE DE LA RÉPUBLIQUE.

Le 1<sup>er</sup> vendémiaire an IV, la Convention, par une nouvelle loi, fixe au 1<sup>er</sup> nivôse suivant l'usage exclusif des nouvelles mesures dans la commune de Paris et au 10 nivôse dans tout le département de la Seine, devant faire exécuter progressivement dans toute la France la loi du 18 germinal an III; mais ce n'est que par la loi du 13 brumaire an IX (2 novembre 1801) que le système métrique est adopté dans toutes ses parties.

Néanmoins, le 12 février 1812, un décret impérial, signé aux Tuileries, autorise, par tolérance, l'emploi simultané de l'ancien et du nouveau système, et il faut attendre la loi du 4 juillet 1837 pour que définitivement les anciennes mesures soient prosrites et que le système métrique décimal devienne exclusivement obligatoire à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1840.

Tout le monde sait que l'unité de poids, dans le système métrique, est la *gramme*, dont le nom vient du mot grec *gramma*, poids d'un scrupule, et dont le poids est le poids, dans le vide, d'un centimètre cube d'eau distillée, à son maximum de densité, c'est-à-dire à 4 degrés au-dessus du zéro du thermomètre centigrade, et sous la latitude de 45 degrés (latitude moyenne entre l'équateur et les pôles) et au niveau de la mer. Toutes ces conditions sont indispensables. Elles sont toutes la conséquence de la doc-

trine de Newton qui explique la pesanteur. Nous avons vu que l'intensité de la pesanteur variait suivant les altitudes et les latitudes; il fallait donc, pour que le gramme soit une unité fixe, le définir d'une manière aussi détaillée et aussi précise.

On sait également que la représentation matérielle du gramme, de ses multiples et de ses sous-multiples, et aussi des doubles et des moitiés de ces unités, forme trois séries : 1° les poids en fonte de fer, qui ont la forme rectangulaire, de 50 à 20 kilogrammes, et la forme hexagonale, de 20 kilogrammes à 50 grammes; 2° les poids en cuivre de 10 kilogrammes à 1 gramme, qui ont la forme d'un cylindre surmonté d'un bouton ou celle d'un godet; 3° les poids de 1 gramme à 1 milligramme en cuivre, en platine ou en aluminium, et qui ont la forme de petites plaques carrées. Dans les pesées de précision, la crainte d'altérer ces derniers poids oblige à ne les prendre, pour les placer dans les balances, qu'avec de petites pinces.

Les poids nouvellement fabriqués ou réparés doivent être contrôlés et poinçonnés. Des *bureaux de poids* sont établis, dans ce but, dans les villes de quelque importance. Des *vérificateurs* sont chargés d'inspecter les poids chez les personnes qui en font usage et de poursuivre ceux qui n'ont pas ceux qu'exige la loi. Un décret du 26 février 1873 règle tous les détails de ces vérifications, en établit l'annualité, en fixe les frais et indique les commerces, industries et professions qui y sont assujettis.

Les détenteurs de faux poids sont punis par la loi d'une amende de 11 à 15 francs et quelquefois d'un emprisonnement dont la durée ne peut excéder cinq jours. Ceux qui, par l'usage de faux poids, ont trompé l'acheteur sont punis d'un emprisonnement de trois mois à un an et d'une amende de 50 francs au moins.

La supériorité du système métrique français sur tous les systèmes connus de poids et mesures est tellement évidente, que, dès 1855, une société internationale s'était formée à Paris pour le propager. Cette société, qui porte le nom de *Commission internationale du mètre*, poursuit courageusement ses efforts, et nous avons parlé (page 34) de l'importante opération métallurgique exécutée par M. Sainte-Claire Deville, d'après les prescriptions de la Commission réunie à Paris en 1872, ayant pour objet la confection de nouveaux étalons.

Déjà la Belgique, la Hollande, le Luxembourg, la Suisse (1868), l'Allemagne du Nord (1872) l'ont adopté; en Angleterre, son emploi est facultatif (1864); l'Italie, la Grèce, l'Espagne, la Roumanie, la plupart des républiques de l'Amérique du Sud ont créé leurs monnaies d'après lui; il y a donc lieu d'espérer que le système républicain des poids et mesures deviendra, avant peu d'années, celui de tout l'univers civilisé.

## CHAPITRE VI

### HYDROSTATIQUE

**DÉFINITION ET HISTORIQUE.** — L'*Hydrostatique* (du grec *udor*, eau ; *statikos*, équilibre) est la partie de la physique qui traite des conditions d'équilibre des fluides, liquides ou gazeux, supposés parfaits, et des pressions qu'ils exercent soit sur leur masse, soit sur les parois des vases qui les contiennent. Nous considérerons toutefois plus spécialement les liquides.

On appelle *Hydrodynamique* la branche particulière de l'Hydrostatique qui s'occupe des mouvements des liquides, et *Hydraulique* celle qui enseigne à appliquer les principes à l'art de conduire et d'élever les eaux dans des conditions voulues.

Ces trois sciences ont été, pour ainsi dire, créées par Archimède, qui en donne les premières notions dans son traité *De insidentibus humido* et qui découvrit le principe fameux de la pression des liquides sur les corps qui y sont plongés. Nous avons dit déjà que Ctésibius avait inventé les pompes, les orgues et les horloges à eau, et Héron la fontaine de compression qui porte son nom. Plus tard, vers le temps de César, les moulins à eau furent importés d'Asie en Italie ; et l'on sait les admirables aqueducs que construisirent les Romains. L'*hydrostatique* ou du moins l'application des principes de l'hydrostatique n'étaient donc point étrangers à l'antiquité ; mais ce ne fut qu'au xvii<sup>e</sup> siècle que furent posés véritablement, par l'illustre Pascal, les fondements de cette science.

**PRINCIPE D'ÉGALITÉ DE PRESSION.** — La constitution spéciale des liquides, c'est-à-dire l'extrême mobilité de leurs molécules, leur impénétrabilité et leur incompressibilité, ont donné lieu au principe suivant.

*Les liquides transmettent toute pression exercée en un point quelconque de leur masse, avec une intensité égale, non seulement dans le sens de cette pression, mais dans tous les sens.*

Soit, en effet, un vase quelconque (*fig. 73*) rempli d'eau et garni de plusieurs tubulures A, B, C, D, et dans chacune de ces tubulures des pistons fermant hermétiquement, mais à frottement très doux. Si l'on appuie sur un quelconque des pistons, immédiatement les autres sont chassés en dehors. Une première conséquence découle donc immédiatement de cette expérience, c'est que les pressions se transmettent dans tous les sens. Cette sorte d'irradiation des pressions dans les fluides constitue un caractère tout à fait distinct et d'une application continuelle.

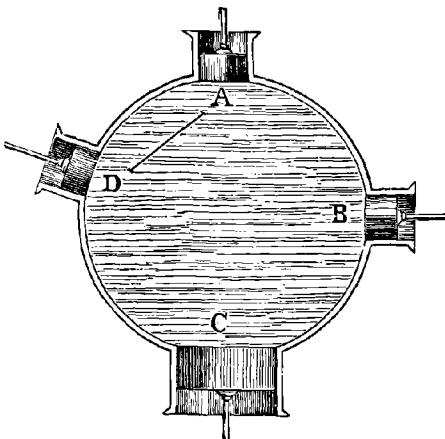


Fig. 73. — ÉGALITÉ DE PRESSION.

Une seconde conséquence apparaît également. Si les surfaces des pistons sur lesquelles s'exerce la pression sont égales, celle-ci se transmet avec la même intensité, abstraction faite, bien entendu, du poids du liquide et du frottement des pistons. Si l'on appuie extérieurement avec une force de 20 kilogrammes sur le piston A, par exemple, les pistons B et D, égaux en surface au piston A, supporteront chacun intérieurement une pression de 20 kilogrammes, c'est-à-dire qu'il faudrait leur oppo-

ser à chacun d'eux une force de 20 kilogrammes pour les empêcher d'être chassés dehors. Si, au contraire, on appuie avec une force de 20 kilogrammes sur le piston C dont la surface est double de celle des pistons A, B, D, la pression supportée par ces trois pistons A, B, D sera de moitié moins forte, c'est-à-dire de 10 kilogrammes, et, réciproquement, si l'on exerce une pression de 10 kilogrammes sur l'un des pistons A, B, D, la surface C supportera une pression double, soit 20 kilogrammes.

Ce principe, découvert par Pascal, était ainsi énoncé par lui-même dans son *Traité de l'équilibre des liqueurs* (Paris, 1698, in-12) :

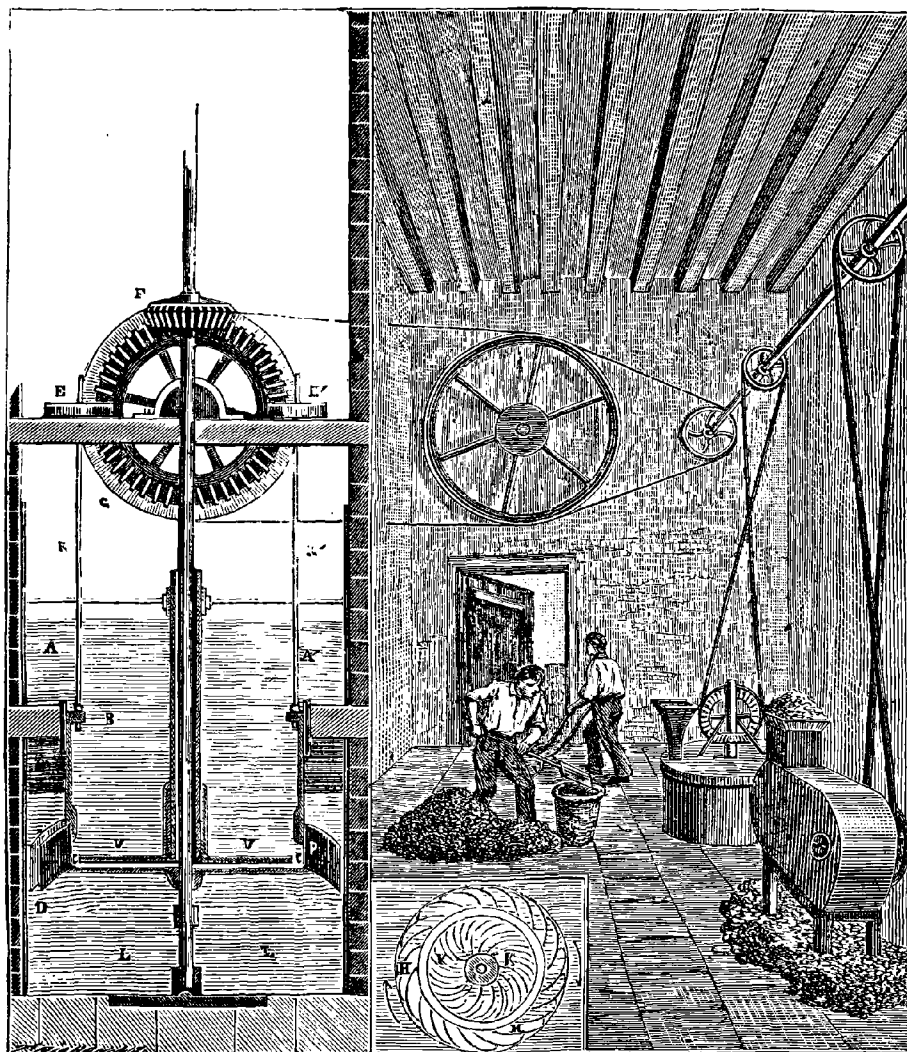
« Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, l'une centuple de l'autre, en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large et en surmontera 99.

» Et, quelque proportion qu'aient ces ouvertures, si les forces qu'on mettra sur les pistons sont comme les ouvertures, elles seront en équilibre.

» D'où il paraît qu'un vaisseau plein d'eau est un nouveau principe



de mécanique et une machine nouvelle pour multiplier les forces à tel degré qu'on voudra, puisqu'un homme, par ce moyen, pourra enlever tel fardeau qu'on lui proposera.



Moulin à farine mû par des turbines (page 179).

» Et on doit admirer qu'il se rencontre en cette machine nouvelle cet ordre constant qui se trouve en toutes les anciennes, savoir : le levier, la tour, la vis, etc., qui est que le chemin est augmenté en même proportion de la force ; car il est visible que, comme une des ouvertures est centuple

de l'autre, si l'homme qui pousse le petit piston l'enfonçait d'un pouce, il ne repousserait l'autre que de la centième partie seulement. »

Les conséquences de ce principe que Pascal indiquait pourraient se démontrer expérimentalement.

Soit (*fig. 74*) deux cylindres dont l'un, B, est d'un diamètre six fois moindre que l'autre, A. Ces deux cylindres communiquent ensemble par un tube et sont remplis d'eau. En vertu d'un principe que nous verrons plus loin, l'eau est à la même hauteur dans les deux cylindres. Ils sont l'un

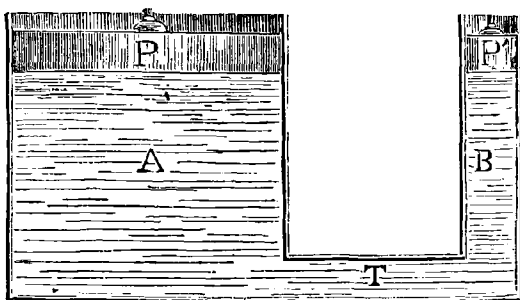


Fig. 74.

et l'autre fermés par des pistons P, P', à frottement très doux. Or, si sur le piston P' on met un poids de 1 kilogramme, l'équilibre sera rompu et il faudra mettre sur le piston P, six fois plus large, un poids de 6 kilogrammes pour rétablir cet équilibre. C'est dire que, si

l'on applique en P' une pression de 1 kilogramme, elle produira une pression de dedans en dehors de 6 kilogrammes en P.

Ajoutons que cette expérience est, en fait, à peu près impossible : le frottement des pistons et l'action de la pesanteur, qui produit des pressions variables aux diverses ouvertures, suivant leur profondeur dans la masse liquide, sont des obstacles sérieux à une rigoureuse vérification expérimentale. Nous verrons toutefois ci-après une application importante du principe dans la *presse hydraulique*.

**PRESSIONS EXERCÉES PAR LES LIQUIDES SUR LES PAROIS DES VASES QUI LES CONTIENNENT.** — Les pressions exercées par les liquides, en vertu de leur poids seul, sur les vases qui les contiennent ont été également étudiées par Pascal. Il y a trois cas à considérer : 1° la pression s'exerce verticalement de haut en bas; 2° elle s'exerce verticalement de bas en haut; 3° elle s'exerce latéralement sur les parois du vase qui contient le liquide.

1° **PRESSIONS VERTICALES DE HAUT EN BAS.** *La pression exercée sur le fond du vase est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour hauteur la perpendiculaire menée du fond à la surface, quelle que soit la forme du vase.*

Ce principe se démontre expérimentalement par l'appareil de Pascal, quelque peu modifié pour rendre l'expérience plus simple.

Cet appareil se compose (*fig. 75*) d'une balance, dont un plateau

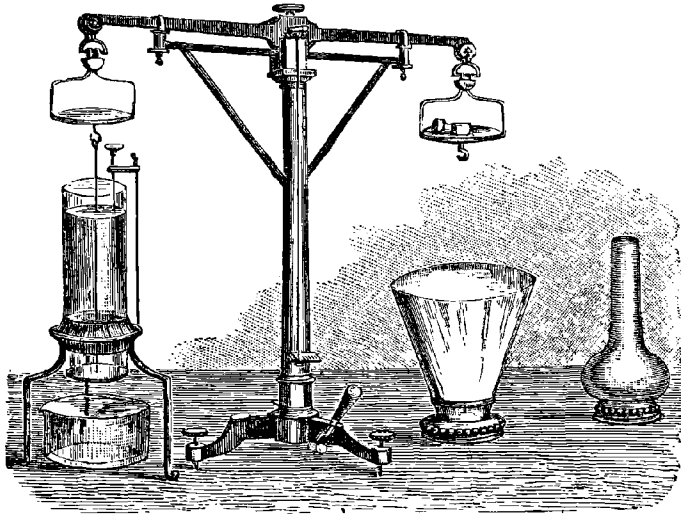


Fig. 75. — APPAREIL DE PASCAL.

soutient un fil, au bout duquel est attaché un disque de verre qui sert de fond à un vase placé sur un trépied. Des poids, placés dans l'autre plateau, maintiennent ce disque avec force. On verse de l'eau dans le vase

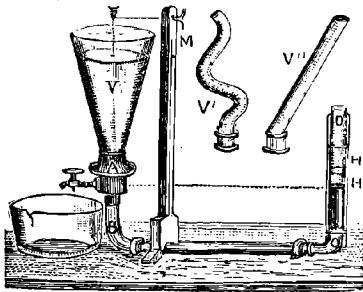


Fig. 76. — APPAREIL DE HALDAT.

jusqu'à ce que la pression exercée sur le disque le force à se détacher. Un indicateur marque le niveau de l'eau à ce moment-là. Or, quelle que soit la forme du vase, qu'il soit cylindrique, à col évasé ou contourné, le disque qui lui sert de fond se détache toujours quand l'eau a atteint le niveau marqué d'abord.

L'appareil de Haldat (1) sert à démontrer le même principe. Il se compose (*fig. 76*) d'un tube coudé ABCD, sur la branche AB duquel peuvent se fixer successivement en A les vases de forme et de capacité différentes V, V', V''. Le tube est rempli de mer-

(1) HALDAT DU LYS (1769-1852). C'était un descendant du frère de Jeanne Dare, Jean du Lys, et la famille de Haldat avait obtenu d'ajouter le nom de du Lys à son nom patronymique. Les travaux de ce physicien, la plupart relatifs au magnétisme, lui ont fait une grande réputation.

cure, de façon que la hauteur du liquide soit égale en A et en H. Or, quel que soit le vase que l'on visse en A, si l'on y verse de l'eau jusqu'à une même hauteur M, la pression exercée par cette eau fera monter le mercure dans le tube CD d'une certaine quantité HH' qui sera toujours la même.

On conclut de ces expériences non seulement que la pression est indépendante de la forme du vase, mais encore qu'elle est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour hauteur la perpendiculaire menée du fond à la surface, puisque tous les vases dont on s'est servi ont un même fond.

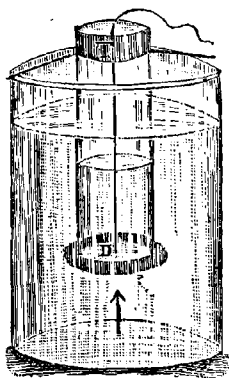


Fig. 77.  
POUSSÉE DES LIQUIDES.

Il résulte de là que, plus on pénètre dans les profondeurs de l'Océan, plus grande est la pression qu'on a à supporter. Il a été calculé que cette pression augmente d'une atmosphère par dix mètres de profondeur; à 1,000 mètres, le poids de l'eau exerce sur chaque décimètre carré de surface une pression de plus de 10,000 kilogrammes. Or, la profondeur moyenne de l'Océan est de 3,000 mètres, d'après de Humboldt; d'après Young, celle de l'Océan Atlantique serait de 1,000 mètres et celle de l'Océan Pacifique de 4,000 mètres. Il n'y a donc pas lieu d'espérer que jamais l'homme s'aventure dans les grandes

vallées océaniques comme il affronte le froid et la raréfaction de l'air sur les hautes montagnes. Il plonge aussi loin que la vue peut atteindre, dans le plus grand nombre de cas, c'est-à-dire à une profondeur très faible. Des appareils modernes facilitent ses expéditions, mais ils n'en ont pas étendu beaucoup le rayon. A mesure qu'il s'enfonce, la pression devient bientôt telle, que la vie devient impossible. Si les poissons résistent, cela tient à ce qu'il n'y a dans leur corps aucun espace vide; tout ce qui n'est pas solide est rempli de liquides peu compressibles, qui résistent par suite à la pression. Une bouteille vide, bien bouchée, descendue dans la mer, est bientôt broyée, ou bien le bouchon entre dedans et elle se remplit d'eau. Quand on veut connaître la température du fond d'une mer, on doit se servir de thermomètres préparés exprès et que nous décrirons plus loin; les thermomètres ordinaires se briseraient bientôt.

2° PRESSIONS VERTICALES DE BAS EN HAUT. *La pression verticale de bas en haut est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base la surface pressée et pour hauteur sa distance au niveau du liquide.*

Soit (fig. 77) un vase quelconque plein d'eau, dans lequel on introduit

un tube T vide et dont le fond est formé par un disque de verre dépoli D, maintenu contre le tube par un fil que tient l'opérateur. Celui-ci lâchant le fil, le disque obturateur ne tombe pas, preuve que la pression du liquide le maintient seul. Mais si l'on verse doucement de l'eau dans le tube T, le disque se détache quand le niveau du liquide est devenu, dans le tube, au même niveau que celui du vase; ce qui démontre bien que la pression, exercée d'abord sur lui de bas en haut, est égale au poids d'une colonne d'eau ayant sa surface pour base, et pour hauteur la distance du disque à la surface libre du liquide.

Cette pression porte le nom de *poussée des liquides*. Sa valeur, comme nous venons de le démontrer, est proportionnelle à la profondeur.

3° PRESSIONS LATÉRALES. *La pression exercée par un liquide sur une portion quelconque de la paroi du vase qui le contient est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base cette portion quelconque de la paroi du vase et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité à la surface libre du liquide.*

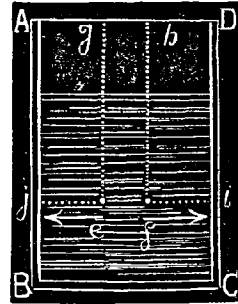


Fig. 78.  
PRESSIONS LATÉRALES.

Soit un vase ABCD (fig. 78) dans lequel on a versé de l'eau jusqu'à une certaine hauteur. Supposons qu'entre les points *a* et *f* il y ait une membrane tendue; cette membrane supporterait une pression comme si elle formait le fond d'un vase *gef*. Or, à la place de cette membrane, il y a une couche d'eau qui, d'après le principe de Pascal exposé d'abord : *Les liquides transmettent toute pression exercée sur un point quelconque de leur masse avec une intensité égale non seulement dans le sens de cette pression, mais dans tous les sens*, transmet en *ej*, *fi* la pression qu'elle reçoit. Cette pression, pour la membrane, est égale au poids de la colonne liquide ayant pour base cette membrane et pour hauteur la perpendiculaire menée entre elle et la surface du liquide, puisque c'est une pression de haut en bas. Elle a donc la même valeur dans le sens de *ej* ou de *fi*.

Le point où s'applique cette pression se nomme *centre de pression*. Il est toujours un peu au-dessous du centre de gravité de la paroi, parce que les pressions élémentaires qui forment la pression totale augmentent depuis la surface liquide jusqu'au fond du vase.

Ce principe des pressions latérales se démontre par de nombreuses expériences, qui prouvent en même temps la grande puissance que peuvent acquérir ces pressions quand la hauteur du niveau de la surface libre est très grande. Nous citerons d'abord la fameuse expérience faite à

Rouen, en 1647, par Pascal, et qui est connue par le nom de *crève-tonneau* (fig. 79).

On a fixé, bien solidement mastiqué, sur le fond supérieur d'un tonneau dressé, un grand tube métallique vertical, terminé par un entonnoir: Au bout de quelques instants, le tonneau est plein, le tube aussi. La pression exercée sur les parois du tonneau, étant proportionnelle à la hauteur



Fig. 79. — EXPÉRIENCE DU CRÈVE-TONNEAU.

de la surface libre, est ici considérable; c'est pourquoi bientôt les douves ne pouvant supporter cette pression, ploient, s'écartent, et le tonneau finit par éclater.

C'est en vertu des pressions latérales que, la moindre fissure survenant à un réservoir plein d'eau, celle-ci jaillit avec force au dehors et peut occasionner de graves accidents. Les tuyaux de conduite des eaux sont profondément enfoncés dans le sol pour que la pression des terres contrebalance la pression latérale de l'eau et s'oppose à la rupture des tuyaux; et cependant, quand une fissure se produit, la pression est assez forte pour soulever le sol. C'est cette pression qui

produit sur les portes d'écluses et sur les vannes ces efforts prodigieux qui souvent atteignent plusieurs milliers de kilogrammes. C'est elle qui tend à renverser les digues, et, comme elle ne dépend que de la hauteur du niveau de l'eau, il faut une digue aussi forte pour contenir une rivière étroite qu'un fleuve immense de même profondeur.

Les désastreuses inondations qui, en France, comme d'ailleurs dans toutes les contrées du globe, viennent de temps en temps effrayer les populations ont appelé l'attention de tous les hommes de science sur les moyens à opposer pour prévenir ces effroyables calamités. Les digues sont, sans contredit, un des moyens les plus communément employés, et cependant leur inefficacité, trop souvent constatée, force à se demander avec

quelque raison si l'homme ne serait pas impuissant dans sa lutte contre les eaux.

M. de Parville, dans ses *Causeries scientifiques* si intéressantes, a donné sur ce sujet quelques détails que nous reproduisons, afin que le lecteur se fasse une idée bien nette de l'épouvantable puissance des pressions latérales :

« Pour remédier aux débordements, écrit le savant auteur, qu'a-t-on fait ? On a imité à peu près servilement le système de défenses usité par les anciens ingénieurs. On a adopté, en France, les digues longitudinales, que recommandent encore aujourd'hui quelques esprits persévérants. Les inondations sont déjà dangereuses par la hauteur d'eau qu'elles accumulent entre les rives d'un fleuve et surtout par la vitesse des courants. On s'est complu à accroître cette hauteur et cette vitesse en resserrant la masse d'eau entre des rives artificielles. C'est accumuler par places, comme à plaisir, la force de destruction. Il n'est pas un endiguement longitudinal qui ne finisse par céder, à la longue, à la puissance des eaux. En Lombardie, où ce système de défenses a été combiné avec un véritable luxe, en Amérique, en Chine, on a éprouvé toutes les désillusions possibles.

» Veut-on des exemples ? Citons rapidement, pour le Rhône, la rupture de la levée de la Camargue, de la chaussée de la Parode, de Boulbon, de Mezoargue, de Montagnette, etc.; pour la Loire, les ruptures des levées de Jargeau, d'Onzain, de la Varenne, d'Amboise, de Montlouis, etc.; pour l'Isère, trouée des digues de Thouret, de Crolles, de Froges, de Voreppe, etc. En Italie, les digues du Pô se rompent tous les dix ans, en moyenne. En Russie, les digues n'ont pas sauvé les riverains, au contraire; la grande inondation de 1856, qui a ravagé Astrakan, a été funeste au système d'endiguement. Les digues gigantesques que des milliers d'ouvriers avaient mis plusieurs jours à construire, ne purent résister à l'effort du cours du Volga. Elles furent rompues subitement, et l'eau se précipita avec une violence inouïe sur la ville...

» Dès le xv<sup>e</sup> siècle, le danger qu'offrait ce système de défenses était démontré par les désastres qui fondirent à cette époque sur les provinces néerlandaises. A la fin du xiv<sup>e</sup> siècle, on avait endigué le Delftland, le Wifheeren, etc.; on avait construit plus de 700 kilomètres de levées en terres insubmersibles. Dans la nuit du 18 novembre 1421, le Waal rompt ses digues entre Gorcum et Dordrecht sur 1 kilomètre de longueur, se jette sur la Meuse et l'entraîne dans le Hollands Diep. Cette inondation engloutit 72 villages, noya 100,000 hommes et détruisit de fond en comble la plus grande partie du Zuid-Hollandsche-Waad.

» En Amérique, les digues en terre qui bordent le Mississipi sont encore plus étendues et plus complètes que les magnifiques travaux de défense du Pô et des fleuves hollandais. Les levées forment un mur dont le développement total atteint 4,000 kilomètres. Le rempart qui défend Yazoo-Gate contre les crues n'a pas moins de 13 mètres de haut, 13 mètres de largeur au sommet et 96 mètres à la base. Ici, comme ailleurs, les crevasses se sont produites, et le fleuve, en 1850, 1854, 1862, a fait sa trouée par des ouvertures de plusieurs kilomètres, dévastant les plantations et ruinant le pays. En Chine, le Hoang-ho, après avoir percé ses levées, a envahi un territoire énorme. Ritter rapporte qu'une autre fois 200,000 per-

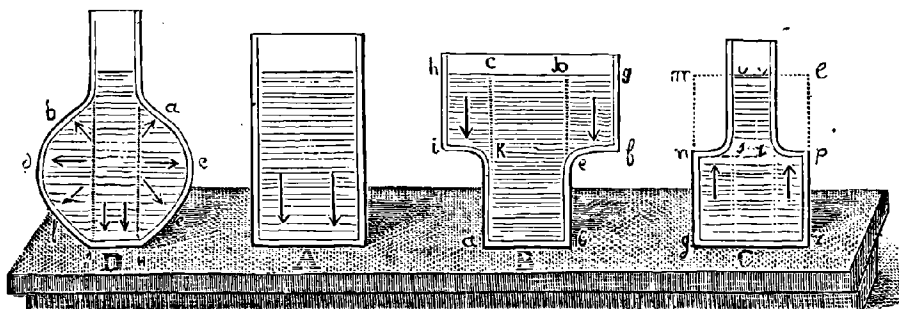


Fig. 89. — PARADOXE HYDROSTATIQUE.

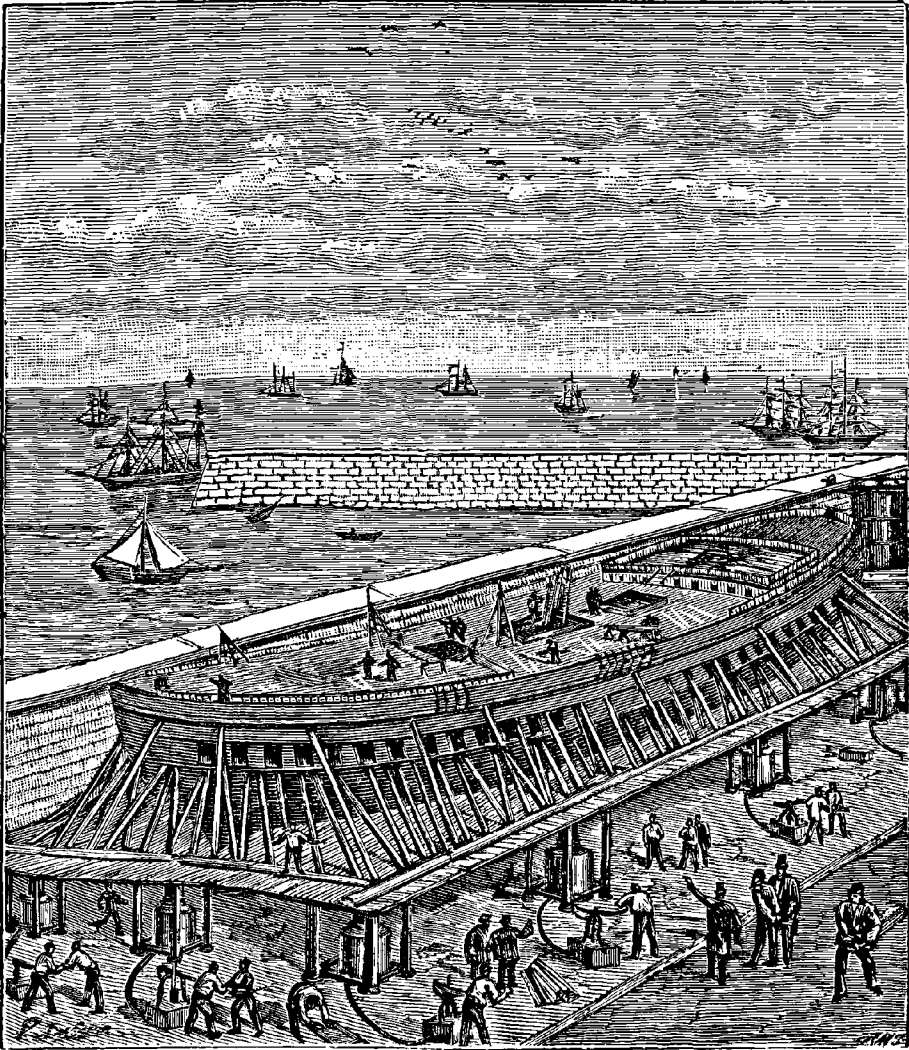
sonnes furent noyées pendant une guerre civile, par suite du percement des digues.

» Pour nous, accepter l'endigement longitudinal, c'est absolument agir comme l'ingénieur qui compterait sur l'épaisseur d'une tôle à chaudière à vapeur pour se mettre à l'abri d'une pression susceptible d'augmenter sans cesse. On ne sait jamais à quelle hauteur peut atteindre une crue ; on ne peut donc compter sur la protection d'une digue, qui, au plus petit vice de construction, cède et répand la ruine et la mort dans toute la zone qu'elle aurait dû mettre à l'abri. Ne parlons plus de ce système de défenses. Il n'est applicable que dans un seul cas, pour la traversée d'une ville. On a fait de la compression pour contenir les eaux entre des digues ; ce système est aussi mauvais au physique qu'au moral. »

**PARADOXE HYDROSTATIQUE.** — Il semblerait contradictoire qu'un vase, dont le fond horizontal est également pressé, ne transmet pas une pression égale au support sur lequel ce fond repose directement, ou, en d'autres termes, que la pression exercée sur le fond d'un vase ne fût pas égale au poids réel de ce vase et du liquide contenu ; que, par exemple, cette pression est beaucoup plus grande que le poids lorsque la hauteur



de la colonne d'eau est très grande, quelque petite que soit la surface de la base; qu'elle soit inférieure lorsque la surface de la base est très grande et la hauteur très petite. Ce fait semblant au premier abord paradoxal, on



Radoub d'un bateau dans un dock flottant (page 185).

lui a donné le nom de *paradoxe hydrostatique*. Il n'est rien cependant moins que paradoxal.

Supposons, en effet, quatre vases de formes différentes, A, B, C, D (fig. 80). Dans le vase cylindrique A, il est évident qu'il n'y a pas d'autre

pression transmise que celle que supporte le fond et qui est égale au poids du liquide. Dans le vase B, le support reçoit la pression exercée sur  $ab$  égale au poids de la colonne liquide  $abcd$  plus les pressions exercées sur  $ik$  et sur  $ef$ , égales au poids des colonnes liquides  $ikhc$  et  $efgd$ , ce qui fait au total le poids du liquide contenu dans le vase B. Dans le vase C, la pression supportée par le fond  $qr$ , pression égale au poids de la colonne liquide  $qrlm$ ,

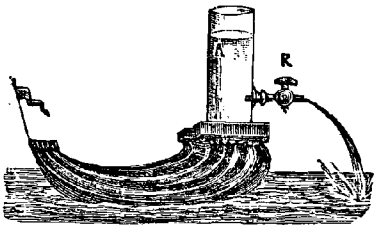


Fig. 81. — VASE A RÉACTION.

doit être diminuée du poids des colonnes  $nsum$  et  $tpol$ , qui supportent des pressions contraires; il n'y a donc de transmis au fond qu'une pression égale au poids réel du liquide. Dans le vase D, la pression exercée sur le fond  $gh$  est évidemment encore seulement égale au poids du liquide; car, en appliquant les règles que nous avons données (page 64) sur la *composition*

*des forces*, on voit que les composantes horizontales de ces pressions se font mutuellement équilibre, que les composantes verticales se réduisent à une force unique, égale au poids du liquide.

Il ne faut donc pas confondre la pression exercée sur le fond d'un vase avec le poids réel de ce vase et du liquide contenu.

**VASES A RÉACTION.** — Nous venons de dire que les composantes horizontales des pressions se font mutuellement équilibre; les preuves expérimentales abondent. Voici un appareil dont on se sert parfois dans les cabinets de physique (*fig. 81*). Sur un petit bateau flottant sur la surface d'un vase plein d'eau, on place une éprouvette A, munie d'un robinet et également pleine d'eau. Le bateau reste immobile; mais que l'on ouvre le robinet, le liquide jaillit, et le flotteur se meut très rapidement en sens contraire de l'écoulement. En effet, le robinet fermé, les pressions horizontales se faisaient mutuellement équilibre; le robinet ouvert, la pression exercée au point diamétralement opposé à l'ouverture n'étant plus équilibrée fait mouvoir le flotteur.

Un autre instrument, nommé le *tournequet hydraulique*, met encore ce fait en évidence. Il se compose essentiellement (*fig. 82*) d'un ballon de verre A, disposé de façon à pouvoir facilement tourner sur lui-même comme

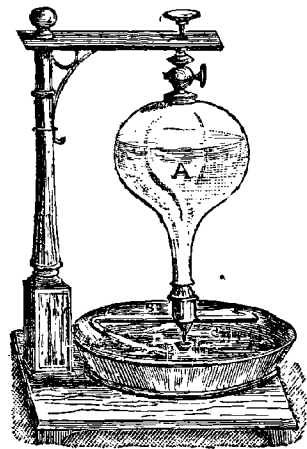


Fig. 82.  
TOURNEQUET HYDRAULIQUE.

une toupie. A son extrémité inférieure sont fixés deux tubes de cuivre recourbés en sens contraires, B et C. L'appareil étant rempli d'eau, si l'on ouvre le robinet, il prend immédiatement un mouvement de rotation dans le sens opposé à celui du liquide jaillissant, mouvement d'autant plus rapide que la hauteur du niveau est plus grande dans le vase et que les tubes sont plus gros.

**APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS. — TURBINES.** — Tout le monde sait que la force développée par une masse d'eau qui tombe ou glisse sur une pente comme dans le lit d'une rivière est employée à la production de mouvements plus ou moins réguliers dans certaines machines qui, pour cette raison, ont reçu le nom de machines *hydrauliques*.

Parmi les machines hydrauliques, nous ne citerons pas les plus usitées, mais les plus capables d'utiliser la force développée par un courant d'eau. On place en première ligne les *turbines*; elles ont sur les autres machines hydrauliques, outre leur propriété d'utiliser la plus grande partie de la force de l'eau, l'avantage de diminuer beaucoup les engrenages et de pouvoir continuer leur travail pendant les grandes eaux et pendant les gelées. On les applique surtout comme moteurs mécaniques pour les moulins à eau.

Quoique déjà connues dès le milieu du siècle dernier, c'est seulement de nos jours qu'elles ont reçu tout leur perfectionnement et une application vraiment pratique. Nous décrirons, d'après M. Gaillard, celle de M. Fourneyron (1), une des premières construites, une des plus simples et une des meilleures de celles qui fonctionnent aujourd'hui (*fig. 83*).

Les turbines sont des roues à axe vertical tournant librement sous l'eau. L'eau arrive dans le bief supérieur A, descend dans le réservoir cylindrique B et s'en échappe à la partie inférieure par une ouverture cylindrique C, qu'on ouvre et qu'on ferme à volonté en élevant ou en baissant une vanne *ee*, également cylindrique. Si c'était là la seule disposition de la partie inférieure de la turbine, l'eau sortirait sous forme de nappe et rien ne serait produit.

Pour que les choses se passent autrement, on a le soin de disposer tout autour de la vanne une roue à aubes circulaires se recouvrant les unes les autres et offrant entre elles un espace D pour favoriser la sortie

(1) FOURNEYRON (Benott), ingénieur des mines (1802-1873), d'abord attaché à l'usine du Creuzot, s'est livré à de remarquables études pour l'établissement des forges d'Alais, du chemin de fer de Saint-Etienne à la Loire, l'application de la vapeur à l'extinction des incendies; est surtout connu par ses inventions industrielles. Député en 1848, il appartenait à la droite royaliste.

de l'eau. Ce qui détermine cette sortie, c'est la différence de niveau des biefs supérieur A et inférieur L. Ces aubes font corps avec l'arbre central S, au moyen d'une calotte de fonte qui les relie à cet arbre.

Ces aubes sont dessinées, dans la figure, en coupe et en plan. On voit également que, dans l'intervalle K formé par ces aubes, on a disposé des cloisons courbes. Leur courbure est en sens contraire de celle des aubes H et H, ce qui fait que l'eau sort du réservoir B en se mouvant partout obliquement sur les aubes, qui tendent à s'opposer à la sortie du liquide; cette résistance des aubes les fait tourner dans le sens de la flèche. Cette disposition de la courbure des cloisons intérieures K empêche la perte de travail, qui serait nécessairement produite si l'eau était dirigée perpendiculairement sur les aubes après son échappement en C; car il y aurait choc, et tout choc est une perte de travail. C'est pourquoi on augmente ou on diminue à volonté l'eau qui sort, en élevant ou baissant les vannes  $\alpha$  au moyen des tringles RR et des écrous EE, qu'on tourne à cet effet.

Plus la hauteur de l'eau sera grande dans le bief supérieur, plus la roue K tournera avec vitesse; c'est donc là un immense avantage de la turbine; car on peut, à l'aide de vannes, modérer ou accélérer la vitesse de la roue K. Ce résultat a une importance notable dans le cas où une turbine doit marcher toujours avec la même vitesse ou doit constamment produire le même travail.

Un autre avantage de la turbine, c'est que, à l'époque des hautes et basses eaux, la turbine marche sans qu'on ait à s'inquiéter de la hauteur du niveau de l'eau du bief inférieur, toute plongée qu'elle est dans ce bief; en outre, la hauteur de la chute d'eau établie au barrage est entièrement utilisée, car il faut dire que l'établissement d'un barrage, pour faire fonctionner une turbine, est une chose toujours nécessaire; enfin, les fortes gelées n'ont pas d'action sur la marche de la turbine, la glace ne se produisant qu'à la surface de l'eau.

Ce qui fait encore que les turbines utilisent presque en totalité la force fournie par la chute d'eau, c'est que l'arbre central est vertical et tourne sur un pivot. Les pressions horizontales exercées sur les aubes ne tendent nullement à entraîner l'axe de cet arbre central S ni d'un côté ni de l'autre, circonstances qui ne pourraient être réalisées dans une roue à axe horizontal, car les tourillons de cet axe frottent fortement dans les coussinets qui supportent le poids total de la roue.

Ainsi les turbines, grâce à ces dispositions, utilisent les 75 ou 80 centièmes du travail moteur de la chute d'eau fournie par le barrage.

Nous avons dit que l'eau, en sortant des cloisons courbes K, arrivait obliquement sur les aubes de la roue annulaire H; ce qui tend surtout à

la faire arriver encore plus obliquement, c'est que ces aubes fuient devant l'eau qui sort et se dirige alors suivant une tangente intérieure à chaque aube de la roue annulaire; elle exerce donc une pression de l'intérieur à l'extérieur, en vertu de son changement continu de direction jusqu'à sa sortie.

L'arbre central, tournant constamment sur lui-même, communique son mouvement, au moyen d'une roue F, à une autre G, qui s'engrène avec elle. Cette roue porte sur sa jante une courroie sans fin, qui fait marcher une petite roue faisant corps avec une autre grande roue, laquelle transmet le mouvement reçu à un arbre de couche; cet arbre de couche fait fonctionner des meules pour moudre le grain, des ventilateurs pour le vanner et d'autres machines.

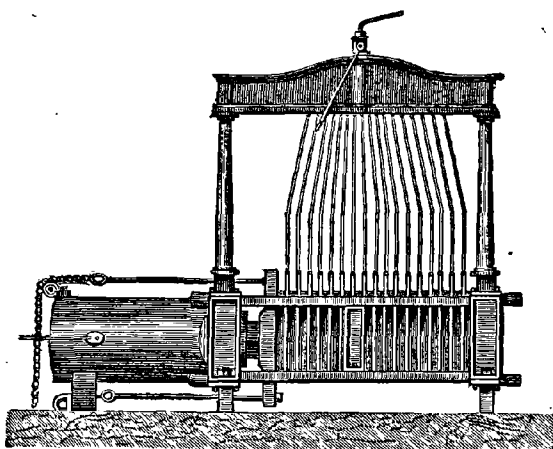


Fig. 83. — PRESSE HYDRAULIQUE.

Des modifications ou des perfectionnements ont été successivement apportés à la construction des turbines par MM. Burdin, Callon, Fontaine, Baron, A. Kœchlin, Passot, Mellet, Girard, Porro et autres constructeurs.

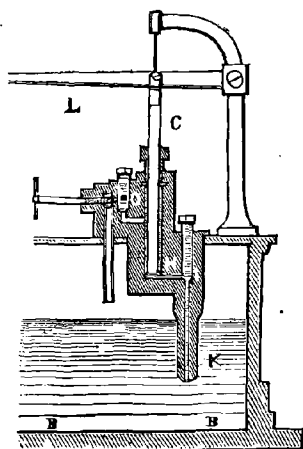


Fig. 84.  
CORPS DE LA POMPE.

**PRESSE HYDRAULIQUE.** — Cette presse, aujourd'hui indispensable dans un grand nombre de fabriques et d'industries, est fondée sur le principe d'égalité de pression des liquides, découvert, nous l'avons dit (page 168), par Pascal.

Elle se compose essentiellement d'une pompe et de la presse proprement dite, cylindres de diamètres très différents, réunis par un tuyau, le tout en fonte, à parois très épaisses (fig. 83).

Dans la pompe (fig. 84), le petit piston ou cylindre C est muni supérieurement d'un levier L qu'un homme fait mouvoir; lorsqu'on le baisse et qu'on soulève par conséquent le piston C, le vide s'opère dans le corps de pompe;

la soupape H s'ouvre et l'eau est aspirée par le tuyau K dans une bêche BB pleine d'eau. En baissant maintenant le levier, l'eau pressée referme la soupape H, soulève la soupape I et se rend par un petit tuyau, dont l'embouchure O se voit sur la figure, dans l'autre grand cylindre creux F (fig. 85), qui forme le corps de la presse proprement dite. Un second cylindre

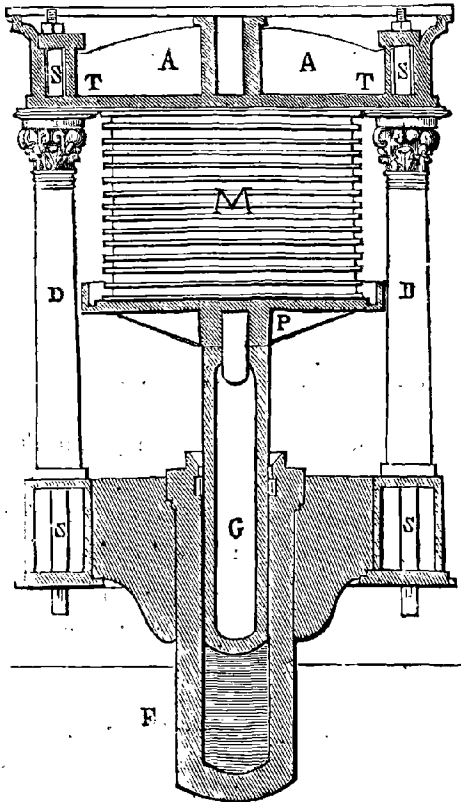


Fig. 85. — CORPS DE LA PRESSE.

dre G, que renferme le cylindre F et qui peut s'y mouvoir, sans cependant laisser aucune issue, reçoit l'action de l'eau, et, comme son diamètre est beaucoup plus grand que celui du piston C de la pompe, l'effort appliqué à ce dernier produit, d'après le principe de Pascal, un effort considérable. Le cylindre G soutient un plateau P sur lequel est placé l'objet M, que l'on veut soumettre à la pression. En montant avec une grande force, il le presse contre un second plateau TT, tout en fonte et soutenu de chaque côté par deux colonnes de même métal DD, creuses à l'intérieur pour présenter plus de solidité (page 52). Afin d'empêcher que le plateau TT ne se déforme, il est consolidé par deux côtés AA, et il est retenu par quatre tiges en fer SS, traversant les colonnes creuses DD et se fixant à la partie inférieure de la presse.

Les pressions obtenues avec la presse hydraulique sont énormes. Par exemple, si la base du grand piston égale 150 fois celle du petit piston et que la pression exercée sur celui-ci à l'aide du levier soit seulement de 100 kilogrammes, la pression qui soulèvera le grand piston sera de 150 fois 100, ou 15,000 kilogrammes.

Dépuis Pascal, la presse hydraulique était restée sans application; la pression exercée dans le grand cylindre faisait filtrer l'eau entre le piston et le corps de pompe. Ce fut Bramah (1) qui, en 1796, y apporta le

(1) BRAMAH (Joseph), mécanicien, né à Strasbourg en 1749, mort à Londres en 1814. Il inventa

perfectionnement sans lequel cette machine ne serait pas sortie peut-être du domaine de la théorie.

Souvent, dans les découvertes les plus importantes, le succès dépend de quelque détail en apparence insignifiant.

Depuis longtemps déjà, Bramah, convaincu de l'immense utilité de la presse hydraulique, se désespérait de ne pouvoir la rendre applicable. Il avait eu l'idée de placer dans une creusure du corps de pompe une rondelle de cuir maintenue au moyen d'un collier compresseur fixé par de fortes vis; mais, en supposant que cette rondelle pût mettre obstacle au passage de l'eau, elle avait l'inconvénient d'empêcher le piston de redescendre quand la pression de l'eau avait cessé. Son chef d'atelier, qui devint aussi plus tard un grand inventeur et un mécanicien fameux, Henry Maudslay (1), lui vint en aide et lui proposa de fixer un collier de cuir épais *embouti*, c'est-à-dire concave d'un côté et convexe de l'autre, à la creusure pratiquée dans l'intérieur du corps de pompe; au moment où la pression se produit, l'eau pénètre dans la concavité du cuir, le gonfle et détermine une adhérence d'autant plus parfaite qu'elle est chassée avec plus de violence; quand la pression cesse, le collier se relâche et laisse doucement redescendre le piston.

Aujourd'hui, les applications de la presse hydraulique sont innombrables. Nous en citons quelques-unes, sinon des plus importantes, du moins des plus vulgaires.

1° Pour la fabrication des huiles. Les graines ayant déjà subi l'opération du *broyage* au moyen d'un appareil formé de deux cylindres tournant en sens inverse, comme ceux d'un laminoir, puis d'un moulin ou tordoïr, subissent celle du *pressage*. Les graines, réduites en pâte, sont distribuées dans des sachets de laine, qu'on enveloppe avec des *étendelles*, c'est-à-dire avec des bandes d'étoffe de crin à côtes saillantes, puis soumises à la pression énergique d'une presse hydraulique, préféralement à piston horizontal qu'à piston vertical. L'huile coule alors, et ces opérations répétées deux ou trois fois permettent d'extraire de la graine tout ce qu'elle peut donner.

2° Pour la fabrication des pâtes alimentaires. Le blé réduit simplement en gruaux, ayant été d'abord pétri avec les mains, puis à l'aide d'une

des serrures de sûreté fort estimées, l'appareil dont on se sert dans les cafés pour faire venir les liquides de la cave au comptoir, la machine à numéroté les billets de la banque d'Angleterre; il perfectionna les pompes à feu, les machines à vapeur, la fabrication du papier, etc.

(1) MAUDSLAY (Henry), fameux mécanicien anglais (1771-1831), inventa, entre autres choses, le *chariot-support*, machine-outil précieuse, les machines à fabriquer les poulies de navires, des perfectionnements aux machines à vapeur, la machine à fabriquer les vis, les écrous, les rivets; construisit un des premiers paquebots anglais, etc.

machine, a formé une pâte très ferme. On *étire* alors cette pâte à l'aide d'une presse hydraulique quelque peu modifiée, c'est-à-dire dont le plateau est criblé de trous ayant la forme que l'on veut donner au brin et qui est verticale pour les vermicelles, les lazagnes, les nouilles et le macaroni, et horizontale pour les petites pâtes, dites pâtes d'Italie. La pâte, refoulée par le piston, passe au travers des trous du fond, où un ouvrier la reçoit, la coupe à une longueur de 75 centimètres à 1 mètre, pour la porter dans une étuve, afin de la sécher avant de la livrer au commerce.

3° Dans l'industrie du sucre de betterave. Lorsque les tubercules, apportés au fabricant par le cultivateur, ont été débarrassés de la terre et du sable qui y adhèrent, au moyen d'un *laveur mécanique*, ils sont râpés dans un appareil spécial qui en forme une bouillie appelée *pulpe*. On soumet alors cette pulpe à la pression d'une presse hydraulique puissante (dans certaines usines, elle donne une pression de 800,000 kilogrammes), afin d'en extraire immédiatement le jus sucré. Pour cela, on place cette pulpe dans des sacs de crin ou de laine; on empile un certain nombre de sacs les uns sur les autres en les séparant par des claies métalliques, et, ainsi empilés, on les porte sur la plate-forme de la presse hydraulique. Deux ou trois pressions successives suffisent pour en faire sortir de 70 à 80 pour 100 de jus, quelquefois davantage, selon la qualité des betteraves, et la pulpe épuisée qui reste dans les sacs n'est plus qu'un gâteau plat et très sec, que l'on donne aux bestiaux.

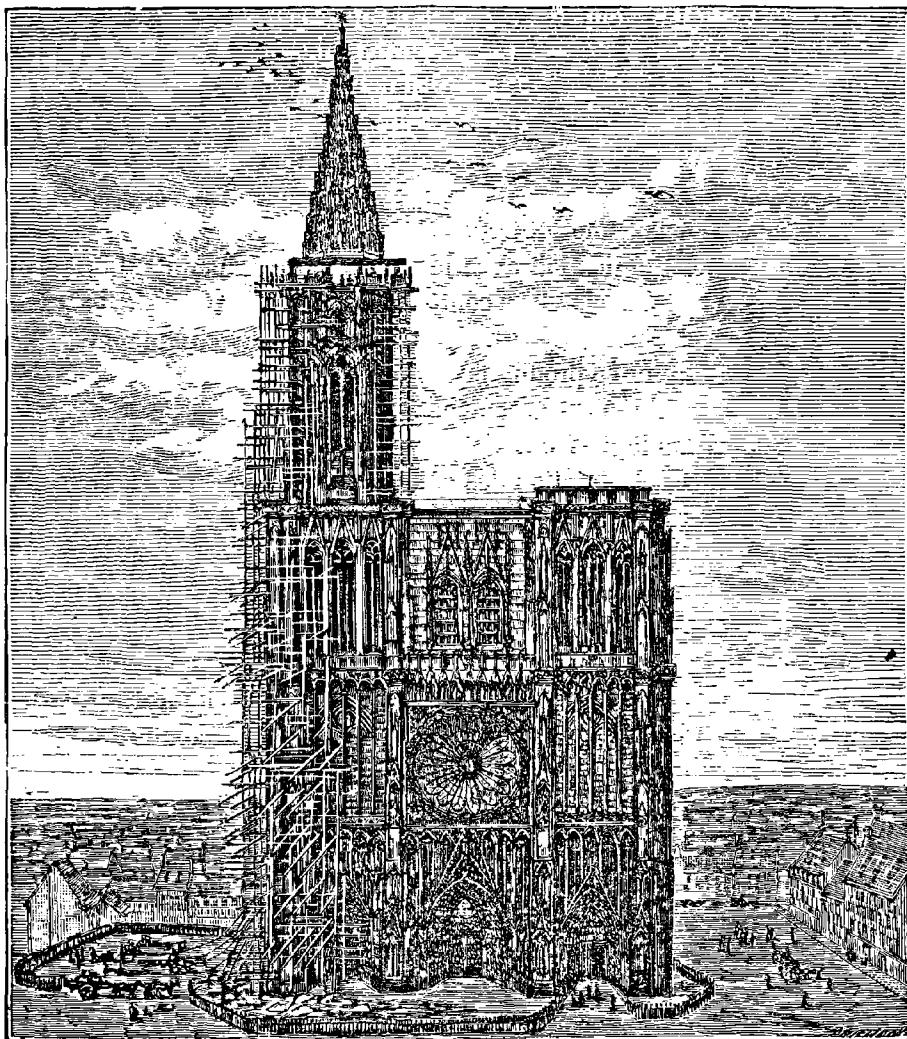
4° Dans la fabrication de certains aciers, par exemple l'acier Whitworth, dont on se sert en Angleterre pour fabriquer les canons. Au lieu de le marteler en lingots, selon la méthode de forgeage ordinaire, le constructeur de Manchester soumet son acier, quand il est encore liquide, à l'action d'une presse hydraulique.

La pression supportée ainsi par l'acier pendant la coulée est d'environ 3,000 kilogrammes par centimètre carré; le métal liquéfié se contracte sous cette pression énergique et diminue notablement de volume. Les gaz et l'air contenus dans le liquide sont chassés; aussi le métal gagne-t-il beaucoup en ténacité, en résistance, en ductilité; cela le rend de beaucoup supérieur à l'acier fondu ordinaire, et l'on conçoit sans peine qu'on puisse avec lui faire usage de charges de poudre plus fortes que dans les autres canons, et augmenter en conséquence la portée des projectiles.

5° On sait que le *calfatage* d'un bateau consiste à boucher les fentes des jointures du bordage ou des membres du vaisseau, en y chassant avec force, au moyen d'un maillet et d'un ciseau, de l'étoupe provenant de



vieux cordages et d'autres matières, et en recouvrant le tout d'une couche de brai bouillant. Quand ce *calfatage* doit avoir lieu à la coque extérieure du bâtiment, on lui donne le nom de *radoub*. Or, autrefois, pour *radouber*



La flèche de la cathédrale de Strasbourg fut soutenue en l'air par des presses hydrauliques (page 186).

un navire, on recourait à l'*abatage en carène*, c'est-à-dire qu'on le renversait sur un flanc, puis sur l'autre, de manière à *éventer*, mettre hors de l'eau successivement toutes ses parties. Aujourd'hui, on a substitué à l'*abatage* l'emploi des *ras de carène* et celui des *docks flottants*. Ce sont

des espèces de grands bateaux, de plates-formes qu'on submerge au-dessus du piston d'une presse hydraulique gigantesque. On conduit au-dessus de cette plate-forme le navire à radouber, on le cale, on fait jouer la presse qui soulève la plate-forme et son fardeau ; le navire est à sec, et les charpentiers et les calfats y font les réparations nécessaires.

6° Avant d'être acceptées par les compagnies de chemins de fer ou de paquebots transatlantiques ou par l'État, les machines à vapeur sont essayées, c'est-à-dire que l'on exerce sur elles une pression double ou triple de celle qu'elles doivent supporter ordinairement sous l'action de la vapeur. Pour cela, toutes les ouvertures de la machine sont fermées, sauf une seule, que l'on met, à la place du gros cylindre d'une presse hydraulique, en communication avec le cylindre de la pompe. Le levier étant baissé deux ou trois fois, l'eau contenue dans l'intérieur de la machine presse les parois intérieures avec une force énorme. Si ces parois résistent, si aucune fissure ne se produit entre les joints des rivures par laquelle l'eau s'écoule, la machine est acceptée.

Des épreuves analogues ont lieu avec la presse hydraulique pour vérifier la résistance à la traction des câbles de fer dont se sert la marine.

Nous citerons encore, comme utilisation de la presse hydraulique, la fabrication du cidre ; celle des bougies, dans laquelle ses pressions sont indispensables pour séparer l'oléine de la stéarine ; celle de la poudre de guerre, pour faire passer à travers les tamis, dits *guillaumes*, les gâteaux humides du mélange de charbon, de salpêtre et de soufre ; celle du papier, celle des draps, etc. Pour mettre en balles les cotons, les laines, les tissus de toute sorte, son emploi est nécessaire, ainsi que pour réduire au plus petit volume possible les fourrages destinés à être transportés.

Enfin nous rappellerons que, lors de la réparation de la cathédrale de Strasbourg, la flèche a été soutenue en l'air par quatre puissantes presses hydrauliques, tandis que l'on travaillait en dessous.

Selon les opérations auxquelles elle est destinée, chaque presse hydraulique est construite dans des conditions particulières de résistance, de solidité ou de forme ; mais les différences entre elles ont peu d'importance. Cependant nous devons signaler la presse dite *sterhydraulique* (du grec *stereos*, solide ; *udor*, eau) de MM. Desgoffe et Ollivier, qui, à côté de quelques inconvénients, présente de nombreux avantages.

## CHAPITRE VII

### ÉQUILIBRE DES LIQUIDES

**CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES.** — Nous avons vu (page 96) quelles étaient les conditions d'équilibre des corps solides; d'après leur constitution, les liquides en ont de toutes différentes. La grande mobilité de leurs molécules, et, par suite, la tendance de chacune d'elles à obéir aussitôt aux lois de la pesanteur, ne permet aux liquides de demeurer en équilibre qu'autant qu'ils ont satisfait aux trois conditions suivantes :

1° *Le liquide doit être contenu dans un vase dont les parois s'opposent à son écoulement en résistant aux pressions qu'il supporte.*

2° *Une molécule quelconque d'une masse liquide en équilibre, ou, en d'autres termes, les différents points d'une couche horizontale, dans un liquide, doivent éprouver dans tous les sens des pressions égales et contraires.*

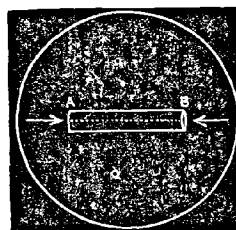


Fig. 86.

3° *La surface libre d'un liquide en équilibre doit être, en chaque point, perpendiculaire à la direction de la pesanteur, c'est-à-dire horizontale.*

La première de ces conditions est évidente, et tient, nous l'avons dit, à la constitution même des liquides.

La seconde est indispensable; car, si une molécule quelconque éprouvait une pression plus forte que celle qu'elle éprouve dans le sens opposé, elle obéirait à cette pression plus forte, et l'équilibre n'existerait plus. Soient, en effet (*fig. 86*), deux points A et B pris sur une même horizontale à l'intérieur d'un liquide, et supposons un cylindre dont AB serait l'axe et qui serait assez mince pour que l'on puisse supposer la pression uniforme sur chacune de ses bases, ou, ce qui revient au même, supposons que ce cylindre soit une portion, une couche du liquide lui-même. Puisqu'il est en équilibre dans la masse générale, il faut conclure que ses bases A et B supportent des pressions égales et contraires. En effet, il est en équilibre sous

l'influence de son poids et des pressions qu'il supporte. Or, son poids est une force verticale appliquée au centre de gravité. Quant aux pressions, elles sont appliquées sur la surface convexe; elles sont donc normales à l'axe, et donnent lieu à une résultante verticale, égale au poids du cylindre, puisque celui-ci ne prend aucun mouvement vertical; les autres sont horizontales et se détruisent, puisque le cylindre ne prend aucun mouvement horizontal. Les pressions sont donc égales et contraires horizontalement; elles le sont aussi verticalement puisque nous avons démontré que les pressions autour d'un même point sont égales dans toutes les directions (page 157).

On donne le nom de *surfaces de niveau* ou *couches de niveau* à toutes

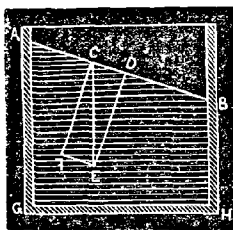


Fig. 87.

les couches d'un liquide qui supportent une égale pression. Dans une masse liquide, soumise à la seule action de la pesanteur, les *couches de niveau* sont donc, d'après ce qui précède, des surfaces horizontales, troisième condition exigée pour l'équilibre des liquides.

La nécessité de cette troisième condition, dont l'existence peut se constater d'après ce que nous avons dit de la direction de la pesanteur (page 92), se démontre également ainsi : soit une masse liquide (*fig. 87*) dont la surface aurait pris la direction inclinée AB. L'action verticale de la pesanteur CE sur une molécule C de cette surface pourrait se décomposer en deux forces, en vertu de la réciproque de la troisième loi relative aux forces, que nous avons démontrée (page 65). L'une de ces forces F, perpendiculaire à la surface du liquide, serait détruite par sa résistance; l'autre D, tangente à la surface, ferait glisser la molécule C dans la direction CB. Ce raisonnement pouvant s'appliquer à toutes les molécules de la surface AB, on doit en conclure que l'équilibre ne pourrait exister, cette surface n'étant pas horizontale.

De ce raisonnement, on peut encore tirer cette conséquence, que chaque point de la surface d'une masse liquide soumise à l'action de plusieurs forces doit être perpendiculaire à la résultante de ces forces. Si, par exemple, sur l'appareil dont nous nous sommes servi (page 79) pour démontrer les effets de la force centrifuge, on dispose un vase plein d'eau et que l'on lui imprime un vif mouvement de rotation, on verra la surface du liquide devenir concave. En effet, chacune des molécules est soumise simultanément à l'action de la pesanteur et à la force centrifuge, et c'est la résultante de ces deux forces qui doit être en chaque point perpendiculaire à la surface libre.

Il y a une restriction à faire au principe que nous avons énoncé. S'il est vrai pour les surfaces liquides d'une petite étendue, parce qu'alors les verticales, de tous leurs points, sont sensiblement parallèles, il ne peut s'appliquer aux grandes surfaces, aux mers, par exemple, parce que, la direction de la verticale changeant constamment d'un lieu à un autre sur la surface du globe, il en est de même de toute surface horizontale. Or, la courbure de la terre ne fait plus un doute pour personne.

De là, deux sortes de niveaux : le *niveau vrai*, qui est celui d'une grande surface dont tous les points sont également distants du centre de la terre, et le *niveau apparent*, qui consiste en ce que tous les points d'une surface soient dans le même plan horizontal. Ces deux niveaux se confondent seulement pour de petites surfaces.

**ÉQUILIBRE DES LIQUIDES SUPERPOSÉS.** — *Les liquides contenus dans un même vase se superposent dans l'ordre de leurs densités croissantes de haut en bas, et les surfaces de séparation sont planes et horizontales.*

Il va sans dire que les liquides ne doivent pas être susceptibles de se dissoudre mutuellement, ni d'agir chimiquement l'un sur l'autre. Cette condition observée, le principe se vérifie au moyen de la *fiolle des quatre éléments* (fig. 88). C'est un simple flacon dans lequel on verse avec une certaine précaution quatre liquides de densités différentes, tels que de l'eau, du mercure, de l'huile et du pétrole. On voit, au bout d'un instant, les liquides se placer par ordre de densité.

C'est par suite de cette propriété que, dans les veilleuses, l'huile surnage l'eau; que la crème flotte sur le lait; qu'à l'embouchure des rivières l'eau douce forme à la surface de l'eau de mer une couche dont la base seule, par suite de l'agitation, est en partie mêlée avec l'eau salée.

Les anciens avaient constaté ce dernier phénomène, et, dans son *Histoire naturelle*, Pline parle même des eaux douces qui, plus légères que d'autres, les surnagent, « comme dans le lac Fucin la rivière qui le traverse; dans le lac de Laris, l'Adda; dans le lac de Verbanum, le Tessin; dans le Bénac, le Mincio; dans le lac Sévin, l'Ollius; dans le lac Léman, le Rhône. Tous ces fleuves, recevant, pour ainsi dire, l'hospitalité dans un trajet de plusieurs milles, n'emmenent que leurs eaux et ne sortent pas plus gros qu'ils n'étaient entrés. »

Citons encore le fameux courant appelé le Gulf-Stream qui traverse

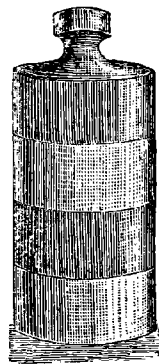


FIG. 88. — FIOLE  
DES QUATRE  
ÉLÉMENTS.

l'océan Atlantique sans mêler ses ondes avec celles de la mer, parce qu'elles sont plus légères, étant à une température assez élevée (30 degrés au-dessus de zéro à sa sortie du golfe du Mexique).

On sait que le Gulf-Stream, qui semble commencer au delà du cap de Bonne-Espérance, traverse diagonalement l'Atlantique du Sud, s'infléchit vers le cap Saint-Roch, le long des côtes de l'Amérique, puis contourne le golfe du Mexique, ressort par le canal de Bahama, en suivant les côtes des États-Unis, traverse l'Atlantique du Nord, en lançant une dérivation considérable vers les Açores, les côtes d'Espagne, de France et du Maroc, et vient atteindre le nord de l'Europe. Ses eaux, d'un bleu sombre, se distinguent nettement sur la surface de l'Océan, au-dessus de laquelle son axe s'élève d'environ deux pieds au sortir du golfe du Mexique; il a comme des rives indiquées par des sillons d'écume. Sa vitesse est telle qu'il file quatre nœuds en trente secondes, c'est-à-dire quatre milles marins à l'heure (1).

Les Anglais arrêtent court le Gulf-Stream à la hauteur de Terre-Neuve, en plein Atlantique; mais, plus généralement, on croit qu'à cet endroit un courant polaire formé de glaces flottantes heurte par le travers le Gulf-Stream précisément au point d'où ce dernier envoie vers les côtes d'Espagne sa dérivation orientale. Il résiste, et tandis qu'une partie de son courant, revenant sur elle-même, se dirige vers le nord, s'engage dans le canal de Dawis, se glisse le long des côtes du Groenland et va se faire sentir à l'entrée du détroit de Smith, l'autre partie, de beaucoup plus considérable, va baigner les côtes de l'Irlande et de l'Écosse, l'Islande, les îles Feroë et Shetland. Là, il subit de nouveau le choc d'un courant polaire, et, cette fois encore, il se divise. Une dérivation assez considérable, mêlant ses eaux bleues aux eaux vertes du pôle, refoule les glaces flottantes et gagne la côte occidentale du Spitzberg, tandis que le courant principal se dirige vers le nord-est, enveloppe les côtes de Norvège, puis va enfin se perdre le long de la Sibérie et de la Nouvelle-Sibérie, au milieu des glaces des mers arctiques.

#### ÉQUILIBRE DES LIQUIDES DANS LES VASES COMMUNICANTS. —

L'équilibre des liquides placés dans des vases communiquant entre eux repose sur deux principes :

1° *Si les liquides sont de densités égales, ou si un seul liquide est dans les vases, les diverses surfaces sont situées dans un même plan horizontal, quels que soient la forme et le diamètre des vases.*

(1) Le mille marin est, en France, en Angleterre et en Italie, de 60 au degré et vaut 1,852 mètres.

Ainsi (*fig. 89*), que l'on verse de l'eau dans un vase A, vissé sur un tube de cuivre qui le fait communiquer aux vases B, D, E et même à un orifice étroit C, bien moins élevé, l'eau remplira bientôt tous les récipients jusqu'à la hauteur de l'eau restée dans le vase A. Si l'on ouvre le robinet du petit orifice, l'eau jaillira jusqu'à cette hauteur, et ce jet d'eau diminuera au fur et à mesure que le liquide abaissera son niveau dans les vases, par suite de cet écoulement. Ceci est une conséquence des conditions générales d'équilibre des liquides que nous avons démontrées ci-dessus. Chaque tranche, dans chaque vase, doit supporter des pressions égales pour rester en équilibre; or, pour supporter des pressions égales, il faut que toutes aient la même hauteur, c'est-à-dire le même niveau vertical.

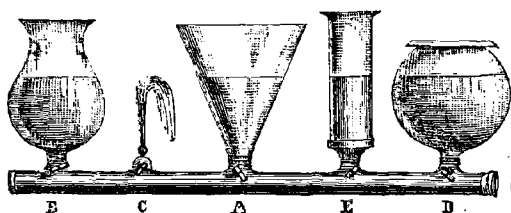


Fig. 89. — ÉQUILIBRE DES VASES COMMUNICANTS.

2° Le deuxième principe :

*Si les liquides sont de densités différentes, les hauteurs des colonnes sont en raison inverse des densités*, se vérifie expérimentalement au moyen d'un tube recourbé AB (*fig. 90*). On verse d'abord du mercure dans le tube; d'après le principe précédent, le mercure se place en équilibre et les hauteurs E et D, dans chacune des branches, sont dans un plan parfaitement horizontal. Que l'on verse alors de l'eau dans la branche B du tube, le mercure montera dans la branche A d'une hauteur EH, diminuera dans la branche B d'une hauteur égale DL, et l'équilibre existera. La colonne EH de mercure balance donc la colonne d'eau CD, devenue C'L. Or, si l'on mesure la longueur CD ou C'L, on voit qu'elle est treize fois et demie plus grande que EH, la densité du mercure étant treize fois et demie plus grande que celle de l'eau. Ainsi est démontrée la vérité du principe.

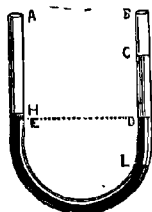


Fig. 90.

**APPLICATIONS DES PRINCIPES DE L'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES DANS LES VASES COMMUNICANTS. — PUIXS ARTÉSIENS.** — Les anciens connaissaient les principes des *vases communicants*, puisque leurs jardins étaient ornés de jets d'eau, et que toutes les mythologies nous montrent des Moïses faisant jaillir l'eau des rochers, des dieux ou des saints appelant, au milieu des déserts, des sources du fond de la terre. Mais comme ils ignoraient l'existence des grandes nappes d'eau souterraines, qu'ils croyaient « que les sources de la terre sont allaitées par les tétines de l'Océan, » ils criaient au miracle; ils honoraient comme

des dieux ceux que leur génie inspirait assez pour qu'ils appliquassent avec succès une loi naturelle, et ils ne songeaient guère à les imiter et à multiplier à volonté les bienfaisants prodiges. Excepté les Chinois, dit-on, et les Égyptiens, nul peuple de l'antiquité ne pratiquait le forage de sources jaillissantes.

Ainsi le premier *puits artésien* qui ait été creusé en France, et qui existe encore aujourd'hui, paraît être, en 1126, celui d'un couvent de chartreux, à Lillers (Pas-de-Calais), ancienne province d'Artois, d'où est venu le nom de ces puits. Cependant il faut bien qu'on ait attribué la création de cette source aux vertus seules de quelque moine du couvent, puisque personne ne s'avisa, dans toute l'Europe, d'en creuser de semblables avant le XVII<sup>e</sup> siècle.

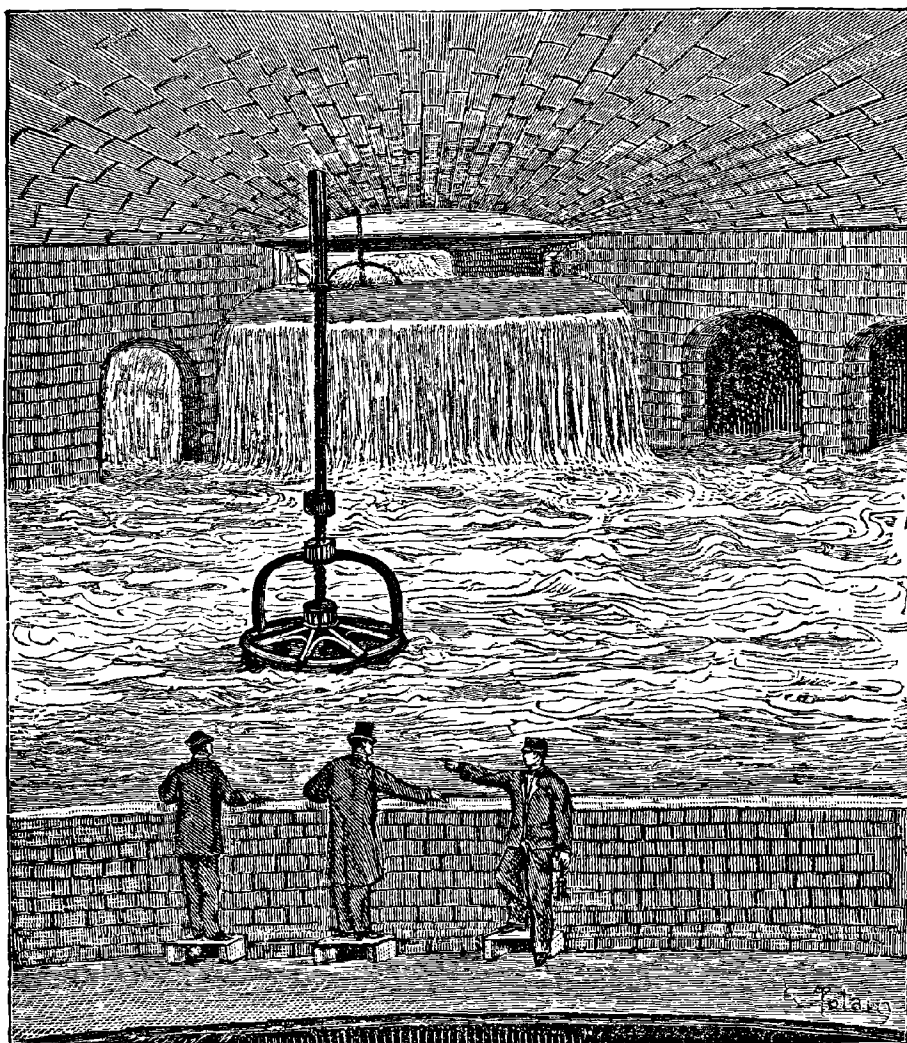
Néanmoins, en 1580, Bernard Palissy (1), dont le génie a touché à toutes les branches de la science, écrivait :

« La cause pourquoy les eaux se trouvent tant ès sources qu'ès puits n'est autre qu'elles ont trouvé un fond de pierre ou de terre argileuse, laquelle peut tenir l'eau autant bien comme la pierre ; et si quelqu'un cherche de l'eau dedans des terres sableuses, il n'en trouvera jamais, si ce n'est qu'il y ait au-dessous de l'eau quelque terre argileuse, pierre ou ardoise, ou minéral, qui retienne les eaux des pluyes quand elles auront passé au travers des terres. Tu me pourras mettre en avant que tu as vu plusieurs sources sortant des terres sableuses, voir dedans les sables mêmes. A quoy je responds, comme dessus, qu'il y a dessous quelque fond

(1) PALISSY (Bernard), né en 1510 à La Capelle-Byron (Lot-et-Garonne), mort en 1589. Quoique la biographie de cet homme célèbre dût être placée plutôt dans une *Chimie* que dans une *Physique*, nous dirons quelques mots de lui, puisque l'occasion s'en présente. Nul n'ignore les épouvantables infortunes qu'il eut à supporter : il a épuisé la triste série des misères physiques et morales de l'homme. On sait que, marié, en 1535, à une jeune fille de Saintes, il en eut plusieurs enfants dont il ne pouvait payer la nourriture ; qu'il manquait de pain, de vêtements, et que le manque de bois le forçait de brûler les tables et les planchers de sa maison pour pouvoir alimenter le feu de ces fourneaux d'où devaient sortir les magnifiques émaux qui l'ont illustré. On sait qu'après vingt ans de supplices inouis, de travaux gigantesques, après avoir enfin produit des chefs-d'œuvre, il eut encore à supporter de cruelles persécutions religieuses ; qu'il n'échappa à la Saint-Barthélemy que par miracle, et qu'enfin en 1588, à soixante-seize ans, il fut jeté à la Bastille par l'ordre d'un fervent catholique, Mathieu de Launay, un des Seize. Le roi Henri III vint l'y voir et lui conseilla d'abjurer le protestantisme, sans quoi il se verrait obligé de l'abandonner au bûcher. L'histoire nous a conservé la réponse de Bernard Palissy : « Sire, le comte de Maulevrier vint hier de votre part pour promettre la vie à ces deux sœurs (les filles de Jacques Foucaud, procureur au parlement, incarcérées comme huguenotes), si elles voulaient vous donner chacune une nuit. Elles ont répondu qu'encore elles seraient martyres de leur honneur comme de celui de Dieu. Vous m'avez dit plusieurs fois que vous aviez pitié de moy ; moy aussi, j'ai pitié de vous, qui avez prononcé ces mots : *J'y suis contrainct*. Ce n'est pas parler en roy. Ces filles et moy, qui avons part au royaume des cieux, nous vous apprendrons ce langage royal : que les Guizards, tout votre peuple, ni vous ne sauriez contraindre un potier à fléchir le genou devant des statues, parce que je sais mourir. » Évidemment, le roy laissa mourir à la Bastille Bernard Palissy, puisque c'était non seulement un physicien, un chimiste, un savant, un artiste de génie, mais encore un noble cœur et une âme élevée.



de pierre, et que, *si la source monte plus haut que les sables, elle vient aussi de plus haut.* » (*De la nature des eaux et fontaines, des métaux, des terres, etc.* Paris, 1580, in-8°.)



Vue du réservoir de Montsouris (page 206).

Et il concluait :

« Il me semble qu'une torsière (vrille) percerait aisément certaines pierres tendres et qu'on pourrait trouver par tel moyen du terrain de marne, voire même des eaux, pour faire puits, lesquelles pourraient bien

souvent monter plus haut que le lieu où la pointe de la torsière les aura trouvées. Et cela se pourra faire moyennant qu'elles viennent de plus haut que le trou que tu auras fait. »

En 1671, Cassini (J.-Dominique), le père de l'illustre famille des astronomes de ce nom, faisait enfin construire, au fort Urbain, un puits artésien dont l'eau jaillissait à 5 mètres au-dessus du sol. Mais ce n'est réellement que depuis 1818, à la suite des travaux de MM. Héricart de Thury et Dégoussée, que le forage des puits artésiens a pris quelque développement.

Pour bien faire comprendre cette application de la science à l'industrie, nous citerons le forage des deux puits artésiens de Paris, celui qui est situé dans le quartier de Grenelle et celui qui est à Passy, nous réservant d'entrer dans les détails de la seconde seulement de ces deux opérations, dans laquelle on s'est servi d'un système aujourd'hui généralement adopté.

François Arago et le géologue renommé que nous citions tout à l'heure, M. Héricart de Thury, avaient dissipé, d'une manière plus ou moins directe, bien des erreurs accréditées qui entravaient l'industrie des puits artésiens. Dans ses *Notices scientifiques*, Arago en avait clairement exposé la théorie et affirmé les résultats; aussi, en 1832, le conseil municipal de Paris décida le forage d'un puits artésien. Des nappes d'eau souterraines superposées existaient certainement au-dessous de la ville; cela ne faisait aucun doute pour les géologues. La carte hydrographique souterraine de Paris les montrait.

Il y a d'abord celle qui est en communication immédiate avec la Seine et que l'on appelle la nappe d'infiltration. Elle s'étend sous Paris, et même c'est elle qui fournit l'eau à presque tous les puits. Ses courbes horizontales sont des lignes parallèles, à peu près disposées symétriquement sur chaque rive de la Seine et elles vont se raccorder avec la nappe superficielle. Le niveau de cette nappe d'infiltration est généralement supérieur à celui du fleuve et s'élève à mesure qu'on s'en éloigne. Elle reçoit bien l'eau d'infiltration de la Seine qui s'y répand à l'époque des crues; mais elle est surtout alimentée par les eaux provenant des collines qui entourent Paris.

Les îles Saint-Louis et Notre-Dame ont une nappe souterraine distincte qui est également une nappe d'infiltration. Près de Montmartre, quelques puits sont alimentés par une nappe souterraine dont la cote est à 42 mètres; cette nappe est toute différente de la nappe d'infiltration de la Seine. Dans le haut des rues Rochechouart et Fontarabie, des nappes existent encore au-dessus de cette nappe d'infiltration.

Mais on reconnut que ces nappes souterraines, déjà utilisées pour alimenter des jets d'eau plus ou moins abondants, plus ou moins élevés, obtenus par des forages qui ne dépassaient jamais 100 mètres de profondeur, n'avaient pas une force ascensionnelle suffisante pour faire jaillir l'eau au niveau de Paris. Arago proposa donc de dépasser ces couches liquides et de percer jusqu'aux couches de terre imperméables entre lesquelles séjournent les eaux de pluie. Il assurait le succès. Après de longues hésitations, l'autorisation lui fut accordée. Il savait que le terrain sur lequel repose Paris est composé successivement d'argile plastique, de craie, de *gault*, es-

pèce de marne bleue, toutes couches imperméables; ensuite, qu'il y a une couche perméable, très épaisse, d'un sable verdâtre connu sous le nom de *grès vert*; puis une autre couche argileuse, le terrain *wealdien*, encore imperméable. Toutes ces couches,

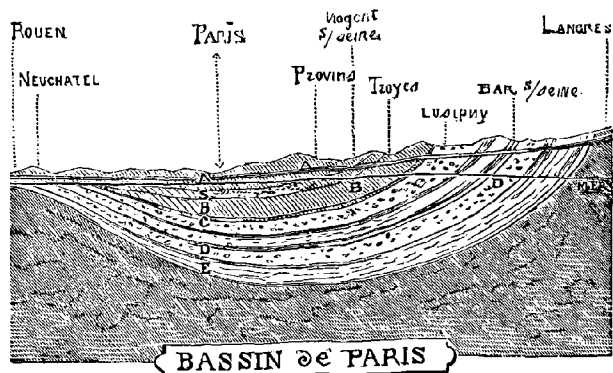


Fig. 91.

qui règnent sous tout le bassin de Paris (*fig. 91*), forment comme une immense cuvette dont un bord est en Champagne et l'autre aux environs de Neufchâtel (Seine-Inférieure). Ces couches ne sont pas horizontales; elles se relèvent en des points situés autour de Paris et les plus élevés de la ville, comme Grenelle et Passy; elles constituent le plateau de Langres, et l'on trouve le *grès vert* à Troyes, à Auxerre, à Saint-Dizier. Les eaux de pluie, filtrant à travers ce sable, vont former au fond, sur l'argile du terrain *wealdien*, d'immenses nappes d'eau. Si donc on perce un canal jusqu'à elle, cette eau, en vertu du principe des vases communicants, devait évidemment jaillir à la hauteur de sa surface libre la plus élevée.

Le 23 novembre 1833, on apporta à l'abattoir de Grenelle les instruments nécessaires, et, le 24 décembre, sous la direction de M. Mulot, à qui avait été confiée l'entreprise, ces travaux gigantesques commencèrent.

Jusqu'alors le forage s'opérait de main d'homme, comme celui des puits ordinaires. Dans le système Mulot et Degoussée, on faisait usage d'un foret, que supportaient une suite de tiges de fer emmanchées les unes dans les autres et que l'on enfonçait dans le sol à l'aide d'un

mouton (*fig. 92*). L'inconvénient principal était le poids énorme des tiges et le temps qu'il fallait pour retirer l'appareil du fond du puits. De plus, l'outil perforateur était nécessairement suivi de toute la ligne de sonde. Or, il est aisé de comprendre combien une longue tige était exposée à ployer ou à toucher les parois du puits ; dès lors, la force de l'impulsion était amortie. Aussi cette espèce de tarière métallique se brisa souvent pendant le travail, et ce ne fut pas le moindre des accidents qui retardèrent si long-

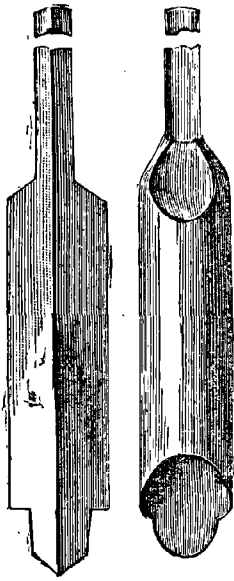


Fig. 92.

OUTILS PERFORATEURS.

temps l'accomplissement de l'œuvre. On se figure quel embarras ce doit être quand un outil, d'un poids tel que le mouvement lui est imprimé par un bélier de 8,000 kilogrammes, tombe de 400 mètres sous terre au fond d'un trou plus petit que le corps d'un homme. Quelles peines, quels labeurs pour retrouver et arracher cet outil enfoncé dans du roc, où pour le briser, afin de dégager le puits obstrué par lui ! Arago lui-même a raconté les péripéties cruelles de cette œuvre : la sonde brisée le 30 novembre 1834 et retirée seulement trois mois plus tard, brisée une seconde fois en 1836, une troisième fois en 1837, et les travaux retardés de quatorze mois par ce fait ; il nous a dit les cruelles attaques de ses ennemis, des ennemis de l'entreprise, et son inaltérable confiance.

Enfin le succès arriva.

« On était à 545 mètres ; le 25 février 1841, la cuiller ramena un sable vert, humide, très argileux, qui vint faire renaître l'espérance... Aussi dès le lendemain, avant six heures, maîtres et ouvriers étaient à leur poste. Dans la journée, la cuiller s'enfonça librement de 0<sup>m</sup>,50. C'était bon signe. Tout à coup, les chevaux qui manœuvraient éprouvèrent une violente secousse qui ébranla l'atelier, puis ils tournèrent sans effort. « La sonde est cassée ou nous ayons l'eau ! » s'écria le directeur du travail. Bientôt un sifflement aigu se fit entendre, et l'eau jaillit avec force au-dessus de l'encliquetage.

Quelques heures après, Arago, qui assistait à une séance de la Chambre, reçut un billet ainsi conçu :

« Monsieur Arago, nous avons l'eau !

» MULOT. »

C'était le 26 février 1841, à deux heures trente-cinq minutes. Le travail avait duré sept ans et deux mois.

Les frais, si l'on compte certains travaux de consolidation et le renouvellement du tubage nécessaire pour maintenir les terres, qui ne furent complètement achevés qu'en 1852, ne se sont élevés qu'à 390,000 fr., et la vente des eaux aux établissements publics et aux particuliers couvrit bientôt cette dépense, qui est devenue une des sources de revenu de la ville.

Le forage du puits artésien de Passy commença au mois de juillet 1855. Le bois de Boulogne venait d'être transformé ; il fallait de l'eau,

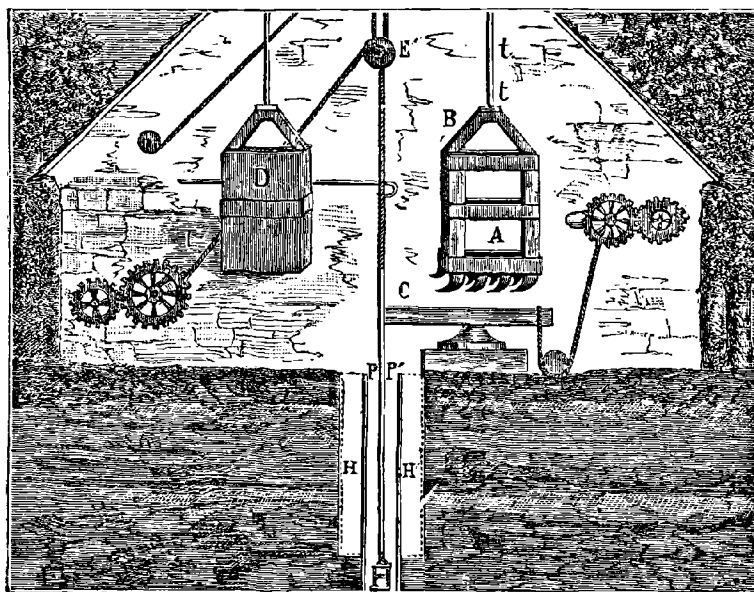


Fig. 93. — FORAGE DU PUIT DE PASSY.

beaucoup d'eau pour les cascades, les rivières et les lacs qui y avaient été creusés ; il fallait aussi faire très vite, parce que l'on était impatient de voir l'œuvre terminée. Un ingénieur saxon, M. Kind, qui jouissait d'une réputation extraordinaire de l'autre côté du Rhin pour les travaux de cette nature, présenta un projet d'après lequel il s'engageait à forer le puits de Passy dans le délai d'une année, moyennant une dépense de 350,000 francs. Le puits devait avoir au moins 0<sup>m</sup>,60 de diamètre dans sa partie la plus étroite et 1<sup>m</sup>,10 dans sa partie la plus large, et descendre, comme celui de Grenelle, jusque dans la couche aqueuse des grès verts.

La commission chargée d'examiner cette proposition l'accepta. Disons tout de suite que les espérances conçues ne furent pas réalisées ; la dépense s'éleva à 1,064,000 francs et les travaux ne furent achevés qu'au mois de septembre 1861, c'est-à-dire au bout de six ans. Le système employé par M. Kind, et qui est, paraît-il, un système chinois, n'est point

encore parfait, et quelques hommes spéciaux se demandent même s'il est supérieur à celui de M. Mulot. A Grenelle, on ne travaillait que dix heures par jour, tandis qu'à Passy on travaillait les vingt-quatre heures entières; M. Mulot n'avait à son service qu'un manège de six chevaux, tandis que M. Kind avait à sa disposition une machine à vapeur. Ajoutez qu'à Passy on opérait dans une terre dont on connaissait, par le forage de Grenelle, les couches successives et dont les difficultés pouvaient être prévues.

Ceci dit, entrons dans les détails de l'opération, d'après un compte rendu fait à l'époque par M. Le Noir (*fig. 93*).

Un trépan métallique A, du poids de 2,000 kilogrammes, formé d'énormes barres de fer reliées entre elles et terminé à sa partie supérieure par sept grosses dents biseautées, en acier fondu, dont les unes coupent en dehors et les autres en dedans, est suspendu à des tiges de sapin engrenées bout à bout, *t, t*.

Comme le manche qui suspend le trépan doit s'allonger toujours par l'addition de nouvelles tiges, à mesure que le trou devient plus profond, le trépan n'aurait pas sa liberté, ni son action, s'il fallait qu'il entraînant avec lui ce long manche à chacun des coups qu'il doit donner. Aussi a-t-on imaginé une pince fort ingénieuse, B, à chute libre, qui, fixée au bas du manche, s'ouvre par sa chute même sur la masse de fer, la saisit et l'enlève, puis s'ouvre de nouveau dès que le manche est remonté de 0<sup>m</sup>,60, par la laisser retomber de tout son poids.

Un arbre à balancier C, haussant et baissant par la vapeur, enlève et laisse retomber sans cesse de 0<sup>m</sup>,60 le manche du trépan. Ce jeu se répète vingt fois par minute. Le trépan retombe donc, chaque fois qu'il est soulevé, au fond du trou et y dégrade la terre plus ou moins rapidement, selon qu'il la trouve plus ou moins dure, plus ou moins glissante, plus ou moins compacte. De plus, il y a de l'eau dans ce trou; il n'y en vient que trop naturellement. Les débris hachés par le trépan sont délayés dans cette eau et y deviennent une vase assez claire.

Cette opération, qui est celle du forage proprement dit, dure à peine six heures. Quand la couche de terrain est facile à mordre et à délayer, on peut en démolir jusqu'à 2 mètres par jour. Mais quand on rencontre la pierre dure et surtout la marne compacte sur laquelle l'outil glisse en s'inclinant chaque fois qu'il retombe, on peut n'avancer que de 0<sup>m</sup>,60 en vingt-quatre heures.

Après le forage, on procède au curage des débris ainsi délayés. Pour cette seconde opération, on retire le trépan en mettant au bout du manche une autre pince qui ne le lâchera plus et l'on descend à sa place un grand seau en tôle D de 1<sup>m</sup> de hauteur sur 0<sup>m</sup>,80 de largeur. Ce seau porte,

à sa partie inférieure, une trappe à deux battants, qui est faite de manière qu'elle s'ouvre d'elle-même en tombant dans la vase, par la pression de cette vase, et que, le bocal étant rempli, le poids de ce qu'il contient le force à se fermer. On remonte donc le seau plein, comme on a fait pour le trépan, en retirant successivement les tiges qui composent le manche, et, arrivé en haut, on le détourne de côté, puis on l'ouvre et il laisse tomber sa charge de déblais.

Ce n'est pas avec le gros arbre G que l'on peut élever le trépan ou le seau à une hauteur suffisante au-dessus de l'orifice; mais on achève l'ascension par des cordages E, passant sur des poulies attachées assez haut et que fait jouer une machine à vapeur.

Le curage dure six heures, comme le forage qui l'a précédé.

Tout ce jeu est combiné avec la quantité d'eau qui filtre des couches supérieures, en sorte que, dans l'état normal, il suffit de deux hommes pour tout diriger. La direction consiste, pendant que la vapeur va son train, à rallonger ou raccourcir le manche d'un nouveau bout, quand il le faut, et à le maintenir au centre de l'orifice, pour que la charge tombe ou s'élève d'aplomb.

Les avantages de ce procédé sur l'ancien, c'est qu'une barre métallique, assez solide pour tourner et fouiller sans se rompre dans la terre du fond, devient inutile, puisque le manche ne fait que monter et descendre; que les dommages qui surviennent à ce manche peuvent être facilement réparés; qu'il est beaucoup moins lourd, ne consistant que dans des solives de sapin de 10 mètres de longueur et de 9 à 10 centimètres d'équarrissage, et qu'il semble qu'on peut creuser indéfiniment de cette manière, puisque le trépan, par cela même qu'il tombe toujours de la même hauteur, au fond du puits, quelque profond qu'il soit devenu, n'éprouve aucun frottement qui amortisse le coup, garde toujours la même force de percussion et n'a pas besoin d'être porté par un manche de plus en plus fort.

Mais on avait compté sans l'imprévu. Voici ce qui survint :

Les progrès du sondage avaient d'abord été merveilleux. Au mois de mai 1856, en moins d'une année, on était arrivé, sans accident bien sérieux, à une profondeur de 366 mètres, quand le trépan se brisa en s'engageant dans une masse de grès gris, d'où il fut impossible de l'extraire. On y employa sans succès, peut-être avec trop peu de patience, et surtout avec trop peu de confiance de la part des ouvriers allemands chargés du forage, de puissants électro-aimants. M. Kind prit enfin le parti de broyer le fer au fond du puits avec un autre trépan; mais il dut consacrer trente-trois jours à cette ingrate besogne.

Le terme d'une année fut bientôt dépassé. Néanmoins on persévérait ; car, à la fin de mars 1857, on était parvenu à une profondeur de 528 mètres, résultat magnifique, qui faisait croire qu'on allait, avant peu de temps, parvenir à la couche aquifère, composée de grès vert, la même que celle de Grenelle, et qui devait se trouver encore à 27 mètres seulement plus bas, puisque, à Grenelle, elle est à 547 mètres et que Passy est plus élevé d'une huitaine de mètres. Alors survint une véritable catastrophe. Entre le niveau du sol et une profondeur d'une cinquantaine de mètres se fit un éboulement de terrain, qui éventra les cylindres du tube dont on avait garni provisoirement les parois du trou. Les argiles et les sables, passant à travers les instruments brisés, comblèrent le fond du puits.

M. Kind, n'ayant pu mener son entreprise à terme dans le temps porté par le contrat passé entre lui et la ville de Paris, abandonna tout. Alors l'administration des ponts et chaussées, heureusement pour l'œuvre, se chargea de l'achever.

On creusa dans toute la partie compromise, et tout à l'entour du tube éventré P, un puits ordinaire H' H', de 3 mètres de diamètre, dont on garnit à mesure les parois de grands cylindres de fonte, ayant chacun 1<sup>m</sup>,50 de hauteur ; on les faisait descendre en les plaçant les uns sur les autres, le dernier poussant toujours ceux qui avaient été mis avant lui. Ce travail de réparation et de préparation à la reprise du forage dura deux années. On parvint à *cuveler*, c'est-à-dire à retirer et à déblayer toute la portion du premier tube provisoire écrasé ; puis les travaux furent recommencés, d'après les procédés de M. Kind, mais exécutés par voie de régie administrative, sous la direction immédiate de l'ingénieur des promenades et plantations de Paris, M. Alphand, et des autres ingénieurs de l'administration municipale. M. Kind ne restait plus chargé que de la manœuvre de ses instruments.

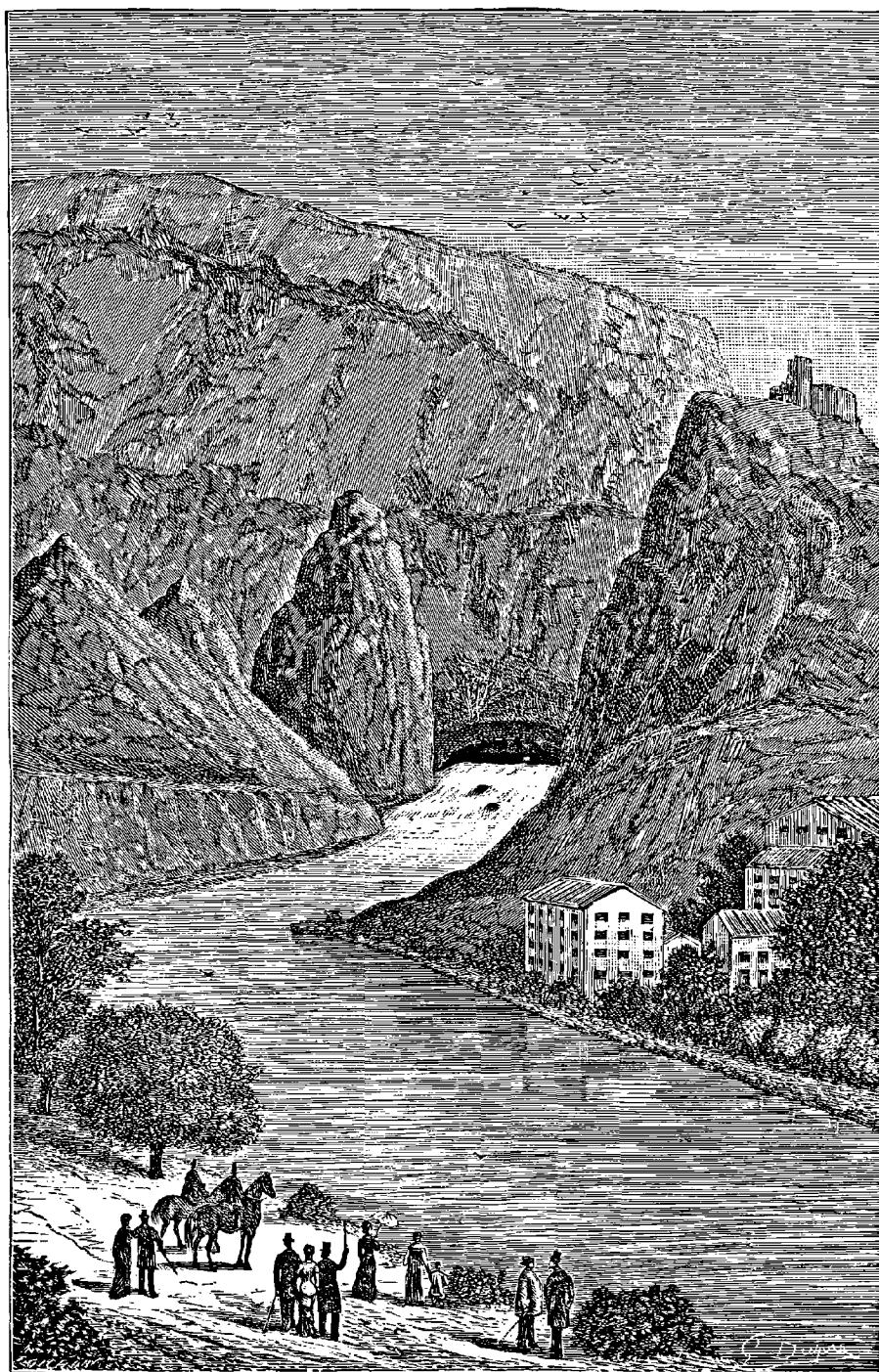
Au mois d'avril 1861, on était descendu à 549 mètres, quand survinrent encore des éboulements qui suspendirent le travail. On atteignit cependant la nappe jaillissante au mois de septembre 1861, à la profondeur indiquée de 586 mètres, mais seulement avec la sonde. Il fallut encore un très long délai pour creuser le puits et pour remédier à des accidents concernant le cuvelage.

Dès que l'eau jaillit de terre, la quantité fournie par le puits de Grenelle diminua sensiblement ; il ne donna plus que 430 litres par minute au lieu de 640.

Néanmoins, en présence des résultats obtenus, la ville de Paris n'a pas hésité à faire forer de nouveaux puits artésiens à la Butte-aux-Cailles et à la Chapelle.



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Vue de la fontaine de Vaucluse. (page 204).



L'industrie, l'agriculture, la civilisation même sont intéressées dans la question des puits artésiens. C'est grâce à ces puits que les oasis peuvent se former au milieu des déserts du Sahara; aussi la joie des Arabes, quand nous établimes en Afrique les premiers puits artésiens, se manifesta-t-elle par des *fantasias* enthousiastes dont le récit, dans les journaux de l'époque, est véritablement curieux. Cependant depuis longtemps ils connaissaient ces puits, et les habitants des confins du désert possédaient même une corporation, connue sous le nom de *ghattas* (sondeurs), vénérée par eux; mais les moyens employés étaient tellement primitifs, tellement dangereux, que bien rares étaient les résultats obtenus, et que l'emploi de nos procédés a été pour eux une véritable révélation.

L'importance du sujet nous engage à dire encore un mot des *puits artésiens tubulaires américains*, ou *puits instantanés*, inventés, dit-on, par M. Norton, ou plutôt perfectionnés et rendus pratiques par lui. On prétend que l'idée a pris naissance pendant la dernière guerre d'Amérique. Quelques soldats de l'armée du Nord avaient puisé de l'eau dans un sol stérile, au moyen de tubes de fusil qu'ils brisaient et qu'ils enfonçaient dans la terre. Cependant nous avons vu, il y a quelque vingt ans, cette invention attribuée à un certain docteur Hadji-Ruem, du Caire, élève d'un lycée de Paris.

L'appareil se compose d'un tuyau métallique de 3 ou 4 mètres de longueur, aux parois très épaisses, ayant un diamètre intérieur de 0<sup>m</sup>,035 et terminé par un cône d'acier très bien trempé. Ce cône est garni de petits pertuis, comme une passoire de cuisine. On dispose sur le terrain une petite plate-forme solidement fixée par trois pieds en bois, et percée d'un trou dans lequel s'engage le tube. On l'enfonce dans le sol soit en le faisant virer au cabestan, et, alors une pompe placée au sommet fait le vide à l'intérieur, ce qui facilite sa descente sous la pression atmosphérique; soit en le frappant violemment avec un marteau-pilon. Mais, dans ce dernier cas, pour ne pas endommager le tube par les chocs directs du marteau, celui-ci n'agit que sur un anneau solidement fixé au tube par des boulons. Quand ce premier tube a disparu, on visse à sa partie supérieure un autre tube et l'on continue l'opération jusqu'à ce qu'on ait trouvé l'eau. On ajuste alors une pompe au tube supérieur, et l'eau arrive bientôt.

Quelquefois cependant le cône rencontre une pierre dure, un silex; dans ce cas, on arrache le tube, et l'on cherche ailleurs; mais, la plupart du temps, on réussit.

Le succès de ces puits tubulaires a décidé les gouvernements à les introduire dans le matériel des armées. Le ministre de la guerre, en

France, en a fait l'acquisition d'un certain nombre, et les Anglais, en Abyssinie et dans leur dernière campagne d'Afrique, les ont employés avec avantage.

**FONTAINES JAILLISSANTES.** — Les *fontaines jaillissantes* sont des puits artésiens naturels. Quelques-unes, émettant des vapeurs au contact de matières volcaniques souterraines, subissent de la part de ces vapeurs une pression qui les lance à une grande hauteur. C'est ce qui se présente dans les *geysers*, fontaines chaudes que l'on observe surtout en Islande et qui s'élancent quelquefois jusqu'à 50 mètres de la surface du sol; d'autres jaillissent parce qu'elles proviennent simplement d'un niveau supérieur à celui d'où elles sourdent. Parmi ces dernières, nous citerons la célèbre *fontaine de Vaucluse*; c'est une des plus belles que l'on connaisse en Europe.

Située à une égale distance d'Avignon et de Carpentras, elle sort d'une vaste et profonde caverne, ouverte en arcade au pied d'une montagne à pic, qui termine au sud le vallon étroit et tortueux dont le nom signifie *vallée close* (*vallis clausa*). Au-dessous, et vers le milieu de la voûte de la caverne, un figuier, dont l'âge est inconnu, s'élève comme pour servir à mesurer les eaux de la fontaine. Lorsqu'elles sont à leur plus grande élévation, ce qui a lieu à l'équinoxe du printemps, époque de la fonte des neiges, elles baignent les racines de l'arbre; la voûte disparaît, et la surface tranquille de l'eau occupe un large entonnoir dont les bords presque circulaires ont environ 20 mètres de diamètre. Au mois d'octobre, au contraire, les eaux, arrivées à leur plus grand abaissement, sont dominées à 12 mètres de hauteur par les bords du bassin. La voûte de l'antre se montre dans toute sa majesté et laisse voir un lac dont l'étendue se perd dans l'obscurité la plus profonde. La pente de l'entonnoir permet alors de descendre, avec de grandes précautions, jusqu'à la surface de cette masse d'eau limpide, qui remplit un abîme dont on n'a pu encore mesurer le fond. De vastes canaux souterrains, placés au-dessus, indiquent les issues par lesquelles aboutissent les eaux que produit la fonte des neiges. Au-dessous du bassin, une vingtaine de torrents se précipitent avec fracas en double cascade, dont les flots écumeux bouillonnent au milieu des rochers, en produisant continuellement le bruit du tonnerre, et forment la rivière de la *Sorgues*, qui, tout à coup susceptible de porter les bateaux, fait mouvoir plusieurs papeteries. Sur le bord du bassin de la fontaine, l'Académie de Vaucluse a fait ériger, en 1809, une colonne majestueuse avec cette simple inscription en lettres d'or : *A Pétrarque*.

Les rochers qui entourent la cascade, les masses pyramidales qui

s'élèvent à droite et à gauche, les vertes pelouses qui garnissent les pentes voisines, le vieux château, ancienne maison de plaisance de Philippe de Cabanolles, l'ami de Pétrarque, et bâti au haut d'un roc sur la rive gauche de la rivière (1), la belle verdure des arbres qui croissent sur les bords de la Sorgues, le joli village de Vaucluse, les échos prompts à répéter les noms de Pétrarque et de Laure à la voix des amants qui se plaisent, en les réunissant, à consoler l'ombre du poète des rigueurs de son amante : tout, dans cette vallée, invite à parcourir ses romantiques détours (2).

Un savant travail de M. l'ingénieur en chef Bouvier, inséré en 1857 dans les *Annales des ponts et chaussées*, a démontré que cette fontaine extraordinaire ne peut être attribuée aux glaciers des Alpes ni aux infiltrations de la Durance, mais aux nappes souterraines du bassin circonscrit entre le mont Ventoux et le ravin très profond de la Nesque, et qu'elle n'est obtenue ainsi qu'au détriment d'une surface d'environ 100,000 hectares, comprise soit dans ce département, soit dans celui des Basses-Alpes, et qui, faute d'eau, est condamnée à une stérilité presque complète.

**JETS D'EAU. — DISTRIBUTION D'EAU DANS LES VILLES.** — Nous parlerons à peine des *jets d'eau*, quoique leur importance dans l'ornementation des jardins soit à considérer. L'eau amenée souterrainement de réservoirs élevés jaillit par un orifice étroit et atteindrait, comme l'indique la théorie des *vases communicants*, à la hauteur de l'eau des réservoirs, si le frottement de l'eau dans les tuyaux qui la conduisent, la résistance de l'air, la chute des gouttelettes qui retombent, ne gênaient l'ascension des autres. C'est pourquoi, lorsqu'un coup de vent incline le jet d'eau, celui-ci s'élance bien plus haut, parce que le troisième de ces obstacles disparaît ou s'affaiblit.

La distribution des eaux dans les villes présente une application bien plus sérieuse des principes que nous avons développés. On sait de quelle nécessité c'est d'avoir l'eau en abondance dans les villes. Or, en amenant ce liquide dans des réservoirs notablement plus élevés que l'orifice des bornes-fontaines bâties dans toutes les rues, afin d'obtenir à la sortie une pression qui fasse jaillir l'eau, ou, quand on n'a pu obtenir ce réservoir très élevé, en refoulant l'eau dans des canaux à l'aide de pompes, pour obtenir une pression, voici comment a été organisé à Paris le service de distribution des eaux.

(1) Ce château est devenu, depuis peu, une papeterie.

(2) MALTE-BRUN. *Géographie universelle*.

En 1860, chaque habitant n'avait à sa disposition que 35 litres d'eau et seulement d'eau de Seine. On décida d'amener à Paris les eaux des sources de la Dhuis, petite rivière de l'arrondissement de Château-Thierry (Aisne). On construisit donc un aqueduc de 131 kilomètres, qui suit les coteaux qui bordent la Dhuis et la Marne, et qui, prenant les eaux à 130 mètres au-dessus du niveau de la mer, les amène à Paris, sur les hauteurs de Ménilmontant, à 108 mètres au-dessus du niveau de la mer. Elles sont reçues dans un vaste réservoir et s'écoulent dans les canaux qui desservent les quartiers de la rive droite. Ce réservoir est à deux étages : l'étage supérieur est réservé à la Dhuis; dans l'étage inférieur, on élève les eaux de la Marne pour suppléer pendant l'été à l'insuffisance de l'Ourcq, dont les eaux, comme celles de la Seine, sont spécialement affectées à l'arrosage, aux lavages et aux fontaines. Trois usines hydrauliques, de Trilbardou (Seine), des Isles-les-Meldeuses et de Saint-Maur, envoient les eaux de la Marne et d'une autre source à Ménilmontant et au lac de Gravelle, qui alimente d'eau le bois de Vincennes. Commencé en 1861, ce travail a été achevé en 1865.

Les eaux de la Vanne furent ensuite dérivées du département de l'Aube jusqu'à Paris. Un aqueduc passe de la vallée de la Vanne dans celle de l'Yonne, par l'intermédiaire d'un *tunnel-siphon* (voy. plus bas) de près de 4 kilomètres de développement, soutenu sur un pont en béton aggloméré. Il traverse les sables de la forêt de Fontainebleau et passe sur la Bièvre à l'aide d'un pont-canal de 990 mètres de longueur, composé de 77 arcades, et il arrive au grand réservoir de Montsouris, à 80 mètres d'altitude. Ce réservoir, à deux étages, comme celui de Ménilmontant, a une capacité de 300,000 mètres cubes.

**TUNNELS-SIPHONS.** — On donne ce nom à des tubes communicants servant soit pour les réservoirs des canaux dans les vallées, soit pour faire passer sous une rivière ou sous un canal un autre canal à ciel ouvert. Le fait se présente souvent dans le parcours des eaux d'irrigation ou de dessèchement. On opère alors de cette manière : à droite et à gauche du canal ou de la rivière sous laquelle on doit passer, on pratique deux puits en maçonnerie, réunis par des tubes de fonte à emboîtement, comme pour les tuyaux de conduite des eaux. Les deux portions du canal d'irrigation sont réunies par des tubes communicants.

A l'Exposition universelle de 1878, l'administration des ponts et chaussées a présenté un volume relatant les principaux travaux exécutés par les ingénieurs. On y trouve d'intéressants détails sur les nombreux tunnels-siphons construits par eux, principalement pour les canaux

d'irrigation de Verdon (Bouches-du-Rhône), d'Ajaccio (Corse), d'Orédon (Hautes-Pyrénées), etc.

**NIVEAU D'EAU.** — Le *niveau d'eau* se compose (*fig. 94*) d'un long tube en fer-blanc, recourbé à chacune de ses extrémités qui supporte une fiole cylindrique de verre, ouverte à sa partie supérieure. On remplit d'eau le tube, de façon qu'elle arrive à peu près aux trois quarts des deux fioles. En vertu du principe des *vases communicants*, si l'on dispose l'appareil horizontalement sur un pied à trois branches, le liquide contenu dans les deux vases sera sur un même plan horizontal. On établit donc d'abord cet équilibre. Si alors on veut

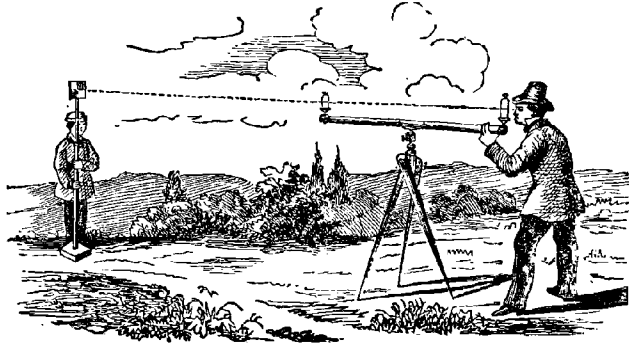


Fig. 94. — NIVEAU D'EAU.

savoir de quelle hauteur le point où est l'observateur est plus élevé qu'un autre, on place à ce second point une *mire*, règle en bois pouvant s'allonger ou s'abaisser à volonté et portant à son sommet une plaque de fer-blanc sur laquelle est marqué un point de repère. On abaisse ou on élève ce point de repère jusqu'à ce qu'il soit sur le même plan que la surface de l'eau contenue dans les deux fioles. Il suffit alors, pour connaître la hauteur du point où est l'observateur, de soustraire la hauteur du niveau d'eau de la hauteur de la mire.



Fig. 95. — NIVEAU A BULLE D'AIR.

**NIVEAU A BULLE D'AIR.** —

Le *niveau à bulle d'air*, bien plus précis que le niveau à bulle d'eau, est basé sur le principe d'équilibre

des fluides de densités différentes. Il se compose (*fig. 95*) d'un tube de verre fermé à ses deux extrémités, légèrement convexe, enchâssé dans une monture métallique appelée *platine* et rempli d'eau, ou préférablement, parce que ces liquides ne gèlent que très difficilement, d'alcool ou d'éther.

Ce liquide ne remplit pas complètement le tube, qui contient en outre une bulle d'air ou de vapeur. La convexité du tube est tournée vers

le haut, de sorte que la bulle gazeuse se trouve toujours dans la partie du tube la plus verticalement élevée. Si la platine est inclinée à l'horizon, la bulle montera du côté le plus élevé du tube; elle ne reste rigoureusement au point milieu que si le tube et la platine sont dans un plan parfaitement horizontal, et alors la bulle vient se loger entre les deux traits marqués sur le verre et appelés *points de repère*. Pour s'assurer de l'horizontalité d'une surface, on n'a donc

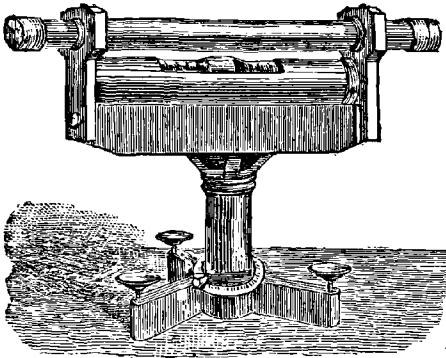


Fig. 96. — NIVEAU À LUNETTE.

qu'à placer sur elle le niveau à bulle d'air, et voir si la bulle est bien aux points de repère. Tous les instruments de précision dont certaines parties doivent conserver, pendant les observations, une horizontalité ou une verticalité rigoureuse, comme la plupart des instruments de géodésie ou d'astronomie, sont munis d'un niveau à bulle d'air.

Pour les opérations de géodésie (du grec *gé*, terre; *daio*, je divise) ou de nivellement un peu importantes et qui demandent une grande exactitude, on se sert le plus généralement du niveau à bulle d'air, dit *niveau d'Egault* ou *niveau à lunette* (fig. 96). Le niveau est porté par un manchon M qui entoure un axe vertical supporté par un plateau P. La rotation du manchon autour de l'axe est produite par un levier L qui mène aussi une règle mobile, nommée *alidade*, laquelle parcourt un cercle divisé. Au-dessus du niveau est fixée une lunette qui doit être horizontale quand la bulle du niveau est entre les points de repère. L'axe du manchon est vertical quand la bulle du niveau est entre ses repères. Son usage est d'ailleurs le même que celui du niveau d'eau.

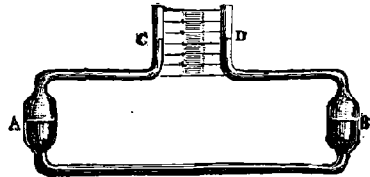


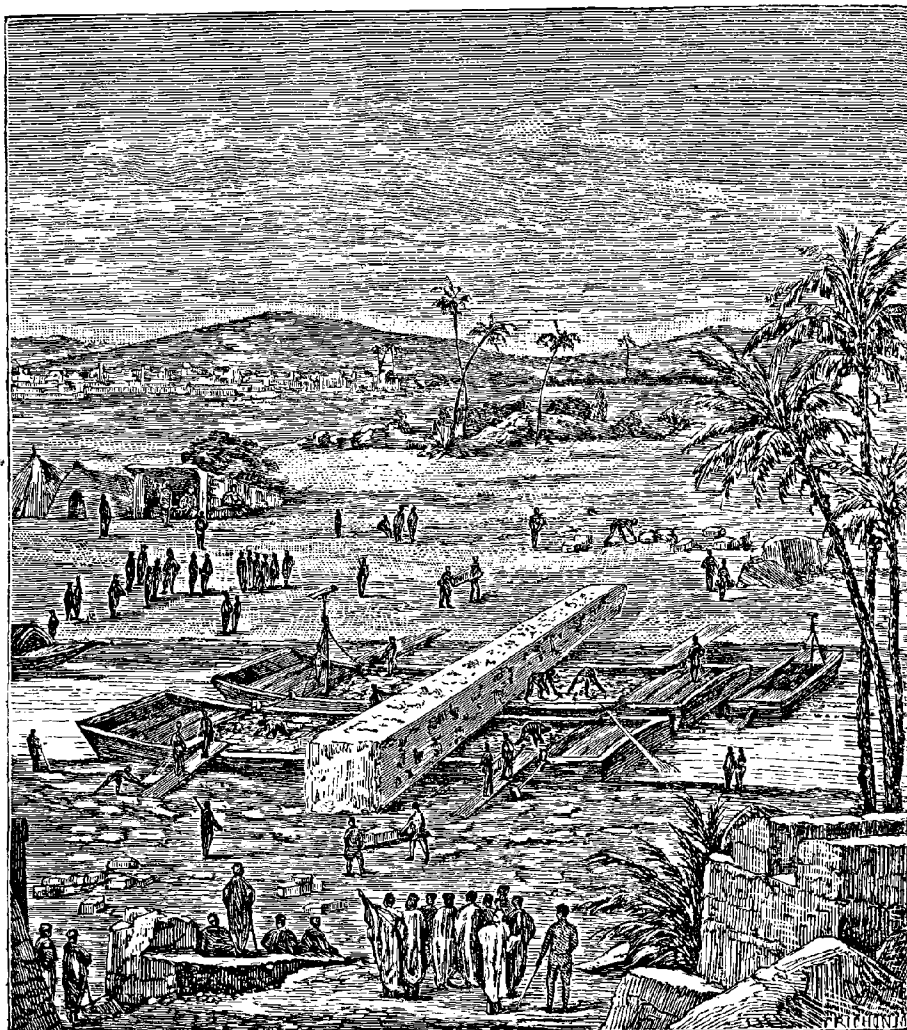
Fig. 97. — CLINOMÈTRE.

**CLINOMÈTRE.** — Nous citerons encore, comme application du principe des vases communicants, le *clinomètre*, instrument destiné à mesurer l'inclinaison de la quille d'un vaisseau en marche, inclinaison souvent importante à connaître parce qu'elle a une grande influence sur la rapidité du vaisseau.

L'appareil (fig. 97) se compose de deux boules de verre A et B



communiquant à leur partie inférieure par un tube de verre, plein de mercure. Deux autres tubes coudés CD aboutissent à leur partie supérieure. Le mercure s'élève jusqu'au milieu des boules quand le tube de commu-



Transport de l'obélisque de Ptolémée Philadelphie à Alexandrie (page 216).

nication est horizontal. Les tubes supérieurs contiennent de l'alcool qui, plus léger, repose sur le mercure et monte jusqu'à une certaine hauteur, égale dans les deux tubes. Ceux-ci ont, entre eux, une échelle graduée de telle sorte qu'à une différence de niveau d'une division entre A et B

correspondre une inclinaison de l'appareil d'une minute d'angle. On fixe cet appareil de façon que le tube de communication soit parallèle à la quille du navire ; on constate alors facilement la différence du tirant d'eau à l'avant et à l'arrière.

## CHAPITRE VIII

### PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

**THÉORIE.** — Nous avons raconté (page 11) comment le hasard fit découvrir à Archimède son principe célèbre :

*Tout corps plongé dans un liquide perd une partie de son poids égale au poids du volume du liquide déplacé.*

Il serait plus correct de dire :

*Tout corps plongé dans un liquide est soumis à une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du liquide déplacé et appliquée au centre de gravité de la masse liquide.*

Mais, au fond, l'un et l'autre énoncé sont identiques, puisque, si l'on pèse le corps plongé dans le liquide, son poids sera évidemment diminué d'une quantité égale à la poussée.

Le raisonnement, aussi bien que l'expérience, démontre la vérité de ce principe.

En effet, soit un corps de forme quelconque, un cube, par exemple,

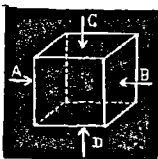


Fig. 98.

plongé dans un liquide (fig. 98). En vertu des principes que nous avons exposés (page 187), ce corps est soumis à des pressions verticales sur les surfaces A et B, qui se détruisent mutuellement, puisqu'elles s'exercent à la même profondeur ; il est soumis encore à deux pressions verticales, l'une de haut en bas C, égale au poids de la colonne d'eau ayant pour base la surface C et pour hauteur la distance entre cette surface et la surface libre du liquide ; l'autre de bas en haut D, égale au poids de la colonne d'eau ayant pour base la surface D et pour hauteur la distance entre cette surface D et la surface libre du liquide. La différence entre ces deux pressions est donc le poids du corps cubique immergé, cette différence est en plus à la pression verticale de bas en haut.

**DÉMONSTRATION PAR L'EXPÉRIENCE. BALANCE HYDROSTATIQUE. —** Cet appareil (*fig. 99*), imaginé par Galilée, se compose d'une balance ordinaire, dont le fléau peut s'élever ou s'abaisser à volonté au moyen d'un levier qui passe dans le support creux de l'instrument. A l'un des plateaux on suspend un cylindre creux en cuivre, et à celui-ci un autre cylindre plein, de même diamètre. On fait l'équilibre en plaçant des poids dans le second plateau de la balance. Si alors on laisse plonger dans un vase contenant de l'eau le cylindre plein, l'équilibre est aussitôt rompu; mais si ensuite on verse doucement de l'eau dans le cylindre creux, l'équilibre se rétablit peu à peu, le fléau de la balance devient parfaitement horizontal lorsque le cylindre plein est entièrement plongé dans l'eau et en même temps le cylindre creux rempli du liquide. Le cylindre plein a donc perdu une partie de son poids égale au volume de l'eau déplacée, puisque les cylindres sont de même volume.

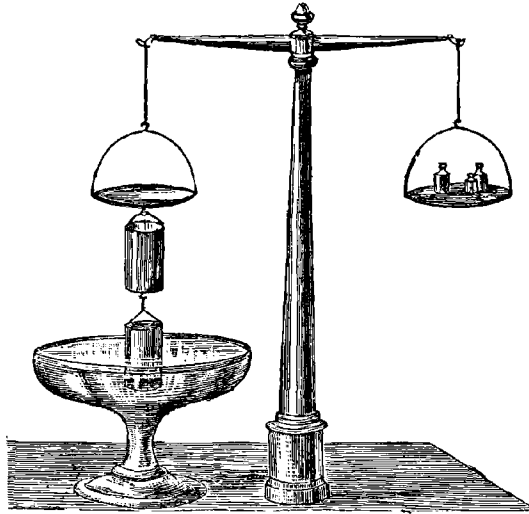


Fig. 99. — BALANCE HYDROSTATIQUE.

**CONSÉQUENCES DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE. — CORPS FLOTTANTS. —**

Un corps plongé dans un liquide est donc soumis à deux forces : l'une, égale à son poids, qui tend à le faire descendre ; l'autre, égale au poids du liquide déplacé, qui tend à le faire monter. Trois cas peuvent alors se présenter :

1° Si le poids du corps est plus grand que le poids du liquide déplacé, le corps tombera au fond du vase avec une force égale à la différence entre son poids et celui du liquide déplacé.

2° Si le poids du corps est égal au poids du liquide déplacé, le corps ne pourra ni s'élever, ni tomber, et flottera en équilibre au milieu du liquide.

3° Si le poids du corps est moindre que le poids du liquide déplacé, il remontera à la surface avec une force égale à la différence entre son poids et celui du liquide déplacé, sortira même du liquide jusqu'à ce que le poids du liquide déplacé soit égal au sien.

Un grand nombre d'expériences se font dans les cabinets de physique

pour démontrer ces faits. Dans un vase (*fig. 100*) on verse de l'eau ordinaire ; si l'on y place un œuf, il descendra au fond parce que son poids est plus grand que celui d'un volume d'eau ordinaire égal au sien.

Dans un second vase, on verse de l'eau salée ; l'œuf flottera à la surface, parce que son poids est moindre que celui d'un volume d'eau salée égal au sien.

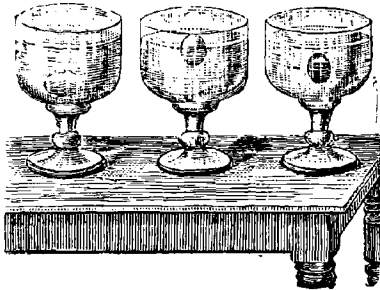


Fig. 100.

Dans un troisième vase à moitié plein d'eau salée, on verse avec précaution de l'eau ordinaire ; celle-ci se mélangera à l'eau salée dans les parties qui sont en contact ; l'œuf placé dans l'eau supérieure descendra, puis, après quelques oscillations, se tiendra en équilibre au milieu du mélange, là où son poids sera égal à celui d'un volume d'eau mélangée égal au sien.

Une autre expérience bien connue est celle du *ludion* (du latin *ludio*, faiseur de tours), ou *diable cartésien*.

Dans un vase de verre en partie plein d'eau (*fig. 101*), fermé par un cylindre de cuivre que traverse un piston, on place un petit globe de verre creux, portant une ouverture à sa partie inférieure. A ce globe est suspendu généralement un petit bonhomme en émail ou en une autre matière légère, destiné à rendre l'expérience plus récréative. D'abord le globe flotte sur l'eau ; le petit bonhomme seul est immergé ; mais, si l'on presse un peu sur le piston, l'air qui est au haut du vase se trouve comprimé, la pression se communique au liquide, puis à l'air et à l'eau qui sont dans le globe ; un peu d'eau y pénètre alors ; le poids du système augmente et, par suite, le *ludion* descend. Que l'on soulève le piston, la pression redevient ce qu'elle était, un peu d'eau sort du globe, le *ludion* remonte, puisqu'il devient plus léger. Quand, par hasard, le poids de l'appareil est exactement égal au poids du volume d'eau déplacé, il y a équilibre : le *ludion* flotte entre deux eaux.



Fig. 101. — LUDION.

Sans même se donner la peine de faire ces expériences de cabinet, les conséquences directes du principe d'Archimède, relatives aux corps plongés dans les liquides, peuvent être constatées dans les opérations journalières de la vie.

Que l'on prenne un seau vide et que l'on tâche de l'enfoncer dans

l'eau, en le maintenant droit, pour qu'il ne s'emplisse pas, la résistance opposée par le liquide sera excessive, parce que, le poids du seau étant moindre que celui du volume d'eau déplacé, la pression de bas en haut sera très forte. Si l'on le remplit d'eau à moitié, le seau flottera, parce qu'il aura acquis un poids égal à celui du volume d'eau déplacé. Si le seau est entièrement rempli, il tombera au fond parce que son poids sera supérieur à celui du volume d'eau déplacé.

Les anciens avaient observé, même avant Archimède, ce principe que celui-ci formula le premier; Aristote, dans ses *Météorologiques*, explique parfaitement que les eaux de la mer peuvent porter des navires plus grands que n'en portent les eaux douces, parce qu'elles sont salées c'est-à-dire plus lourdes; et, comme preuve à l'appui, il cite l'expérience des œufs que nous avons donnée.

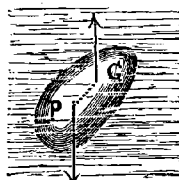


Fig. 102.

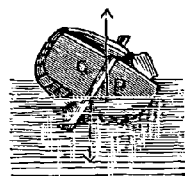


Fig. 103.

#### ÉQUILIBRE DES CORPS FLOTTANTS. —

Un corps flottant à la surface ou dans l'intérieur d'un liquide est soumis à deux conditions d'équilibre : la première, que nous venons de constater, est, que la pression de bas en haut du liquide sur le corps soit égale au poids de ce corps; la seconde, qui n'est pas moins nécessaire, est que le centre de gravité du corps soit directement contraire au *centre de poussée*, c'est-à-dire que le point où s'exerce l'action de pression de bas en haut et le centre de gravité soient sur une même verticale.

Pour les corps complètement immergés, le centre de pression doit encore être au-dessus du centre de gravité.

Pour les corps immergés seulement en partie, cette dernière condition n'existe pas.

En effet, si le centre de gravité n'était pas directement contraire au centre de poussée, ces deux forces formeraient un couple (page 68) et le corps tournerait sur lui-même, qu'il soit complètement immergé ou qu'il flotte à la surface.

Si, pour un corps complètement immergé (*fig. 102*), le centre de pression P n'était pas au-dessus du centre de gravité G, le corps tournerait sur lui-même pour placer le centre de gravité au-dessous.

Pour un corps sortant en partie du liquide, le centre de gravité est souvent au-dessous du centre de pression, mais cela n'est pas indispensable pour l'équilibre. En effet (*fig. 103*), considérons la partie inférieure d'un navire, par exemple; le centre de poussée P est bien au-dessous du centre de gravité G; mais, s'il vient à se déplacer et à prendre la position

penchée indiquée par la figure, on voit que les deux forces G et P tendent à ramener le corps à sa première position.

La recherche des conditions d'équilibre des corps flottants est du domaine de la *mécanique*; nous n'entrerons pas dans plus de détails. Nous ajouterons seulement que, plus le centre de gravité de ces corps est situé bas, plus il est facile de rétablir leur équilibre, s'il est troublé par quelque cause. C'est le principe fondamental des règles de l'*arrimage*, ou disposition des objets et du *lest* à bord des navires.

**APPLICATION DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS. — FLOTTEURS.** — La nature d'abord nous offre mille applications de ces principes; cependant Pline, comme les ignorants de nos jours, en énumérant les faits, ne sait que s'extasier sur ce qu'ils présentent de merveilleux à son esprit.

« O merveilles de la nature ! s'écrie-t-il. On sait que le plomb et le cuivre en masse s'enfoncent, et surnagent en feuilles; que les fardeaux se meuvent plus facilement dans l'eau; que la pierre de Scyros surnage sous un grand volume et qu'elle s'enfonce quand elle est réduite en fragments; que les cadavres récents vont au fond, qu'ils viennent plus tard à la surface; que les vases plongés dans l'eau ne sont pas plus faciles à retirer vides que pleins, etc., etc... »

Aujourd'hui nous désirons, tout en admirant, savoir pour quelles raisons, en vertu de quelles lois générales, les choses se passent ainsi.

Quand un poisson se tient immobile au milieu de l'eau, c'est que son poids est rigoureusement égal à celui du volume d'eau qu'il déplace; en d'autres termes, que la pression qu'il supporte de haut en bas est égale à celle de bas en haut, représentée par son propre poids. Veut-il monter à la surface pour happer les moucherons dont il se nourrit, veut-il descendre au fond de la rivière, il possède, dans l'intérieur de son corps, un organe appelé *vessie natatoire*, sorte de petit sac transparent, d'une extrême finesse, divisé en deux par un étranglement et plein d'air; à son gré, cette vessie augmente ou diminue de volume sans modifier son poids. La vessie plus grosse, son volume ainsi devenu plus grand, le poisson déplace une plus grande quantité d'eau : il monte; la vessie diminue : le poisson descend.

Quand nous nous baignons dans la mer ou dans un fleuve, nos pieds nus foulent sans y être blessés les cailloux et les graviers du rivage, tant que nous sommes presque entièrement plongés dans l'eau, parce que le poids de notre corps ne contre-balance pas exactement la pression de bas en haut et que celle-ci nous soulève quelque peu. Mais sortis de l'eau,

notre corps presse tout entier sur le sol, et les pierres nous font éprouver de la douleur.

Si, en tombant dans un cours d'eau ou dans la mer, l'homme qui ne sait pas nager se noie facilement, c'est surtout à son ignorance du principe d'Archimède, et ajoutons à son manque de sang-froid, qu'il faut attribuer son malheur. Le corps de l'homme vivant est à peu près du même poids que celui d'un égal volume d'eau; en général, il tend à flotter à la surface de ce liquide, surtout si c'est de l'eau de mer, plus lourde que l'eau douce. Il suffirait donc à la victime d'un accident de se tenir immobile, sur le dos, la face tournée du côté de l'air afin de respirer librement, pour pouvoir attendre facilement du secours. Mais, au lieu de cela, la personne tombée à l'eau tend à élever les bras, comme pour saisir un point d'appui et s'y accrocher. Or les bras ne perdant plus alors un poids égal au volume d'eau qu'ils déplaceraient, ce poids vient s'ajouter à celui de la tête, déjà beaucoup plus lourde chez l'homme que les autres parties du corps; celle-ci plonge, l'eau pénètre par la bouche dans la poitrine; le corps devient ainsi plus lourd que le volume d'eau déplacé, et il s'enfonce.

Les quadrupèdes ayant la tête plus légère que le reste du corps nagent naturellement, parce que leur tête reste facilement hors de l'eau. Les oiseaux aquatiques, les canards, les oies, les cygnes nagent à la surface des eaux, parce qu'une couche épaisse d'un duvet léger et imperméable recouvre la partie inférieure de leur corps et leur fait déplacer, pour une très faible immersion, un poids d'eau égal au leur. De même, les personnes d'un fort embonpoint ont plus de facilité pour nager que les personnes maigres.

Quand l'homme est asphyxié, son cadavre descend au fond de l'eau, ou plutôt, comme il est à peu près d'un poids égal à celui du volume d'eau déplacé, il flotte entre deux eaux. Au bout de quelques jours, les gaz provenant de la décomposition gonflent le cadavre, augmentent son volume sans changer notablement son poids: le corps remonte à la surface.

Sur le principe d'Archimède et la théorie des corps flottants sont basés ces appareils qui, sous le nom général de *flotteurs*, servent à indiquer le niveau de l'eau dans un réservoir, et aussi à produire certains effets quand ce niveau est descendu ou monté à un certain point.

Nous citerons d'abord le *flotteur indicateur*, imaginé en 1760 par l'ingénieur Brindley (1), et qui sert à indiquer le niveau de l'eau dans les

(1) BRINDLEY (James), mécanicien et ingénieur anglais (1716-1772). On lui doit la construction des canaux qui unissent les deux mers, celui de Bristol à Liverpool, la méthode de bâtir sans mortier des digues contre la mer, etc.

chaudières à vapeur. L'instrument se compose généralement (*fig. 104*) d'une boule creuse en fer flottant sur l'eau et presque entièrement équilibrée par une boule plus petite, de manière à plonger en partie dans l'eau et à s'élever ou à s'abaisser en même temps que le niveau de cette eau. Quand le niveau est élevé, la boule maintient fermée une soupape qui s'ouvre sur un tube à l'extrémité duquel est un timbre; quand le niveau baisse, la soupape s'ouvre, la vapeur s'élanche dans le tube et, frappant le biseau du timbre, fait entendre un bruit strident.

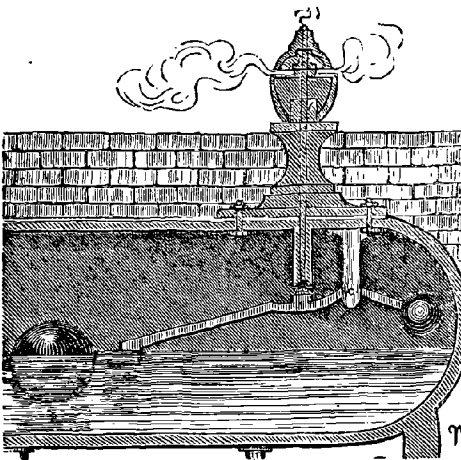


Fig. 104. — FLOTTEUR.

D'autres fois, le flotteur porte une tige qui sort de la chaudière et se meut en regard d'une échelle fixe; d'autres fois encore, il est suspendu à un fil métallique qui s'enroule sur une poulie extérieure et fait tourner une aiguille sur un cadran.

On a appliqué les flotteurs à régulariser automatiquement l'admission de la vapeur dans les machines. Le flotteur est placé dans un petit réservoir où l'eau entre et sort avec une vitesse calculée sur celle que doit avoir la machine elle-même. Si celle-ci va trop lentement,

le niveau de l'eau du réservoir baisse; si elle va trop vite, l'eau du réservoir augmente; dans l'un et l'autre cas, le flotteur, disposé comme le précédent, agit sur le robinet d'admission de la vapeur pour l'ouvrir davantage ou le fermer.

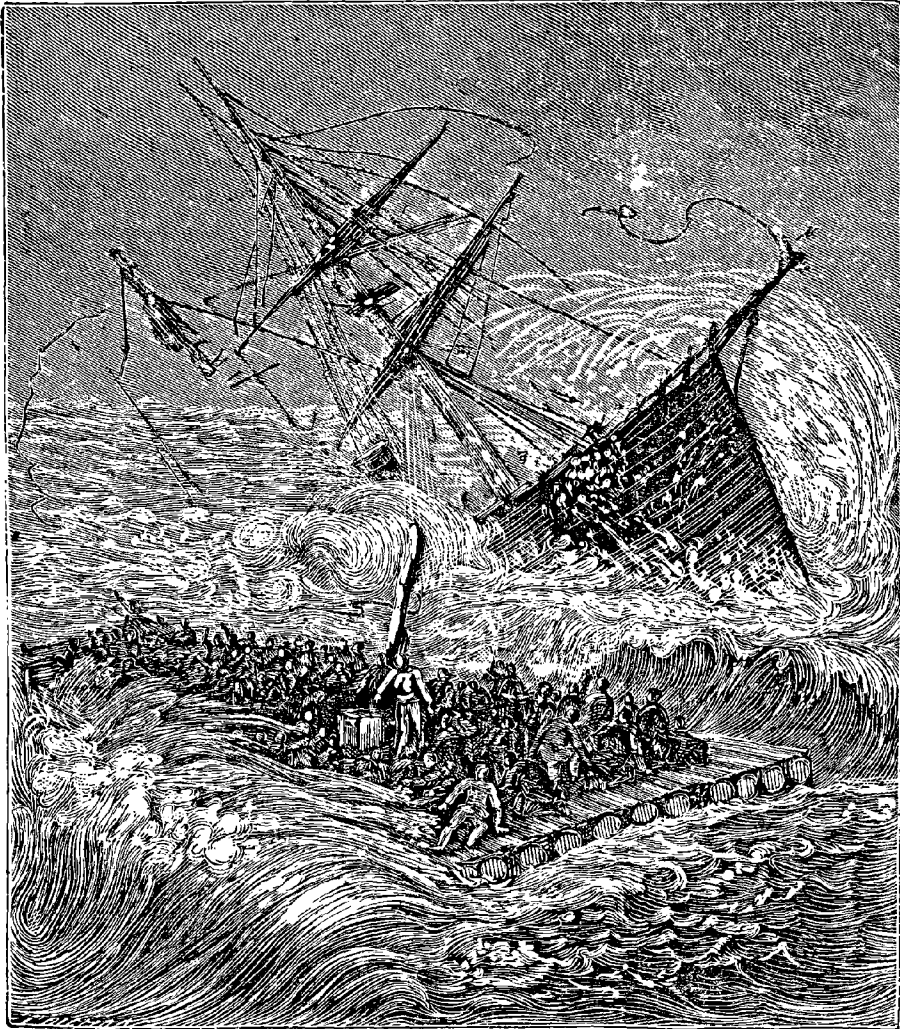
Dans les fabriques de sucre, on déverse les sirops sur les filtres au moyen de robinets s'ouvrant et se fermant d'eux-mêmes au moyen d'un *flotteur*, boule métallique encore, fixée par un levier à la clef du robinet, qu'elle ouvre de plus en plus à mesure que l'eau du bassin où elle flotte diminue.

Nous trouvons dans Pline le récit d'une application du principe d'Archimède par les Égyptiens :

« Ptolémée Philadelphie érigea à Alexandrie un obélisque de quatre-vingts coudées... C'était une opération bien plus difficile de le transporter et de le dresser que de le tailler... On amena par un canal le Nil jusqu'à l'obélisque couché; deux bateaux larges, portant, en blocs d'un pied de la même pierre que l'obélisque, un chargement double de sa masse et par conséquent de son poids, furent conduits sous le monument, qui



reposait par ses deux extrémités sur les deux rives du canal, puis on ôta les blocs de pierre : les deux bateaux se relevèrent et se chargèrent du fardeau qui leur était destiné... »



Emploi du radeau instantané du docteur Fontaine (page 219).

De nos jours encore, les Hollandais se servent d'un moyen identique pour introduire dans leurs ports des navires dont le tirant d'eau est trop fort pour remonter le fleuve.

La question si sérieusement et si ardemment étudiée de nos jours du

cuirassement des navires de guerre, de leur armement et de leur construction, repose surtout sur les principes que nous avons exposés. Il est encore bien difficile de tirer quelque conclusion des efforts faits dans des directions très diverses par les constructeurs des différents pays. Les qualités des principaux types de navires sont exclusives les unes des autres. Ici, on gagne en puissance défensive, on perd en vitesse et en maniabilité; là, on augmente la rapidité de marche, mais on diminue la protection et la puissance balistique. Après les navires entièrement blindés de plaques de 38 centimètres, comme la *Dévastation* française, on a imaginé les navires sans mâture, plongeant toute leur coque sous l'eau à la façon d'un flotteur et portant au-dessus de l'eau des tourelles blindées et portant des canons géants, comme la *Dévastation* anglaise ou l'*Inflexible*, le plus grand cuirassé actuel; puis les navires circulaires, comme le *Novgorod* de l'amiral Popoff, destiné à défendre l'entrée du Dniéper.

Il y a aussi les navires excentriques : le *bateau cachalot*, en forme de poisson à grosse tête, qui a sept mètres de long, dont la queue sert de gouvernail et dont le dos ne dépasse que d'un demi-pied le niveau de l'eau au point le plus saillant. Sa destination serait d'être sur les côtes, prêt à recevoir les naufragés. Il plonge à volonté, évitant ainsi l'obstacle du vent, peut être manœuvré par cinq hommes, à l'aide d'une hélice à bras, et file deux lieues à l'heure. Un autre se termine à l'avant et à l'arrière par deux longs tubes de fer, dont les bouts sont munis de fenêtres; point de quille, point d'éperon, point de nœud à flot, point de pont véritable, point de grément, point de voiles ni de mâts. Il a cinq mètres de largeur et 60 mètres de longueur. La partie non immergée est pareille à la partie immergée et, comme elle, cylindrique. Lucarnes rondes pour éclairer, galeries en fer à jour sur le milieu, pour servir de pont. L'intérieur possède quatre machines à haute pression, possédant trois fois plus de puissance que celles des paquebots ordinaires. Il est tout en fer et peut recevoir vingt passagers. Il s'appelle l'*Océan* et a été lancé à Baltimore.

Enfin sont venus ou viendront, car le secret de cette construction est encore gardé soigneusement, les navires torpilleurs sous-marins, construits de manière que l'équipage, enfermé dans une atmosphère comprimée, vienne chercher au besoin sa provision d'air en remontant à la surface et combatte sous l'eau. A l'avenir appartient de démontrer la supériorité de tel ou tel système.

Enfin, — quoique nous devions y revenir ci-après en parlant des applications de l'air comprimé, — nous dirons un mot des appareils de sauvetage, qui, tous, appliquent plus ou moins heureusement le principe d'Archimède. Le nombre de ces appareils est immense. Parmi les plus connus ou

du moins ceux qui ont, à leur apparition, inspiré le plus de confiance, nous citerons le *radeau* du capitaine Walter Urghart, composé de dix-neuf matelas de toile imperméable et contenant des copeaux de liège. Chaque matelas est muni d'un robinet destiné à introduire l'air, ce qui le rend plus léger et, en fait, en temps ordinaire, un coucher agréable pour l'équipage. Il est, en outre, pourvu de quatre boucles et de deux sangles, à l'effet de fixer ce matelas aux autres quand on veut faire le radeau. Ils se disposent comme les briques d'un mur. Par-dessus le tout est un plat-bord muni à l'arrière d'un gouvernail et d'une caisse contenant l'habitacle. Vers le tiers en avant est fixé et articulé un autre plat-bord en deux portions, formant la croix avec le premier. Au point de jonction est fixé un mât ; ce qui permet que le radeau, qui est gréé en *cutter*, puisse être facilement manœuvré. Chaque matelas peut porter 25 kilogrammes.

L'appareil de sauvetage imaginé par le docteur J.-A. Fontaine, et présenté, il y a quelques années, par M. l'amiral La Roncière Le Noury à la Commission de la Société centrale de sauvetage des naufragés, sous le nom de *radeau instantané*, est, sinon le dernier en date, du moins celui qui semble devoir jusqu'à présent approcher le plus près du but cherché.

Ce radeau, assez vaste pour porter tous les passagers d'un paquebot (de 400 à 600), ne nécessite aucune modification dans l'aménagement actuel des bateaux et ne prend pas de place sur le pont. Il fallait qu'il eût au moins 12 mètres de long sur 12 mètres de large, soit 144 mètres carrés de surface, soit un volume de 56 mètres cubes, et que son poids ne dépassât pas 28 tonnes. L'inventeur a ainsi réalisé ces conditions : Son vaste matelas en caoutchouc est formé d'une série de boudins que des clapets rendent indépendants les uns des autres ; on le roule sur lui-même et on l'accroche au-dessus du bordage comme une chaloupe. Pour gonfler, et, en une minute, cet énorme sac à air, il y a, dans la chambre de la machine, un récipient d'air comprimé, contenant 3 mètres cubes comprimés à 15 atmosphères, et maintenus toujours sous cette pression à l'aide de la pompe de compression du bateau. Ce réservoir est relié par un tuyau à un robinet-écrou qui termine le radeau. Le faut-il ; une équipe spéciale se précipite aux cordes qui retiennent le matelas et déroule celui-ci sur le flanc du bateau. Les traverses qui relient le tablier du radeau aux tubes sont solidarisées par une espagnolette qui se déplace par son poids et forme ainsi un plancher toile et bois suffisamment rigide. L'air afflue et emplit le sac ; on coupe les amarres ; il bascule et tombe à l'eau. Il n'y a plus qu'à s'embarquer.

Puisque nous en sommes aux bateaux de sauvetage, rappelons une

idée émise depuis longtemps et qui n'a pas, croyons-nous, été assez vulgarisée. Il s'agit d'empêcher ces catastrophes qui souvent terminent tragiquement les parties de canotage, en garnissant le bord extérieur des bateaux légers sur lesquels on vogue pour se récréer d'un tube de cuir recouvert de gutta-percha, bien fermé, rempli d'air et proportionnel aux dimensions de la barque. Certainement cette sorte de longue vessie, faisant le tour du bateau, s'opposerait, par sa difficulté à s'enfoncer dans l'eau, aux chavirements qui arrivent; elle pourrait même être assez forte pour empêcher l'embarcation de couler à fond ou de se renverser, dans le cas où elle serait complètement immergée.

Comme application singulière des principes relatifs aux *corps flottants*, nous citerons, en terminant, les *podoscaphes* (en hollandais *waterschoon*), espèces de bateaux-chaussures avec lesquels on peut courir sur l'eau, debout, avec une vitesse de deux lieues à l'heure sans se gêner, quand on connaît bien l'exercice de cette espèce de patinage, que le vent n'est pas contraire et que l'eau est tranquille. Chacun de ces sabots est en bois de sapin ou en lames de fer ou de cuivre; il a un peu moins de 5 mètres de longueur sur 25 centimètres de hauteur et est très étroit. Trois lattes sont fixées au milieu et disposées de manière à enfermer la jambe pour la maintenir à sa place et l'empêcher de glisser. On est porté sur l'eau par ces deux grands sabots, et, au moyen d'une longue perche de 4 mètres, terminée en palette à chacune de ses extrémités, on avance en exécutant dans l'eau le mouvement de la pagaie, qui est celui de l'hélice à son enfance. On se met à reculons pour aller vite; on n'est pas arrêté par les endroits qui n'ont qu'un tirant d'eau de dix pouces, et l'on évite facilement les obstacles. On fait en Hollande des régates à podoscaphes, et l'on voit des Hollandais excessivement habiles dans cet exercice de navigation bizarre.

#### DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES. —

La balance ne nous donne que le *poids relatif* d'un corps, c'est-à-dire le rapport de son *poids absolu* à un autre poids déterminé pris pour unité; mais il est souvent utile de connaître le poids qu'ont les différents corps de la nature sous un même volume. Ce rapport de son poids relatif, sous l'unité de volume, au poids d'un même volume d'un autre corps (l'eau distillée à 4°, pour les corps solides ou liquides; l'air atmosphérique, pour les corps gazeux) est ce qu'on appelle la *densité* ou le *poids spécifique* du corps.

Rigoureusement parlant, la *densité* est la *masse* d'un corps sous l'unité de volume, tandis que le *poids spécifique* est le *poids* du corps sous l'unité

de volume; mais ces deux nombres sont égaux en valeur absolue, puisque l'unité de poids ou kilogramme est précisément le poids de l'unité de volume d'eau, du litre d'eau. On confond donc dans le langage ces deux expressions.

La densité d'un corps variant avec sa température, on a coutume de considérer le corps dont on donne la densité comme étant à 0°.

Pour déterminer la densité des corps solides ou liquides, on emploie les deux méthodes suivantes : celle du *flacon à densité*, due à Klaproth (1), et celle de la *balance hydrostatique*, toutes les deux basées sur le principe d'Archimède.

1° *Méthode du flacon à densité.* — Soit à connaître la densité du cuivre. Je pèse un morceau de ce corps avec une balance de précision, et je trouve que son poids est de 21<sup>k</sup>,975. Je prends alors un large flacon, dont le bouchon en verre, percé d'un trou à son extrémité, permet de le remplir bien exactement d'eau distillée à 4° (*fig. 105*). Plaçant ce flacon débouché sur le plateau de la balance, je lui fais équilibre avec une tare. J'introduis alors le morceau de cuivre dans l'eau ; une certaine quantité de liquide déborde, dont le volume est égal au volume du morceau de cuivre. J'essuie le flacon, je le remets sur la balance; pour rétablir l'équilibre, je suis forcé de placer des poids sur l'autre plateau, 2<sup>k</sup>,5, qui sont le poids du volume d'eau égal au volume du morceau de cuivre. La densité du cuivre est donc  $\frac{21,975}{2,5} = 8^k,790$ , puisque, à volumes égaux, les densités des deux corps sont, d'après la définition, proportionnelles aux poids.

Pour les corps liquides, on se sert d'un flacon ayant la forme d'une cuvette de thermomètre et réunie par un tube capillaire à un tube entonnoir qui ferme avec un bouchon à l'émeri (*fig. 106*). Ce flacon, maintenu habituellement sur un petit support pour qu'il puisse rester vertical, est placé dans le plateau d'une balance et équilibré par une tare. On le remplit alors du liquide dont on veut connaître la densité, soit de l'éther, jusqu'à un point de repère tracé sur le verre, à moitié environ du tube capillaire, puis on le pèse. Le poids de l'éther est de 5<sup>gr</sup>,888. On pèse

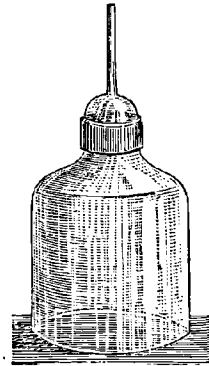


Fig. 105.

FLACON A DENSITÉ  
pour les solides.

(1) KLAPROTH (Martin-Henri), chimiste, né à Berlin en 1743, mort en 1817. On lui doit la découverte de deux corps simples, l'*uranium* et le *zircon*. Il est connu surtout par ses travaux minéralogiques.

ensuite avec le flacon plein d'eau distillée à 4°. L'eau pèse 8<sup>gr</sup>. La densité de l'éther est donc  $\frac{5,888}{8} = 0^{\text{gr}},736$ .

Cette méthode du flacon est susceptible d'une grande précision ; mais il faut l'exécuter avec précaution, avoir soin de plonger avant l'expérience le flacon de liquide dans la glace fondante afin que la température soit bien à 0°, laisser un excès de liquide après le remplissage, puis presser avec le bouchon pour qu'il soit bien comprimé jusqu'à l'affleurement.



Fig. 106.

FLACON  
A DENSITÉ  
pour  
les liquides.

2° *Méthode de la balance hydrostatique.* — Au plateau de la balance hydrostatique que nous avons décrite ci-dessus, on suspend par un fil très délié le corps solide dont on veut connaître la densité. Prenons encore le cuivre. On en détermine le poids, il pèse 21<sup>k</sup>,975. On le fait ensuite plonger dans l'eau : l'équilibre est rompu et il faut ajouter au plateau auquel est suspendu le morceau de cuivre 2<sup>k</sup>,5 pour le rétablir. Toujours en vertu du principe d'Archimède, la densité du cuivre est  $\frac{21,975}{2,5} = 8^{\text{k}},790$ .

S'il s'agit de déterminer la densité d'un corps liquide, de l'éther, comme tout à l'heure, on suspend au plateau de la balance hydrostatique une boule de verre, en général, parce que le verre est attaqué par un très petit nombre de liquides, et on fait la tare. On fait alors plonger cette boule dans l'éther ; l'équilibre est rompu, il faut ajouter au même plateau un poids de 5<sup>gr</sup>,888. On recommence la même opération dans l'eau, il faut ajouter au plateau 8 grammes. La densité de l'éther est donc  $\frac{5,888}{8} = 0^{\text{gr}},736$ .

*Remarque.* — Pour les corps solubles dans l'eau, on choisit un autre corps que l'eau pour faire l'expérience, et l'on a sa densité par rapport à l'eau en multipliant ensuite la densité trouvée par celle du liquide employé. Quand les corps sont très poreux, on les vernit légèrement ; quand ils sont moins lourds que l'eau, on les leste avec un corps dont la densité est connue et l'on déduit ensuite ce poids dans les calculs.

La connaissance des densités étant d'une utilité journalière, nous donnons ci-après le tableau des densités des principaux corps solides et liquides. Par exemple, les naturalistes, les chimistes s'en servent pour déterminer les espèces minérales ; les joailliers les emploient pour reconnaître les pierres précieuses ; souvent la constatation de la densité d'une substance permet de s'assurer, jusqu'à un certain point, de sa pureté.

TABLEAU DES POIDS SPÉCIFIQUES

NOMS DES CORPS.	POIDS SPÉCIFIQUE.	NOMS DES CORPS.	POIDS SPÉCIFIQUE.
<b>CORPS SOLIDES</b>			
Acier fondu, recuit.....	7,825	Graisse de porc.....	0,937
Acier trempé au rouge.....	7,820	Gomme adragante.....	1,316
Albâtre.....	2,700	Gomme sandaracue.....	1,092
Alliage des monnaies (argent)...	10,296	Gutta-percha.....	0,966
Aluminium fondu.....	2,560	Gypse.....	2,200
Alun.....	1,900	Houille.....	1,300
Ambre.....	1,100	Iode.....	4,950
Amiante.....	2,800	Ivoires.....	1,917
Antimoine.....	6,739	Jaspe.....	2,600
Ardoise.....	2,900	Kaolin.....	2,200
Argent fondu.....	10,489	Lapis-lazuli.....	3,000
Arsenic.....	5,630	Laine.....	1,614
Asphalte.....	1,063	Lin.....	1,792
Basalte.....	2,900	Manganèse.....	8,010
Benjoin.....	1,092	Malachite.....	3,320
Beurre.....	0,942	Marbre statuaire.....	2,710
Bismuth.....	9,822	Mica.....	2,900
Bronze.....	8,950	Nickel fondu.....	8,280
Calcaire lithographique.....	2,660	Nitre.....	1,930
Caoutchouc.....	0,939	Opale.....	2,000
Cires.....	0,983	Or fondu.....	19,260
Colophane.....	1,070	Os.....	1,800
Corail.....	2,680	Perles.....	2,700
Coton.....	1,949	Phosphore blanc.....	1,830
Cristal.....	3,330	Phosphore rouge.....	1,960
Cuivre fondu.....	8,790	Platine.....	21,150
Diamant du Brésil.....	3,524	Plomb.....	11,350
Émeraude.....	2,700	Porcelaine de Sévres.....	2,242
Étain fondu.....	7,298	Porcelaine de Chine.....	2,384
Fécule.....	1,502	Porcelaine de Saxe.....	2,493
Feldspath.....	2,600	Quartz.....	2,655
Fer fondu.....	7,200	Rubis oriental.....	4,023
Fer forgé en barres.....	7,628	Soufre octaédrique.....	2,070
Granit.....	2,700	Soufre prismatique.....	1,970
Graphite.....	2,200	Talc.....	2,710
Grenat du Brésil.....	4,153	Topaze du Brésil.....	3,510
Grès.....	2,600	Turquoise orientale.....	2,600
Graisse de mouton.....	0,924	Zinc.....	7,190
<b>CORPS LIQUIDES</b>			
Acide azotique fumant.....	1,52	Essence de menthe.....	0,9155
Acide cyanhydrique à 18°.....	0,697	Essence de moutarde.....	1,015
Acide formique.....	1,235	Essence d'orange.....	0,835
Acide lactique concentré.....	1,22	Essence de poivre noir.....	0,86
Acide oléique.....	0,893	Essence de reine-des-prés.....	1,173
Acide sulfhydrique liquéfié.....	0,91	Essence de romarin.....	0,9118
Acide sulfureux liquéfié.....	1,491	Essence de rose.....	0,832
Acide sulfurique monohydraté.....	1,854	Essence de rue.....	0,837
Alcool absolu à 0°.....	0,81309	Essence de térébenthine.....	0,871
Alcool amylique.....	0,82705	Essence de thym.....	0,87
Alcool butylique à 18°.....	0,803	Éther.....	0,736
Amylamine.....	0,750	Éther camphorique.....	1,029
Amylglycol.....	0,987	Éther sulfhydrique.....	0,825
Aniline, cyanol.....	1,028	Glycérine.....	1,280
Bichlorure de carbone.....	1,630	Huile de baleine filtrée à 15°.....	0,9240
Bichlorure d'étain.....	2,26712	Huile de cachalot à 15°.....	0,8840
Bisulfure d'hydrogène.....	1,769	Huile de chènevis à 15°.....	0,9270
Benzine.....	0,85	Huile de colza d'été à 15°.....	0,9167
Brome.....	3,13718	Huile de colza d'hiver à 15°.....	0,9147
Chloral.....	1,508	Huile de coton à 15°.....	0,9306
Chlore liquide.....	1,33	Huile de lin à 15°.....	0,9350
Chloroforme.....	1,49	Huile d'œillette à 15°.....	0,9253
Coniue.....	0,89	Huile d'olive à 15°.....	0,9170
Créosote.....	1,037	Huile de pied de bœuf à 15°.....	0,9160
Eau de mer.....	1,0268	Lait d'ânesse.....	1,0355
Esprit de bois.....	0,821	Lait de brebis.....	1,0409
Essence d'absinthe.....	0,973	Lait de chèvre.....	1,0341
Essence d'amandes amères.....	1,043	Lait de femme.....	1,0203
Essence de bergamote.....	0,850	Lait de jument.....	1,0346
Essence de cannelle.....	1,010	Lait de vache.....	1,0324
Essence de citron.....	0,847	Mercurc.....	13,596
Essence de cumin.....	0,969	Naphte (pétrole distillé).....	0,847
Essence de genièvre.....	0,849	Nicotine.....	1,024
Essence de girofle.....	0,92	Sulfure de carbone.....	1,293

*Volume et densité de l'eau pure à diverses températures.*

TEMPÉRATURE.	VOLUME.	POIDS SPÉCIFIQUE.	TEMPÉRATURE.	VOLUME.	POIDS SPÉCIFIQUE.
0°.....	1,000119	0,999881	50°.....	1,012089	0,988035
4°.....	1,000000	1,000000	60°.....	1,017258	0,983034
10°.....	1,000257	0,999743	70°.....	1,023134	0,977396
20°.....	1,001741	0,998252	80°.....	1,029491	0,971351
30°.....	1,004053	0,995961	90°.....	1,036361	0,964914
40°.....	1,007619	0,992438	100°.....	1,043203	0,958586

**ARÉOMÈTRES.** — Pour déterminer la densité des corps, on se sert aussi des *aréomètres* (du grec *araios*, peu dense; *metron* mesure), instruments connus dès l'antiquité, imaginés peut-être par Archimède, et dont nous avons parlé, en en attribuant, avec un grand nombre d'historiens, l'invention à Hypatie (page 13); mais, sans contredit, ces appareils si précieux doivent leur forme actuelle à un physicien moderne, Homberg (1).

Ces instruments sont de deux sortes : les *aréomètres à volume constant et à poids variable*, employés pour déterminer spécialement les poids spécifiques des corps, et les *aréomètres à poids constant et à volume variable*, et qui sont destinés, non pas précisément à donner le poids spécifique d'un liquide, mais à indiquer si ce liquide est plus ou moins concentré, plus ou moins riche en principes constitutifs.

**ARÉOMÈTRES A VOLUME CONSTANT ET A POIDS VARIABLE.** — On se sert pour les solides de l'*aréomètre* ou *balance de Nicholson* (2), perfectionné par Guyton de Morveau, qui lui a donné le nom de *gravimètre*. Cet appareil (*fig. 107*) se compose d'un cylindre en cuivre ou en fer-blanc, C, terminé à chaque extrémité par un cône. Le cône inférieur soutient

(1) HOMBERG (Guillaume), célèbre chimiste, né en 1652 à Batavia, d'une famille saxonne, dont le chef était officier au service de la compagnie hollandaise des Indes-Orientales, mort à Paris en 1715. Revenu en Europe étant très jeune, il fut avocat à Magdebourg où il se lia avec l'inventeur de la machine pneumatique, Otto de Guericke. Appelé en France par Colbert, il entra à l'Académie des sciences, et fut le professeur de physique et le premier médecin de Philippe, duc d'Orléans, qui devint le Régent. Homberg s'est fait connaître par les perfectionnements qu'il apporta à la machine pneumatique et à la fabrication du phosphore, récemment découvert par Kunckel (1668), par l'invention d'un nouveau microscope, des aréomètres et par ses expériences mémorables sur la fusibilité et la volatilité des métaux. Il s'était converti au catholicisme pour rester à Paris après la révocation de l'édit de Nantes. A cinquante-six ans, il épousa la fille du médecin Dodart, laquelle l'aida dans ses travaux.

(2) NICHOLSON (William), savant anglais (1753-1815), est connu comme physicien et comme chimiste par ses nombreuses expériences qui, d'ailleurs, le ruinèrent et le menèrent à la prison pour dettes. Il a rédigé un *Journal de philosophie naturelle, de science et d'art*, que l'on consulte encore et dans lequel il rendait compte des événements qui se passaient dans le monde savant.



un petit récipient R muni d'un couvercle métallique grillé, que l'on abaisse quand l'objet considéré est plus léger que l'eau, et au-dessous duquel s'accroche une boule pour lester l'appareil. Le cône supérieur



GAY-LUSSAC.

porte une tige sur laquelle est gravé un trait, *a*, appelé *point d'affleurement* ; l'extrémité de la tige soutient un plateau P. L'appareil plonge dans l'eau distillée.

Pour connaître la densité d'un corps, soit du platine, au moyen de

cet aréomètre, on place sur le plateau P des poids en nombre suffisant pour que l'appareil plonge jusqu'au point d'affleurement  $a$ , soit

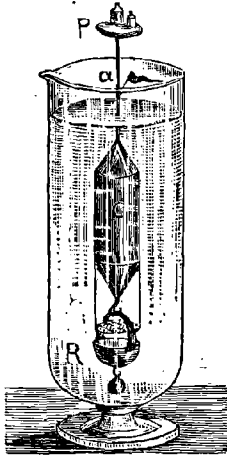


Fig. 107.

BALANCE NICHOLSON

250 grammes. On remplace alors les poids par le morceau de platine, et l'on ajoute des poids pour obtenir de nouveau l'affleurement; il ne faut que 140 grammes. Le poids du morceau de platine est donc  $250 - 140 = 110$  grammes. Le platine est alors transporté dans le petit récipient R; comme il n'y a plus de poids sur le plateau, l'instrument se soulève; on rétablit encore l'affleurement en mettant  $5^{\text{sr}}, 2$  sur le plateau. C'est le poids du volume d'eau égal à celui du morceau de platine. La densité du platine est donc  $\frac{110}{5,2} = 21,15$ .

Le physicien Fahrenheit (1) inventa, pour déterminer la densité des liquides, l'*aréomètre* qui porte son nom. Ce fut même lui, dit-on, l'inventeur de ce genre d'instruments; Nicholson ne fit que l'approprier à la détermination des solides. L'appareil consiste en un cylindre de verre ou d'argent (*fig. 108*), lesté à sa partie inférieure par une petite boule pleine de mercure et surmonté d'une tige, ayant un *repère d'affleurement* et soutenant le plateau pour les poids.

Veut-on déterminer la densité d'un liquide, du chloroforme, par exemple; on procède ainsi: on pèse l'aréomètre, et l'on trouve  $46^{\text{sr}}, 343$ . On le plonge ensuite dans le chloroforme, et, pour le faire plonger jusqu'au point d'affleurement, on charge le plateau de  $29^{\text{sr}}, 4086$ .

Le poids d'un volume de chloroforme égal à celui de l'instrument est donc

$$46^{\text{sr}}, 343 + 29^{\text{sr}}, 4086 = 75^{\text{sr}}, 7516.$$

On plonge alors l'aréomètre dans de l'eau distillée, et, pour le faire descendre jusqu'au point d'affleurement, il faut sur le plateau  $4^{\text{sr}}, 497$ . Le poids d'un volume d'eau égal à celui de l'instrument est donc  $46^{\text{sr}}, 343 + 4^{\text{sr}}, 497 = 50^{\text{sr}}, 840$ . En conséquence, la densité du chloroforme est de  $\frac{75,7516}{50,840} = 1,49$ .

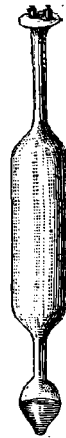


Fig. 108.

ARÉOMÈTRE  
DE  
FAHRENHEIT.

(1) FAHRENHEIT (Daniel-Gabriel), né à Dantzig en 1690, mort en 1740; abandonna le commerce pour se livrer à la fabrication des thermomètres. S'étant lié à Liège avec 'S Gravesande, il se fixa en Hollande, où il inventa le thermomètre et l'aréomètre qui portent son nom.

**ARÉOMÈTRES A POIDS CONSTANT ET A VOLUME VARIABLE.** — Ces instruments, excessivement utiles dans le commerce et l'industrie, sont destinés particulièrement à se servir du principe d'Archimède pour déterminer la composition de certains mélanges liquides, pour connaître, par exemple, la quantité d'eau que renferme un alcool, la quantité de sucre dans un sirop, de sel dans une dissolution saline, d'eau dans du lait, etc. Ils ont tous à peu près la même forme et la même grandeur, de 20 à 25 centimètres (*fig. 109*); c'est un cylindre en verre creux, quelquefois en un métal peu altérable, tel que l'argent, le maillechort ou le cuivre, d'un diamètre d'autant plus petit que l'on veut donner plus de sensibilité à l'appareil et portant à la partie inférieure une boule dans laquelle se trouve du mercure ou de la grenaille de plomb.

Ce cylindre est surmonté d'une tige en verre; tantôt cette tige est creuse et porte une échelle dans son intérieur; tantôt, et cela vaut mieux, surtout pour les observations précises, la division est faite, à l'acide fluorhydrique, sur la tige elle-même. Ils ne diffèrent entre eux, selon l'usage auquel ils sont destinés, que par la graduation. Le poids de l'appareil étant invariable, c'est-à-dire que si, dans des liquides de même densité, ils marquent le même degré, il suffit, pour vérifier la densité d'un liquide, de plonger dedans l'aréomètre et de voir s'il s'enfonce autant qu'il doit s'enfoncer quand le liquide est pur, c'est-à-dire jusqu'à un point de repère marqué sur l'appareil.

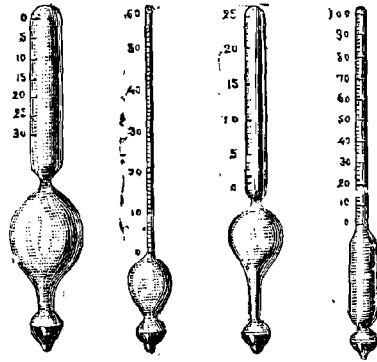


Fig. 109. — ARÉOMÈTRES.

Le plus souvent, ils ne servent qu'à donner une indication toute particulière. Ainsi, on sait que le *pèse-sirop* doit s'enfoncer dans un sirop ordinaire chaud jusqu'au 35° degré de l'instrument quand il y a la quantité de sucre nécessaire; s'il s'enfonce jusqu'au 38° il y en a trop; jusqu'au 32°, il n'y en a pas assez; quand il s'enfonce jusqu'au 25°, on sait qu'il est temps de le filtrer.

Le plus souvent, ils ne servent qu'à donner une indication toute particulière. Ainsi, on sait que le *pèse-sirop* doit s'enfoncer dans un sirop ordinaire chaud jusqu'au 35° degré de l'instrument quand il y a la quantité de sucre nécessaire; s'il s'enfonce jusqu'au 38° il y en a trop; jusqu'au 32°, il n'y en a pas assez; quand il s'enfonce jusqu'au 25°, on sait qu'il est temps de le filtrer.

Autre exemple : l'aréomètre marquant 3° dans l'eau de mer, si l'on veut faire chez soi un bain artificiel d'eau salée, il faudra mettre du sel dans l'eau de la baignoire jusqu'à ce que le *pèse-sel* plonge dans le liquide jusqu'à sa 3° division.

Les plus connus de ces instruments sont les *aréomètres de Baumé* (1),

(1) BAUMÉ (Antoine), né à Senlis en 1728, mort en 1804, pharmacien à Paris, s'occupait avec

appelés aussi *pèse-sel*, *pèse-acide*, *pèse-sirop*, *pèse-vinaigre*, *pèse-lait*, destinés aux liquides plus denses que l'eau et construits de façon que, plongés dans l'eau pure à la température de 12°, ils s'affleurent à peu près vers le haut de la tige en un point marqué zéro. On a marqué 15 au point où affleure l'appareil plongé dans une dissolution de 15 parties de sel dans 85 parties d'eau, et l'intervalle a été partagé en 15 divisions; on gradue ainsi tout le tube jusqu'au degré 66 généralement, qui correspond à la densité de l'acide sulfurique, la plus grande de celles qu'ordinairement on peut avoir à déterminer. Les aréomètres de Baumé appelés *vèse-liqueur* ou *pèse-éther*, pour les liquides moins denses que l'eau, marquent 10°, vers le bas de la tige, le point d'affleurement dans l'eau, et le zéro correspond à un point d'affleurement dans une dissolution de sel dans 90 parties d'eau.

Pour les alcools, le nombre des degrés est emprunté à l'échelle du pèse-liqueur de Baumé ou plutôt à celui d'un instrument qui n'en est qu'une modification peu importante et qui porte le nom de Cartier. Le degré 10 de l'échelle de Cartier est le même que celui de Baumé, et le 29° de Cartier correspond au 31° de Baumé.

Gay-Lussac (1) a construit en 1824 un aréomètre, spécialement pour les alcools, que l'on préfère généralement aux aréomètres de Baumé, et qui porte le nom d'*alcoomètre* ou *alcoomètre centésimal*. De même forme que les autres aréomètres, il affleure vers le haut de sa tige dans l'alcool pur, et en ce point l'on marque 100°. On a gradué le reste du tube en marquant 95°, 90°, 85°, 80°, etc., aux points où l'aréomètre affleurerait dans un mélange successif de 95 parties d'alcool pour 5 parties d'eau, 90 parties d'alcool pour 10 parties d'eau, 85 parties d'alcool pour 15 parties d'eau, etc. Le chiffre marqué en regard du point où s'enfonce l'instrument dans un alcool indique ainsi le nombre de parties d'alcool qu'il y a dans 100 parties du mélange. Cet instrument est officiellement adopté en France pour la vérification des alcools et des liqueurs alcooliques. L'Allemagne emploie celui de Tralles, qui n'est pas autre chose que celui de Gay-Lussac, autrement gradué.

Cependant, comme on se sert très souvent, quoique abusivement, de

succès de chimie et de physique et devint membre de l'Académie des sciences. Il inventa de nombreux procédés de dorure et de teinture, parvint à rendre les thermomètres comparables, etc. Il a écrit des ouvrages de physique et de chimie qui ne sont plus au courant de la science.

(1) GAY-LUSSAC (Louis-Joseph), né en 1778 à Saint-Léonard (Haute-Vienne), mort en 1850. Élève de l'École polytechnique, puis des ponts et chaussées, il devint dès lors l'ami de son professeur, le célèbre Berthollet. Membre de l'Académie des sciences en 1806, professeur de physique au Collège de France, professeur de chimie à la Faculté des sciences et au Jardin des plantes; député en 1831; pair de France en 1839. Ses travaux en physique et en chimie sont immenses. Nous rencontrerons son nom à chaque page dans cet ouvrage.

l'aréomètre Cartier, nous donnons un tableau indiquant la correspondance de ces deux instruments pour les divers alcools du commerce.

*Remarques.* Il faut remarquer : 1° que les indications de l'alcoomètre centésimal se rapportent à la température de 15°; lorsque, ce qui arrive presque toujours, on observe à une autre température, il faut rectifier le degré marqué à l'aide de tables qui ont été dressées par Gay-Lussac.

DÉSIGNATION.	CARTIER.	GAY-LUSSAC.	DENSITÉ.
Eau-de-vie faible.....	16°	37°,9	0,957
Id. ....	17°	42°,5	0,949
Id. ....	18°	46°,5	0,943
Eau-de-vie ordinaire (preuve de Hollande)....	19°	50°,1	0,936
Id. ....	20°	53°,4	0,930
Eau-de-vie forte.....	21°	56°,5	0,924
Id. ....	22°	59°,2	0,918
Esprit trois-cinq.....	29°,5	78°,0	0,869
Esprit trois-six.....	33°	85°,1	0,851
Esprit trois-sept.....	35°	88°,5	0,840
Esprit rectifié.....	36°	90°,2	0,835
Esprit trois-huit.....	37°,5	92°,5	0,826
Alcool à 40°.....	40°	95°,9	0,814
Alcool absolu.....	44°,10	100°,0	0,794

2° L'échelle de l'alcoomètre ayant été construite avec des mélanges d'alcool et d'eau, l'instrument ne peut servir que pour ces mélanges. Si l'on veut connaître la quantité d'alcool contenu dans un autre mélange, dans du vin, par exemple, il faut le distiller et n'agir ainsi que sur l'alcool et l'eau. Il en est de même d'ailleurs pour tous les aréomètres. Ainsi, avec le *pèse-lait*, on peut savoir la quantité d'eau mise dans le lait, mais on ne peut savoir si la soustraction de la crème, opération qui augmente la densité du liquide n'a pas été compensée par l'addition de l'eau qui produit un effet contraire, ou si le peu de densité du liquide n'est pas dû à l'infériorité du lait fourni par la vache elle-même.

3° Pour que ces instruments si utiles puissent donner des renseignements exacts, il faut que le volume total des deux réservoirs d'air soit en rapport avec la longueur de la tige et que celle-ci soit bien calibrée; il faut encore qu'ils soient aussi parfaitement centrés que possible, c'est-à-dire qu'ils aient toutes leurs parties symétriquement placées relativement à tous les points de leur axe. Malheureusement, ces conditions ne peuvent être réunies que par une construction très soignée, et c'est ce qui explique pourquoi les aréomètres à bon marché, qui sont ceux dont le commerce vulgaire est inondé, ne sont presque jamais justes. Un journal signalait dernièrement au public ces aréomètres inexacts, et, parlant des soins minutieux qu'exige la construction de ces appareils, il montrait qu'il est impossible que ceux destinés à la vente à bon marché offrent la moindre garantie; ils sont livrés aux détaillants à raison de 2 à 4 francs la douzaine, et même moins, et l'on n'en peut faire douze de bons dans un jour. Il faut remarquer que ces mauvais instruments ne portent jamais le nom du fabricant; ils sont vendus sans nom d'auteur, ou, s'ils portent un nom,

c'est celui du marchand. Il serait à désirer que les aréomètres, servant dans le commerce de véritables balances, fussent revêtus de l'estampille officielle avant d'être mis en circulation.

## CHAPITRE IX

### PHÉNOMÈNES EN CONTRADICTION

#### AVEC LES PRINCIPES PRÉCÉDENTS

**EXCEPTIONS APPARENTES AU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.** — Des faits de chaque jour semblent être en contradiction avec le principe d'Archimède, dont la conséquence immédiate est qu'un corps ne saurait flotter à la surface d'un liquide s'il n'est d'une densité plus faible que ce liquide lui-même. Ainsi, des aiguilles d'acier très fines, placées sur la surface de



Fig. 110. — HYDROMÈTRE.

l'eau avec précaution, flotteront ; ainsi plusieurs insectes, entre autres celui que l'on appelle *hydromètre* ou *arpeuteuse*, courent sur les mares sans pénétrer le moins du monde dans l'eau (fig. 110).

Ce phénomène tient à l'extrême légèreté de ces corps. La force avec laquelle ils agissent sur les molécules liquides n'est pas suffisante pour vaincre leur cohésion mutuelle ; elles ne se séparent pas, et autour du corps se forme une dépression, que facilement on peut constater en observant l'ombre portée par le corps de l'insecte, par exemple, quand le soleil l'éclaire. Cette ombre est bordée de bandes lumineuses, dues à la réfraction de la lumière dans la portion du liquide déprimée et qui forme ainsi une surface concave.

**CAPILLARITÉ.** — Les conditions d'équilibre des liquides que nous avons démontrées présentent cependant des exceptions remarquables lorsque les liquides sont enfermés dans des vases très étroits, dits *capillaires* (du latin *capillus*, cheveu), ou lorsqu'on considère la portion du liquide qui

touche immédiatement les bords d'un vase, quel qu'en soit le diamètre.

Les phénomènes de *capillarité* paraissent avoir absolument échappé aux anciens. Jusqu'au xvii<sup>e</sup> siècle, on les ignora; Pascal lui-même n'en parle pas. Borelli (1) le premier, en 1638, appela l'attention sur l'ascension des liquides dans les tubes capillaires; il en expliquait les phénomènes par l'effet d'une espèce de réseau de petits leviers mobiles formé au-dessus de l'eau. Hooke et Bernoulli (2) les attribuèrent à la différence de pression exercée par l'air sur la surface de l'eau dans laquelle le tube est plongé. Newton en indiqua la véritable cause dans l'attraction moléculaire; Carrée (3), Jurin (4), Clairaut (5), Laplace, Young (6), Gay-Lussac, Poisson (7) s'en occupèrent particulièrement, pour en constater les lois et pour en trouver la formule mathématique.

Ces relations d'affinité et autres des molécules des corps et surtout des liquides à de très petites distances sont encore d'ailleurs imparfaitement connues. La théorie capillaire de Laplace a été bien souvent attaquée. Peut-être l'étude de la capillarité donnera-t-elle le lien entre la physique et la chimie, et entre ces deux sciences et celle de l'organisme;

(1) BORELLI (Jean-Alphonse), médecin et physicien de Pise (1608-1679), tenta d'appliquer aux phénomènes de la vie les mathématiques et la mécanique, et y réussit pour le système musculaire et le mouvement des os.

(2) BERNOULLI (Jacques), mathématicien de Bâle (1654-1705), fit d'importantes découvertes en mathématiques et eut l'honneur d'être nommé associé de l'Académie de Paris. Son frère, Jean BERNOULLI (1667-1748), comme lui profond géomètre, et son neveu, Daniel BERNOULLI (1700-1782), médecin et mathématicien savant, s'occupèrent aussi de physique et furent membres de l'Académie des sciences de Paris.

(3) CARRÉE (Louis), fils d'un paysan (1663-1711), envoyé à Paris par son père pour entrer dans la prêtrise, préféra devenir un savant mathématicien, et entra, comme secrétaire, chez Malebranche. Il ne fut guère capable de trouver de nouveaux principes, mais il fut un des premiers et des plus intelligents vulgarisateurs, exécutant d'abord lui-même les expériences qu'il démontrait.

(4) JURIN (James), médecin et mathématicien anglais (1684-1750), secrétaire de la Société royale de Londres, président du Collège des médecins. Le premier, il appliqua les mathématiques et la physique à l'étude des maladies humaines et fut un de ceux qui s'occupèrent le plus, à son époque, de chercher les lois des phénomènes météorologiques.

(5) CLAIRAUT (Alexis-Claude), né à Paris (1713-1765), fils d'un professeur de mathématiques, témoigna de bonne heure d'une telle vocation pour les sciences, que ses travaux le firent recevoir à l'Académie des sciences dès l'âge de dix-huit ans. Il fut un des savants qui furent envoyés en Laponie pour mesurer l'arc du méridien. Il eut de vives discussions avec d'Alembert. Très lié avec Maupertuis, il eut des disciples fameux, entre autres Bailly et M<sup>me</sup> Du Chastelet. Il a laissé de nombreux ouvrages sur les mathématiques et l'astronomie.

(6) YOUNG (Thomas), savant anglais (1773-1829), s'occupa d'antiquités, de médecine, de mathématiques et de philosophie. La physique lui doit l'importante découverte des interférences dont nous parlerons en traitant de la lumière.

(7) POISSON (Denis-Siméon), savant mathématicien, né à Pithiviers (Loiret) en 1781, mort en 1842; entra à l'École polytechnique en 1798, professeur de mécanique à l'École normale, membre de l'Académie des sciences, du conseil de l'Université, du Bureau des longitudes, pair de France. On lui a élevé une statue à Pithiviers. Il s'est occupé surtout de l'application de l'analyse à la physique. On a de lui un *Traité de mécanique*, devenu classique, et d'autres ouvrages relatifs à la chaleur, à la capillarité, au calcul des probabilités, etc.

peut-être conduira-t-elle à la découverte de beaucoup de forces inconnues, telles que les forces vitales, les forces catalytiques, c'est-à-dire celles qui produisent des changements dans certains corps par la seule présence d'un autre corps ne se modifiant pas lui-même, telle que la fermentation du sucre sous l'influence de la levure de bière etc.

L'observation permet de constater quelques-uns de ces phénomènes.

L'horizontalité de la surface d'un liquide dans un vase n'existe que si l'on considère le liquide à une certaine distance des parois. Près des

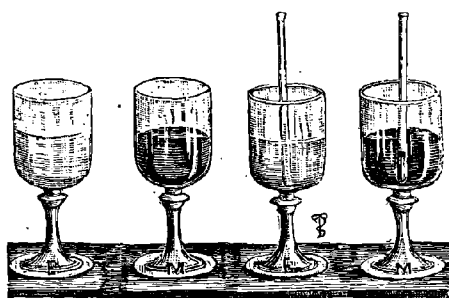


Fig. 111.

Fig. 112.

parois, au contraire, le liquide, s'il mouille le verre, comme fait l'eau, par exemple, présentera une surface concave vers l'extérieur E. (fig. 111); s'il ne mouille pas le verre, comme le mercure, sa surface sera convexe vers l'extérieur M.

Si dans ces vases on plonge un tube très étroit et ouvert à ses deux extrémités, le liquide qui

mouille le verre, l'eau, montera dans le tube au-dessus du niveau de l'eau du verre; il y aura *ascension capillaire*, et sa surface dans le tube sera concave vers l'extérieur E; le liquide qui ne mouille pas le verre, le mercure, sera au contraire au-dessous du verre; il y aura *dépression capillaire*, et sa surface dans le tube sera convexe vers l'extérieur M.

Que dans des tubes de verre coniques, à axe horizontal, on introduise une goutte d'eau, elle ira vers le sommet du tube en affectant la forme d'un ménisque convexe; une goutte de mercure fuira, au contraire, le sommet du cône et aura la forme d'un ménisque concave (fig. 112).

De même, dans des tubes communicants dont un seul est capillaire, si l'on verse un liquide qui mouille les parois, le liquide atteint, dans le tube capillaire, un niveau plus élevé que dans l'autre tube, et sa surface est concave; si c'est un liquide qui ne mouille pas le verre, il a dans le tube capillaire un niveau moins élevé que dans l'autre, et sa surface est convexe.

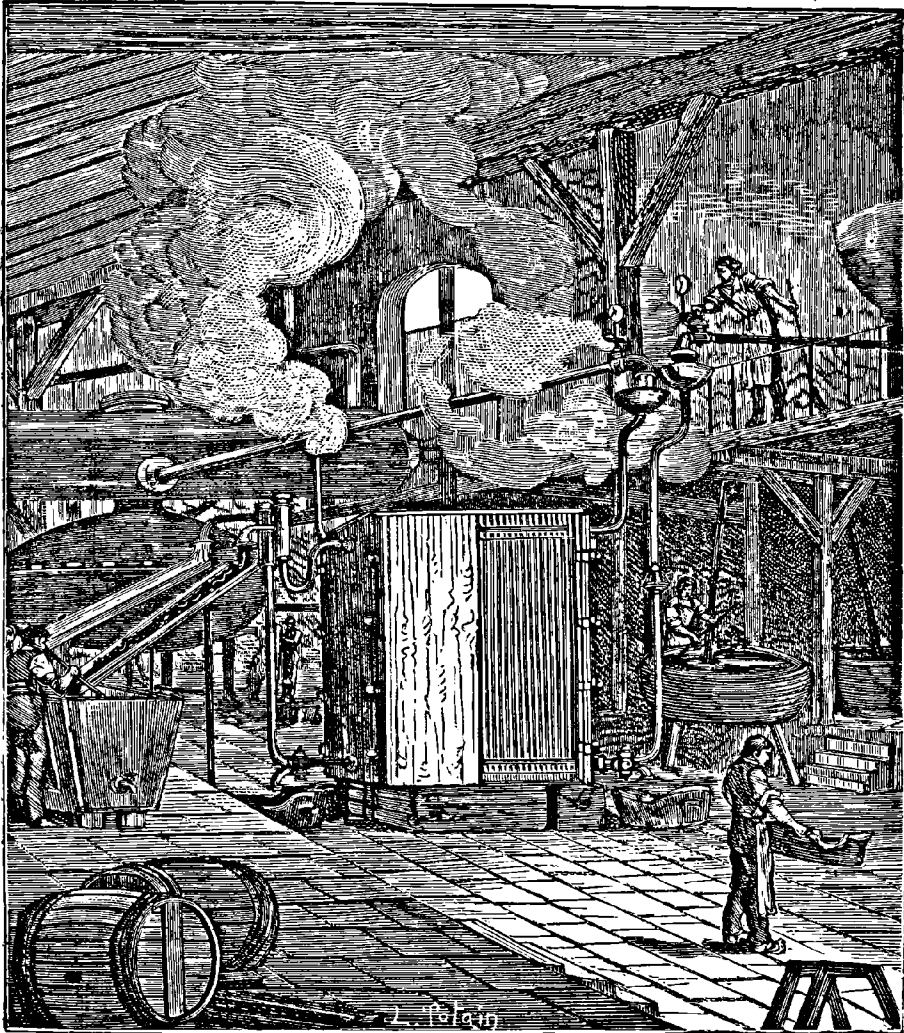
Gay-Lussac a vérifié et formulé les lois auxquelles ces phénomènes sont soumis, à la suite d'expériences et de calculs dans lesquels nous ne devons pas entrer ici.

1<sup>re</sup> LOI. — *Lorsque le liquide mouille les tubes capillaires, il y a alors ascension; lorsqu'il ne les mouille pas, il y a, au contraire, dépression.*

2<sup>e</sup> LOI, dite *loi de Jurin*, du nom de celui qui l'a découverte. — *L'ascension ou la dépression des liquides dans les tubes capil-*



laire est, en un même liquide, en raison inverse du diamètre de ces tubes  
 3<sup>e</sup> LOI. — L'ascension ou la dépression des liquides varie selon  
 la nature du liquide et selon la température ; mais l'une et l'autre



Appareils employés dans les sucreries pour l'épuration des mélasses (page 238).

sont indépendantes de la nature du tube et de l'épaisseur de ses parois.

**ENDOSMOSE ET EXOSMOSE.** — Tous ces phénomènes de *capillarité* ont  
 une grande analogie avec le fait suivant, appelé *endosmose*, découvert,

PHYS. ET CHIM. POPUL.

Liv. 30.

vers 1826, par Dutochet (1), et que l'on rend sensible au moyen de l'appareil appelé *endosmomètre*. Cet appareil (*fig. 113*) se compose d'une poche membraneuse P, surmontée d'un tube de verre fermé, auquel elle est attachée par une ligature très serrée qui la clôt hermétiquement. On place dans cette poche une solution de gomme ou de sucre, puis on la plonge dans l'eau. Au bout de quelque temps, on voit que l'eau sucrée ou gommée a monté dans le tube et que l'eau du vase a baissé, ce

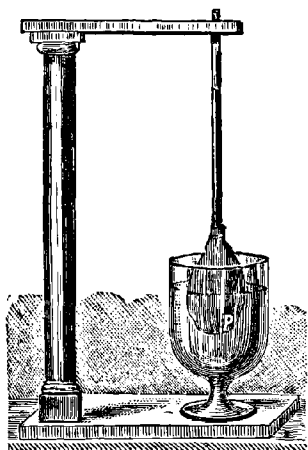


Fig. 113. — ENDOSMOMÈTRE.

qui prouve que celle-ci a traversé la membrane pour augmenter le volume de l'eau que contenait la poche. Comme on constate en même temps que l'eau du vase est devenue sucrée ou gommée, il faut admettre également que l'eau de la poche a pénétré dans le vase. Il y a donc eu double courant : l'un, plus fort, de l'extérieur à l'intérieur, du liquide moins dense vers le liquide plus dense ; c'est l'*endosmose* (du grec *en*, dedans *ósmos*, impulsion) ; l'autre, en sens inverse, plus faible, c'est l'*exosmose* (du grec *exé*, dehors, *ósmos*, impulsion). Si le liquide plus dense est dans le vase et le liquide moins dense dans la vessie, le phénomène se produit encore, mais en sens inverse.

De même, la membrane pourrait être remplacée par un autre corps, une plaque de bois, d'argile ou de terre poreuse.

**CAUSE DES PHÉNOMÈNES CAPILLAIRES.** — La cause des phénomènes capillaires est évidemment l'*attraction* dont nous avons parlé (pages 28 et 85), attraction s'exerçant, soit entre les molécules d'un même corps, soit entre un liquide et un solide, soit entre un solide et un gaz. Toute molécule d'un liquide dans un vase, par exemple, et située près des parois, subit l'attraction des autres molécules liquides et en même temps celle des molécules solides de la paroi. Que l'on plonge une baguette de verre dans un verre plein d'eau, on voit, en la retirant, une goutte d'eau tenir à la baguette, en vertu de l'attraction du liquide pour le solide, attraction qui porte le nom d'*adhésion*, et, en même temps, cette goutte tenir à la

(1) DUTROCHET (René-Joachim-Henri), né en 1776, mort en 1847. Ruiné par la Révolution, il étudia la médecine, devient médecin militaire, puis s'occupe de physique et de physiologie. Membre de l'Académie de médecine et de l'Institut, il a publié de nombreux travaux sur le physiologie, et surtout des études sur l'accroissement des fœtus dans l'œuf et des fœtus humains. Il crut avoir découvert le fluide vital et son jeu intime.

masse liquide, en vertu de l'attraction du liquide pour le liquide, attraction appelée *cohésion* (page 28). Ces deux forces ont une valeur très grande, comme on le démontre par les expériences suivantes :

Sous le plateau d'une balance (*fig. 114*) est suspendu par son centre un disque de verre bien équilibré. On le fait poser sur la surface d'un liquide; alors il faut, pour rétablir l'équilibre des plateaux de la balance, en surplus du poids du disque de verre, un certain nombre de poids. Cette force d'*adhésion* se monte, pour l'eau, à 0<sup>er</sup>,54 par chaque centimètre de surface du disque.

Cette expérience est due à Musschenbrœk (1).

Elle a donné lieu à la construction de la *machine hydraulique* de Véra. Cette machine, destinée à faire monter l'eau d'un réservoir inférieur dans un réservoir supérieur, se compose (*fig. 115*) d'une large bande sans fin de toile forte, glissant sur deux rouleaux R et R'. Le rouleau R tourne dans le réservoir inférieur, et le rouleau R' dans un récipient supérieur, muni d'un robinet pour verser l'eau dans le conduit, qui doit la mener où on le désire. Une roue, mue par une manivelle ou un moteur quelconque, donne le mouvement aux deux rouleaux. Au bout de quelques tours, l'eau *adhère* à la bande ascendante et va ainsi dans le récipient supérieur; le rouleau R', pressé contre la paroi du récipient, exprime l'eau de la bande qui redescend sèche, tandis que l'autre moitié remonte à son tour toute mouillée.

Nous disons que la cause des phénomènes capillaires, dont nous venons de démontrer la valeur, semble due à l'attraction moléculaire. En l'abrégant quelque peu, nous empruntons au livre savant de M. Cazin, les *Forces physiques*, que nous avons déjà cité, le chapitre qui traite de cet objet peu connu.

« L'adhérence de deux corps différents, soit solides, soit liquides, adhérence qui se manifeste lorsqu'il n'y a pas d'air interposé entre les

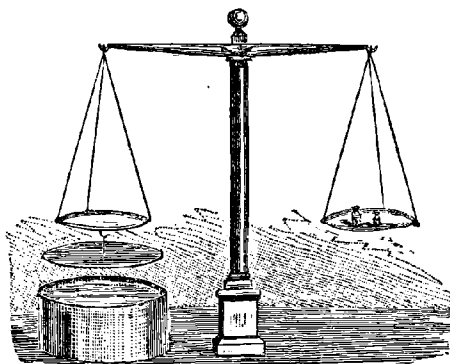


Fig. 114.

EXPÉRIENCE DE MUSSCHENBRÆK.

(1) MUSSCHENBRÆK (Pierre van), savant hollandais (1692-1761), d'abord médecin, puis successivement professeur de philosophie, de mathématiques et de physique. On lui doit d'avoir introduit en Hollande la philosophie expérimentale et de nombreux travaux sur l'électricité, la capillarité, les pyromètres, etc. Il était l'ami et l'élève de 'S Gravesande.

deux corps, dépend certainement de l'attraction moléculaire. Le contact d'un liquide et d'un solide donne lieu à cette sorte d'effet. L'eau attire le verre qu'elle mouille, et cette action a tous les caractères de l'attraction moléculaire. C'est en vertu de l'action réciproque des molécules de l'eau et de leur action sur celles du verre, que ce liquide s'élève dans un tube capillaire et que sa surface prend une forme concave...

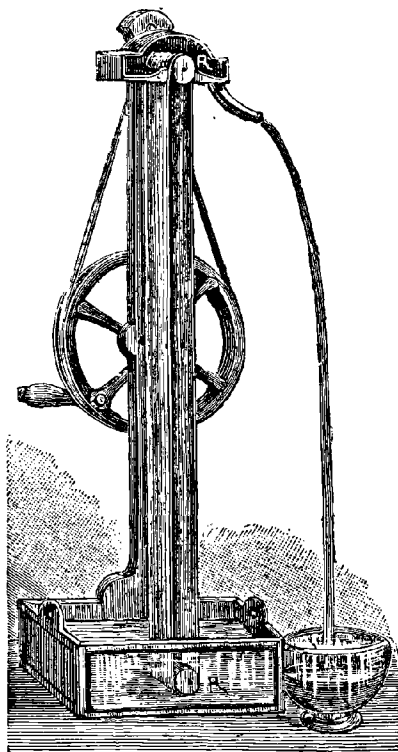


Fig. 115. — MACHINE DE VÉRA.

» Les gaz présentent des exemples frappants de l'attraction mutuelle des molécules de substances différentes. Ils adhèrent très facilement à la surface des solides et s'y déposent en couche mince, dans laquelle la pression est supérieure à la pression atmosphérique. Ces effets sont souvent intenses avec les corps poreux... Une remarquable expérience le prouve. On passe au laminoir un canon de fusil, et on obtient ainsi un tube plat dont on ferme hermétiquement les extrémités ; ce tube est ensuite placé dans une forge à réchauffer. Les gaz du foyer pénètrent alors dans l'intérieur du tube, s'y accumulent et acquièrent une pression capable d'écarter les parois et de faire reprendre au tube la forme cylindrique. Cette observation explique les soufflures des grosses pièces de fer, qui produisent un jet de gaz combustible quand on les perce.

» Dans une éprouvette qui contient du gaz ammoniac sur une cuve de mercure, vous introduisez un fragment de charbon, préalablement rougi au feu, afin que l'air soit chassé de ses pores. Immédiatement, le gaz est absorbé ; le volume de gaz ainsi condensé dans les pores du charbon est 90 fois celui de ce dernier.

» L'absorption des gaz par les solides est un fait plus général que l'on pourrait le croire, et, chaque jour, de nouveaux exemples sont découverts. Les métaux les plus compacts en apparence présentent eux-mêmes cette propriété...

» L'attraction entre les molécules de substances différentes s'observe encore dans les phénomènes de dissolution. Un grand nombre de substances solides, telles que le sucre, le sel, disparaissent quand on les

plonge dans l'eau; on dit qu'elles se dissolvent. Leurs molécules sont séparées les unes des autres, malgré leur attraction, comme si celles de l'eau exerçaient sur elles une attraction prépondérante.

» Deux liquides peuvent aussi se mêler intimement lorsqu'ils sont juxtaposés, et on appelle *diffusion* ce phénomène. Tout le monde a vu une couche de vin rouge surnager au-dessus d'une couche d'eau. Le mélange s'opère lentement, les molécules d'eau s'élevant peu à peu à travers le vin, tandis que celles du vin descendent, et, au bout d'un certain temps, l'eau est rougie dans toute son étendue; les deux liqueurs sont parfaitement mêlées. La pesanteur n'est pas la cause de cette diffusion, car elle tend à placer, au contraire, celui des deux liquides qui est le moins dense, le vin, au-dessus de l'autre; elle s'oppose donc à la diffusion, au lieu de la favoriser.

» M. Graham a reconnu que les substances cristallisables se diffusent le mieux, et que les substances gélatineuses se diffusent très peu. Ces dernières sont aussi perméables que l'eau pure aux substances diffusibles, mais elles sont imperméables aux autres substances. Ainsi, placez au fond d'un vase un mélange de gomme et de sucre dissous dans l'eau, recouvrez-le d'une couche de gelée quelconque, et immergez le tout dans l'eau pure : au bout de quelque temps, vous trouverez que le sucre, très diffusible, s'est disséminé dans toute la masse; il a donc traversé la couche de gelée; la gomme, au contraire, non diffusible, est restée au fond du vase; elle n'a pas traversé la gelée.

» On peut obtenir avec les liquides et les gaz les mêmes effets qu'avec les solides et les liquides. Un liquide peut dissoudre certains gaz; par exemple, l'eau de Seltz est une dissolution d'acide carbonique dans l'eau; l'eau ordinaire tient en dissolution les gaz de l'atmosphère, et c'est la présence de ces gaz qui permet aux animaux aquatiques de respirer.

» Il s'est fait depuis quelques années de grands progrès en physique au sujet du genre d'actions qui nous occupe, et ils ont été suivis d'applications industrielles importantes. Il est probable qu'ils contribueront à l'établissement de la mécanique moléculaire, parce qu'ils nous fournissent quelques données numériques dont la précision est sans doute suffisante. »

**APPLICATIONS DE LA CAPILLARITÉ.** — L'huile, qui imbibe les mèches de nos lampes; le suif, qui en fondant monte entre les interstices des fils de coton de la mèche, comme dans des tubes capillaires, l'eau qui, mouillant d'abord un tas de sable, monte peu à peu jusqu'au sommet; le mor-

ceau de sucre qui, à peine trempé dans un liquide, le boit jusqu'à saturation (1); l'éponge, tous les corps poreux qui s'imbibent si facilement, sont des applications de la capillarité. Dans l'ascension de la sève dans les végétaux, elle joue un rôle important. « Dès que renaît le printemps, dit M. Lévêque, les racines des plantes, gorgées depuis l'automne précédent de substances épaisses, encore épaissies par la longue stagnation de l'hiver, se hâtent de remplacer les liquides dépensés par les bourgeons qui se gonflent. Les dissolutions aqueuses dont le sol est imprégné obéissent vivement à l'appel des énergies *capillaires* et *endosmotiques*. A mesure que le fluide nourricier pénètre par les radicelles, il s'élève; en s'élevant, il se mêle aux sucs de la plante et graduellement augmente de densité. Réunissant leurs forces, l'*endosmose* et la *capillarité* le portent et le répandent de cellule en cellule, de vaisseau en vaisseau, de fibre en fibre. Après avoir parcouru les canaux singulièrement ténus qui composent les tissus, il arrive jusqu'aux bourgeons. Ceux-ci s'en remplissent, se distendent, éclatent et s'épanouissent en bouquets de feuilles. »

Tous ces phénomènes de *capillarité* et d'*endosmose* sont aujourd'hui l'objet d'études persévérantes et de savantes investigations. Les travaux de MM. Jamin (2), Bertrand (3), etc., leurs recherches sur les diverses et nombreuses formes sous lesquelles ils se présentent sont précieuses, mais n'ont pas encore donné des résultats définitifs. Cependant déjà l'industrie y a trouvé d'importantes applications.

M. Dubrunfaut (4) a inventé, pour l'industrie des sucres, un procédé d'épuration appelé *osmose*. La mélasse de betterave est un mélange de sucre cristallisable, de plusieurs sels organiques et de minéraux dissous. Avec l'appareil de Dutrochet, le sucre cristallisable reste plus longtemps dans la poche de membrane; les sels, au contraire, passent dans l'eau pure. De grands appareils industriels ont été construits d'après ce principe, dans lesquels la membrane de vessie est remplacée par du papier modifié par l'acide sulfurique, et connu sous le nom de *papier-par-chemin*.

(1) Remarquons que le morceau de sucre fond alors plus vivement que s'il est immergé d'un seul coup. Cela tient à ce que, dans ce dernier cas, l'air n'a pas eu le temps de quitter les pores du sucre et qu'il s'oppose à l'introduction du liquide dans ces pores.

(2) JAMIN (Claude-Célestin), né en 1818, membre de l'Institut, professeur à l'École polytechnique et à la Faculté des sciences de Paris.

(3) BERTRAND (Joseph-Louis-François), né à Paris en 1822, montra dès la plus tendre enfance des dispositions incroyables pour les mathématiques. A onze ans, il fut admis, à titre d'essai, à l'École polytechnique et y entra le premier à dix-sept ans. Professeur au Collège de France, membre de l'Institut. Ses nombreux ouvrages de mathématiques sont devenus classiques.

(4) DUBRUNFAULT (Augustin-Pierre), né à Paris en 1797, mort en 1876; professeur de chimie industrielle à l'École du commerce, s'occupa surtout de la fabrication du sucre de betterave et de la saccharification de la fécule. Il a publié de nombreux mémoires sur ce sujet.

L'opération appelé *dialyse*, et qui a pour but de séparer diverses substances mélangées dans une solution, est encore une application de l'*endosmose*. Elle permet de séparer ces substances sans les décomposer, si elles sont très altérables, et d'en retirer les principes cristallisables. On prépare ainsi les solutions de silice pure, l'albumine, et, dans la médecine légale, pour s'assurer, par exemple, d'un empoisonnement par l'arsenic, on sépare, au moyen de la dialyse, des substances animales les matières minérales ou organiques cristallisables. A cet effet, on verse dans un tamis dont le fond est formé de *papier-parchemin* le mélange; les substances cristallisables qu'il contient traversent seules la cloison poreuse du tamis.

## CHAPITRE X

### PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

**L'ATMOSPHÈRE.** — « L'air, a dit M. Élisée Reclus (1), est une source inépuisable où tout ce qui vit prend son haleine, un réservoir immense où tout ce qui meurt verse son dernier souffle. Sous l'action de l'atmosphère, tous les organismes épars naissent, puis dépérissent. La vie, la mort sont également dans l'air que nous respirons et se succèdent perpétuellement l'une à l'autre par l'échange des molécules gazeuses. Les mêmes éléments qui s'échappent des feuilles de l'arbre, le vent les porte aux poumons de l'enfant qui vient de naître; le dernier soupir d'un mourant va tisser la brillante corolle de la fleur, en composer les pénétrants parfums. La brise qui caresse doucement les tiges des herbes va plus loin se transformer en tempête, déracine les troncs d'arbres et fait sombrer les navires avec leurs équipages. C'est ainsi que, par un enchaînement infini de morts partielles, l'atmosphère alimente la vie universelle du globe... »

L'air, en un mot, ce fluide gazeux qui forme autour du globe terrestre, une enveloppe désignée sous le nom d'*atmosphère* (du grec *atmos*, vapeur);

(1) Voir son livre *la Terre*.

*sfaira*, sphère), est l'immense laboratoire où se passent sans cesse les opérations chimiques et physiques qui font la vie.

C'est là, dans l'éternel et grand laboratoire,  
 Que, sans cesse essayant mille combinaisons,  
 Récipient commun de tant d'exhalaisons,  
 La nature distille, et dissout, et mélange,  
 Décompose, construit, fond, désordonne, arrange  
 Ces innombrables corps, l'un sur l'autre portés,  
 Quelques-uns suspendus, d'autres précipités,  
 Des soufres et des sels fait l'analyse immense,  
 Des trois règnes divers enlève la substance,  
 Les œufs de l'animal, et la graine des fruits,  
 Et leur premier principe, et leurs derniers produits.  
 Et la vie, et la mort, et les feux, et les ondes,  
 Et dans ce grand chaos recompose les mondes.

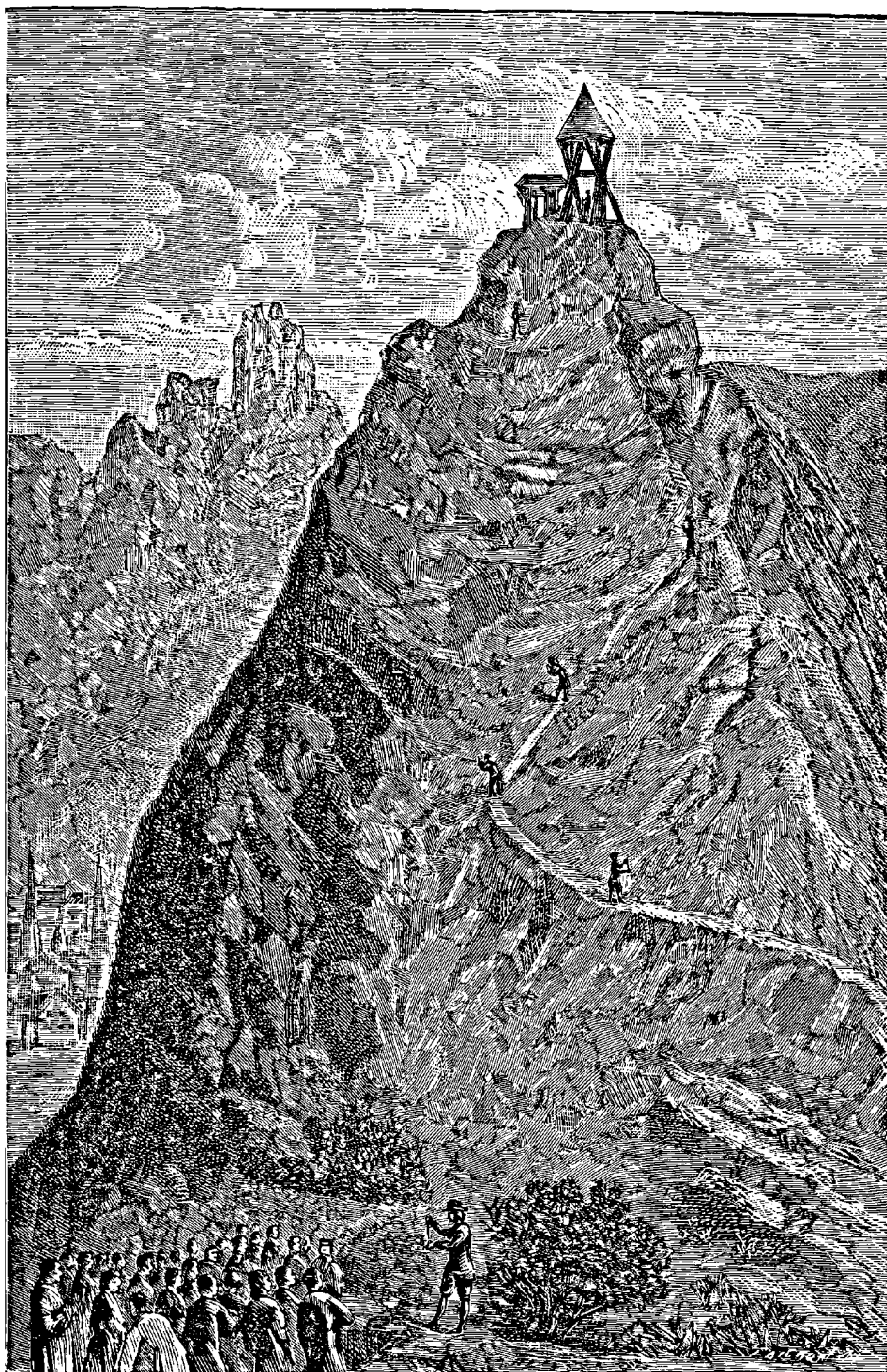
A cause de la ténuité croissante de sa substance, il n'a guère été possible de calculer exactement la hauteur de l'atmosphère. Comme elle est soumise à la force centrifuge, elle doit être, comme la terre, renflée à l'équateur (page 79). De plus, l'action solaire, qui s'exerce plus énergiquement à l'équateur, doit tendre à élever davantage encore l'atmosphère de ce côté; sa hauteur, sans doute, est donc différente à divers endroits du globe.

Cependant, au moyen de la pression barométrique, comme nous le verrons tout à l'heure, on a pu s'en faire une idée approximative, et M. Biot, en discutant les nombreuses observations de pression et de température faites à diverses hauteurs dans les régions atmosphériques, pense que l'atmosphère ne doit pas dépasser 48,000 mètres.

L'astronome Képler, se fondant sur des observations astronomiques, prétendait que la couche d'air était au plus de 15,000 mètres. Si l'atmosphère était illimitée, les planètes qui entourent notre globe en seraient également entourées; or on sait que ces planètes n'ont pas notre atmosphère. De plus, la nuit ne serait jamais complète sur la terre, parce que les couches d'air seraient toujours quelque peu illuminées et nous renverraient la clarté. L'intensité de la lumière crépusculaire et sa durée sont donc intimement liées à la hauteur de l'atmosphère et permettraient de la calculer exactement, si d'autres causes n'y mettaient obstacle: quantité de vapeur d'eau qu'elle tient en suspension, transparence variable, etc. Aussi, par cette méthode, les observateurs ont-ils trouvé des nombres très différents. M. E. Liais, dans sa traversée de France à Rio-de-Janeiro, ayant mesuré la



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Vue du puy de Dôme, à l'endroit où Périer fit son expérience (page 2:9).



durée du crépuscule, donne à l'atmosphère une hauteur de 330,000 mètres. Bravais (1), en opérant au sommet du Faulhorn, a trouvé 115,000 mètres.

Enfin, l'observation des bolides et des étoiles filantes laisse supposer que la hauteur de l'atmosphère est, en réalité de 280 à 320,000 mètres, et c'est, croit-on généralement, le chiffre le plus probable.

L'air, on le sait, est sans odeur ni saveur ; il est incolore. La couleur bleue qu'il présente est due à un phénomène de lumière : ce sont ses particules incolores qui, réfléchissant inégalement les divers rayons qui composent la lumière blanche, réfléchissent de préférence les rayons bleus. Nous reviendrons sur ce point en traitant de la lumière.

**PESANTEUR DE L'AIR.** — L'air est pesant, comme tous les corps de la nature ; un litre d'air, à la température de 0° et sous la pression de 0<sup>m</sup>,76, pèse 1<sup>gr</sup>,29. Longtemps, cependant, il a passé pour un fluide impondérable. Les anciens n'avaient aucune idée vraie de l'atmosphère proprement dite. Suivant Pythagore, l'air impur est celui qui nous environne, et, au-dessus de lui, il y a l'air pur ou *éther*. Platon fait la même distinction, et aussi Empédocle, et presque tous les philosophes. De même, presque tous croyaient à l'immatérialité de l'air, même de l'air impur, et, en conséquence, il n'était venu à l'esprit d'aucun d'eux d'attribuer un rôle quelconque dans les phénomènes naturels au poids de l'air atmosphérique.

Cependant, il paraît qu'Aristote avait songé à la possibilité de cette pesanteur, et, pour s'en convaincre, il pesait une outre successivement gonflée et dégonflée. Ayant obtenu le même poids dans les deux circonstances, il renonça à l'idée conçue un instant dans son esprit. L'expérience, telle qu'il l'exécutait, ne pouvait avoir d'ailleurs qu'un résultat négatif. En effet, si le poids de l'outre vide augmentait, d'une part, par l'introduction de l'air, elle diminuait d'une quantité équivalente, comme nous le verrons, par suite de l'augmentation correspondante de la poussée de l'air déplacé. L'insuccès de cette expérience conduisit Aristote à ériger en axiome cette vaine parole : « La nature a horreur du vide. »

Cette absurdité, admise par tout le monde, empêcha de renouveler des expériences qui eussent tranché la question dans un autre sens. Vainement Empédocle, avant Aristote, avait attribué la cause de la respiration « à la pesanteur de l'air qui se précipite dans les poumons » ; vainement Asclépiade avait dit : « L'air est porté dans la poitrine par sa

(1) BRAVAIS (Auguste), né à Annonay (1811-1863), quitta le service de la marine pour s'occuper de sciences physiques et mathématiques. Professeur à l'École polytechnique, membre de l'Institut.

pesanteur» ; vainement un stoïcien célèbre, Possidonius (135-50 av. J.-C.), — ce philosophe qui, au milieu des plus cruelles douleurs, s'écriait : « O douleur ! tu as beau me faire souffrir, tu ne me réduiras point à convenir que tu sois un mal ! » — vainement, dis-je, Possidonius, qui le premier soupçonna que le flux et le reflux de la mer étaient dus aux mouvements de la lune, affirmait que l'atmosphère était pesante et voulait en mesurer la hauteur, toutes ces tentatives, toutes ces opinions furent immédiatement oubliées.

Il va sans dire que, pendant tout le moyen âge, ce fut un article de foi de croire que « la nature a horreur du vide et que l'air est immatériel, » puisque Aristote l'avait affirmé.

En 1630 seulement, un chimiste, Jean Rey (1), consulté par un certain Brun, apothicaire à Bergerac, à propos d'une expérience de chimie métallurgique, dans laquelle de l'étain, maintenu en fusion au contact de l'air, éprouvait un accroissement de poids, attribua ce phénomène à une absorption d'air. Il osa publier ce sentiment et affirmer que « l'air est pesant. » Rarement affirmation fut plus contraire aux idées reçues. Cependant le perspicace médecin est sûr du fait, et il annonce fièrement la nouvelle vérité dans le naïf langage de l'époque : *Je responds et soutiens glorieusement que ce surcroît de poids vient de l'air, qui, dans le vase, a esté espessi et rendu adhésif par la véhémence et longuement continuée chaleur du fourneau, lequel air se mesle à l'étain et s'attache à ses plus menues parties.*

Malgré l'assurance de ses affirmations, Jean Rey fut peu écouté, et « l'horreur de la nature pour le vide » continua d'être un axiome indiscutable, ainsi que l'impondérabilité de l'air.

Un hasard appela enfin l'attention des physiciens sur ce point. Ce fut encore Galilée qui, le premier, trouva la vérité ou du moins indiqua la voie pour y arriver.

Les fontainiers du grand-duc de Toscane, ayant eu besoin de pompes de 40 à 50 pieds, lorsqu'on les mit en jeu, on ne put jamais faire arriver l'eau à leur extrémité. Elle ne montait jamais au-dessus de 32 pieds (10<sup>m</sup>,33), comme dans toutes les pompes ordinaires. Ils s'adressèrent à Galilée pour connaître la cause de leur mésaventure. Dissimulant sa surprise, celui-ci se contenta de répondre que *la nature n'a horreur du vide que jusqu'à 32 pieds*. Les fontainiers se contentèrent probablement de cette réponse ; mais il n'en fut pas de même pour l'illustre savant. Il

(1) REY (Jean), né en 1572 à Bugues (Périgord), mort en 1643. Outre sa découverte de la pesanteur de l'air, il inventa un thermomètre à eau et fut un des précurseurs de la chimie pneumatique. Il était en correspondance avec tous les savants de son temps.

chercha la cause de ce phénomène. Déjà, dès 1638, il avait avancé la pesanteur de l'air et s'était efforcé de démontrer qu'il pesait 400 fois moins que l'eau. Reprenant l'expérience d'Aristote, il avait pesé successivement un ballon plein d'air ordinaire et d'air comprimé, et il avait trouvé, dans le second cas, une augmentation de poids. Il conclut donc que l'ascension de l'eau dans les corps de pompe vides d'air et son arrêt lorsqu'elle était arrivée à 32 pieds étaient dus au poids de l'air, qui, pressant sur la surface du liquide, le forçait de s'élever dans le corps de pompe jusqu'à ce que le poids de l'eau fit équilibre au poids de l'air. La mort l'empêcha de développer le principe qu'il avait découvert.

Il était réservé à son disciple et son ami, Torricelli (1), de trouver l'expérience qui démontrerait d'une manière décisive la pesanteur de l'air et la pression atmosphérique, et même permettrait de mesurer l'intensité de celle-ci avec la plus grande exactitude.

Galilée, préoccupé de la question des pompes, avait fait toutes ses expériences avec de l'eau; Torricelli eut l'heureuse idée de substituer le mercure à l'eau. En ayant parlé à un de ses amis, Viviani (2), celui-ci remplit de mercure un long tube de verre fermé en haut (fig. 116), puis bouchant avec le doigt l'extrémité inférieure, il le renversa dans une cuve pleine de mercure. Le mercure descendit dans la cuve, mais s'arrêta en laissant dans le tube une colonne haute de 27 pouces  $1/2$  (0<sup>m</sup>,76). Le rapport entre la hauteur de l'eau (32 pieds) et du mercure (27 pouces  $1/2$ ) était bien le même que le rapport inverse des densités des deux liquides, soit environ, en nous servant de nos mesures,

$$\frac{10,33}{0,76} = \frac{13,59}{1}.$$

Il était donc clair que le phénomène était le même que celui constaté



Fig. 116.

EXPÉRIENCE DE TORRICELLI.

(1) TORRICELLI (Evangelista), né à Faenza en 1608, mort en 1647, à trente-neuf ans. Célèbre de bonne heure par ses découvertes en mathématiques, il se lia avec Galilée, dont il partagea la captivité. Il fut le compagnon dévoué de son maître aveugle et ne le quitta qu'à sa mort. Nommé mathématicien du grand-duc de Toscane, il construisit des lunettes supérieures à celles dont on faisait usage alors, écrivit un *Traité du mouvement* et eut une vive polémique avec Roberval au sujet de la découverte des propriétés de la cycloïde, dont celui-ci lui contestait la priorité.

(2) VIVIANI (Vincent), né à Florence en 1622, mort en 1703. Élève de Galilée géomètre

pour l'eau, et qu'il devait être attribué à la pression de l'air pesant sur le liquide de la cuve, faisant monter l'eau, moins dense, à 32 pieds (10<sup>m</sup>,33), et le mercure, 13,59 fois plus dense, à une hauteur 13,59 fois plus petite, à 27 pouces 1/2 (0<sup>m</sup>,76).

Remarquant que tous les points de la surface du mercure de la cuve supportent évidemment une pression égale à cette partie de la surface qui supporte le mercure du tube, on conclut qu'*une surface quelconque éprouve, de la part de l'air, une pression égale, en moyenne, au poids d'une colonne de mercure ayant cette surface pour base et une hauteur de 0<sup>m</sup>,76.*

**EXPÉRIENCE DE PASCAL.** — Cette expérience fut rapportée à Pascal (1) par Pierre Petit (2) qui la tenait du P. Mersenne (3) ; elle frappa le savant, qui répéta l'expérience en la variant diversement, et il en tira cette première conclusion : « que, s'il était vrai, comme on le prétendait, que la

célèbre, ingénieur du-grand duc Ferdinand de Médicis, pensionné par Louis XIV, membre associé de l'Académie des sciences de Paris.

(1) PASCAL (Blaise), né à Clermont-Ferrand le 19 juin 1623, était le fils d'un président de la cour des aides de cette ville, homme très savant et qui, voulant faire lui-même l'éducation de son fils, lui avait interdit la lecture de tout ouvrage de mathématiques, afin de laisser son intelligence se fortifier avant d'entreprendre l'étude des sciences exactes. Mais le génie de Pascal poussait celui-ci à tâcher de deviner ce qu'il lui était défendu d'apprendre, et, à douze ans, il traçait d'instinct des figures géométriques dont l'une servait à démontrer la 32<sup>e</sup> proposition d'Euclide. Ce fait, rapporté par M<sup>me</sup> Périer, sœur de Pascal, qui a écrit sa vie, a été révoqué en doute; il est exact cependant, si, comme le dit Condorcet, on remarque qu'il ne s'agit point ici d'une démonstration rigoureuse, mais d'une simple observation. A seize ans, il écrivit un *Traité des sections coniques*, ouvrage tellement remarquable que Descartes refusait de croire qu'un enfant en pût être l'auteur. A dix-huit ans, il inventa une *machine arithmétique*, puis successivement publia des travaux admirables sur les bases du *calcul des probabilités*, une *Théorie de la roulette* (1658), inventa la *brouette-vinaigrette*, le *haquet*, heureuse combinaison du levier et du plan incliné, etc. Mêlé aux luttes religieuses de son temps, il écrivit en faveur des *jansénistes* et contre les *jesuites*, les *Lettres provinciales*, pamphlet étincelant, et un des plus beaux monuments de notre langue. Il laissa encore, en mourant, un ouvrage inachevé dont on a réuni les fragments sous le titre de *Pensées de Pascal*. Dès l'âge de dix-huit ans, sa santé avait été très mauvaise; en 1647, une attaque de paralysie acheva de la ruiner; sa sœur, religieuse à Port-Royal-des-Champs, le détermina à quitter le monde, à abandonner la science pour ne songer qu'à la religion. En 1654, les chevaux de son carrosse, dans lequel il se promenait, prirent le mors aux dents près du pont de Neuilly et se précipitèrent dans la Seine; heureusement les traits se rompirent, Pascal fut sauvé; mais son imagination fut frappée, et il crut, depuis ce funeste événement, voir un précipice béant à ses côtés. Il tomba alors dans une dévotion outrée, sombra dans les pratiques les plus superstitieuses, vers lesquelles, dit M. Villemain, cette puissante intelligence avait reculé pour fuir de plus loin une effrayante incertitude. Ce fut en proie à des terreurs incessantes et horribles que Pascal passa les dernières années de sa vie. Il mourut le 19 août 1662, à l'âge de trente-neuf ans.

Nous avons donné à la page 57 le portrait de cet homme illustre.

(2) PETIT (Pierre), géographe, ingénieur, physicien, intendant des fortifications à Rouen (1594-1677), disciple ardent de Descartes, ami de Pascal, avec lequel il répéta les expériences de Torricelli sur le vide.

(3) MERSENNE (le père Marin), savant religieux de l'ordre des Minimes (1588-1648), condisciple et ami de Descartes. A laissé de nombreux ouvrages de théologie et de science; mais est surtout connu par ses liaisons avec les principaux savants de l'Europe, avec lesquels il était en correspondance, et auxquels il servait d'intermédiaire.

nature *abhorre le vide*, il n'est pas exact de dire qu'elle ne souffrait pas de vide; qu'au contraire cette horreur du vide avait des limites; enfin que la nature ne fuyait pas le vide avec tant d'horreur que plusieurs se l'imaginent. »

Pascal ayant publié ses observations, il y eut grand émoi au camp des partisans d'Aristote; une polémique s'engagea. Pascal réitéra ses expériences et trouva les principes que nous avons exposés de l'équilibre des liqueurs. Il apprit alors que Torricelli avait eu l'idée, d'ailleurs déjà venue à Descartes, que la pesanteur de l'air pouvait bien être la cause de tous les effets jusqu'alors attribués à l'horreur du vide. Il voulut s'assurer expérimentalement de la vérité de cette conjecture. Descartes lui avait proposé de porter un tube de Torricelli au haut d'une montagne, et il l'avait assuré que le mercure y serait sensiblement plus bas que dans la plaine, parce que la colonne d'air qui pèse sur le mercure serait devenue plus courte. Avant de tenter cette expérience, qui demandait des apprêts considérables, Pascal en imagina une non moins convaincante. Près de l'extrémité supérieure d'un tube de Torricelli simple, dont le haut était fermé avec un bouchon, il avait scellé un tuyau coudé communiquant, par la partie supérieure de sa plus petite branche, avec le haut du tube; la plus haute branche en était fermée hermétiquement, et le coude était rempli de mercure qui se tenait de niveau dans les deux branches, tandis que, dans le tube, il était élevé de 27 pouces au-dessus. Si alors on ôtait le bouchon, le mercure du tube retombait au niveau et celui du tuyau coudé montait dans la branche supérieure 27 pouces au-dessus. Ainsi, l'on voyait le mercure de niveau toutes les fois que la colonne d'air pesait ou ne pesait pas en même temps sur les deux surfaces du mercure; tandis que, toutes les fois que l'air agissait sur une seule des deux surfaces, le mercure s'élevait dans l'autre branche au-dessus du niveau.

Encouragé par ce résultat, Pascal essaya encore dans sa maison, puis sur la tour de Saint-Jacques-du-Haut-Pas (aujourd'hui isolée au milieu d'un square et ornée, en 1860, de la statue du célèbre physicien en souvenir de cette expérience). Le succès répondit à ses essais.

Il se détermina alors, pour achever de lever tous les doutes, à répéter l'expérience sur une montagne d'Auvergne, le puy de Dôme. Florin Périer, son beau-frère, conseiller en la cour des aides d'Auvergne, l'exécuta d'après ses instructions; car l'admiration qu'inspirait le génie de Pascal avait subjugué toute sa famille, et il avait fait de tous ses parents des physiciens et des savants, aussi facilement que, dans la suite, il en fit des jansénistes et des dévots, selon la remarque de Condorcet.

Le 15 novembre 1647, il écrivait donc à son beau-frère la lettre suivante, dans laquelle se trouve un passage curieux qui dépeint bien la lutte de cet esprit, toujours si cruellement tiraillé entre la raison et le respect de la tradition :

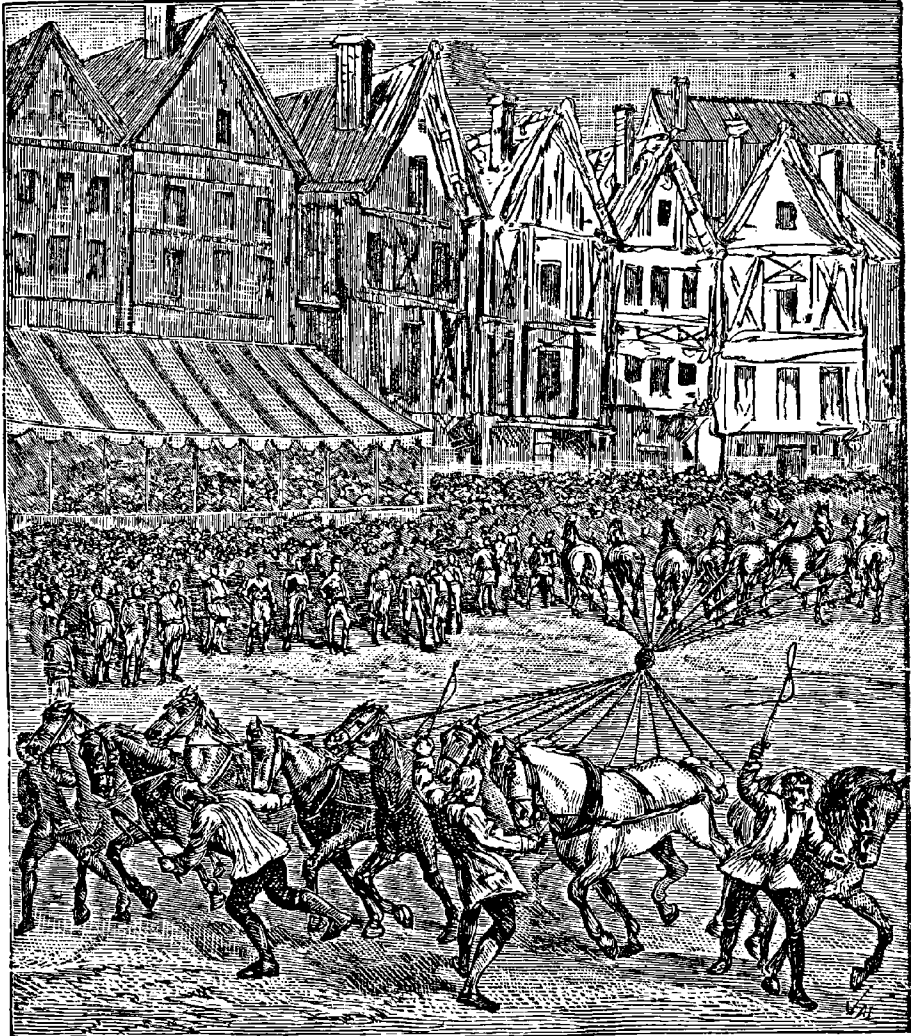
Tous les philosophes ont tenu pour maxime que la nature abhorre le vide ; et presque tous, passant plus avant, ont soutenu qu'elle ne peut l'admettre et qu'elle se détruirait elle-même plutôt que de le souffrir. Ainsi les opinions ont été divisées ; les uns se sont contentés de dire qu'elle l'abhorrait seulement, les autres ont maintenu qu'elle ne pouvait le souffrir. J'ai travaillé à détruire cette dernière opinion. Je travaille maintenant à examiner la vérité de la première, savoir que la nature abhorre le vide, et à chercher des expériences qui fassent voir si les effets que l'on attribue à l'horreur du vide doivent être véritablement attribués à cette horreur du vide, ou s'ils doivent l'être à la pesanteur et pression de l'air. *Je n'ose pas encore me départir de la maxime de l'horreur du vide ; car je n'estime pas qu'il nous soit permis de nous départir légèrement des maximes que nous tenons de l'antiquité, si nous n'y sommes obligés par des preuves indubitables et invincibles.* Mais, en ce cas, je tiens que ce serait une extrême faiblesse d'en faire le moins scrupule, et qu'enfin nous devons avoir plus de vénération pour les vérités évidentes que d'obstination pour les opinions reçues... J'ai imaginé une expérience qui pourra seule suffire pour nous donner la lumière que nous cherchons, si elle peut être exécutée avec justesse. C'est de faire l'expérience ordinaire du vide plusieurs fois en un même jour, dans un même tuyau, avec le même vif-argent, tantôt en bas et tantôt au sommet d'une montagne élevée pour le moins de 5 ou 600 toises, pour éprouver si la hauteur du vif-argent suspendu dans le tuyau se trouvera pareille ou différente dans ces deux situations. Vous voyez déjà, sans doute, que cette expérience est décisive de la question, et que, s'il arrive que la hauteur du vif-argent soit moindre au haut qu'au bas de la montagne (comme j'ai beaucoup de raisons pour le croire, quoique tous ceux qui ont médité sur cette matière soient contraires à ce sentiment), il s'ensuivra nécessairement que la pesanteur et pression de l'air est la seule cause de cette suspension du vif-argent et non pas l'horreur du vide, puisqu'il est bien certain qu'il y a beaucoup plus d'air qui pèse sur le pied de la montagne que non pas sur son sommet ; au lieu qu'on ne saurait dire que la nature abhorre le vide au pied de la montagne plus que sur son sommet. J'espère de votre bonté que vous m'accorderez la grâce de vouloir faire vous-même cette expérience sur le puy de Dôme. Je vous prie seulement que ce soit le plus tôt qu'il vous sera possible et d'excuser cette liberté où m'oblige l'impatience que j'ai d'en apprendre le succès.

Le 19 septembre 1648, Périer exécuta l'expérience.

Il établit la station inférieure dans le jardin des Pères minimes, à Clermont, un des lieux les plus bas de la ville. Il s'était muni de deux tubes de verre identiques, fermés par un bout et ouverts par l'autre. Après



les avoir remplis de mercure et renversés sur une cuve contenant le même liquide, il marqua le niveau où s'était arrêté le mercure. L'un des tubes fut confié au P. Chalin, qui devait observer de moment en moment,



Expérience des *Hémisphères de Magdebourg*,  
exécutée par Otto de Guéricke devant l'empereur Ferdinand III, à la diète de Ratisbonne  
(pages 251 et 290).

pendant toute la journée, s'il arriverait du changement. Porteur de l'autre tube, il gravit le puy de Dôme, montagne conique élevée de 500 toises environ, et il arriva jusqu'à une petite chapelle bâtie au sommet. L'hypothèse de Pascal reçut alors une éclatante confirmation.

Pour reprendre et comparer ensemble, dit M. Périer dans sa relation, les différentes élévations des lieux où les expériences ont été faites, avec les diverses hauteurs du vif-argent qui est resté dans les tuyaux, il se trouve :

Qu'en l'expérience faite au plus bas lieu, le vif-argent restait à la hauteur de 26 pouces 3 lignes et demie ;

En celle qui a été faite en un lieu élevé au-dessus du plus bas d'environ 7 toises, le vif-argent est resté à la hauteur de 26 pouces 3 lignes ;

En celle qui a été faite en un lieu élevé au-dessus du plus bas d'environ 27 toises, le vif-argent s'est trouvé à la hauteur de 26 pouces 1 ligne ;

En celle qui a été faite en un lieu élevé au-dessus du plus bas d'environ 150 toises, le vif-argent s'est trouvé à la hauteur de 25 pouces ;

En celle qui a été faite en un lieu élevé au-dessus du plus bas d'environ 500 toises, le vif-argent s'est trouvé à la hauteur de 23 pouces 2 lignes ;

Et partant, il se trouve qu'environ 7 toises d'élévation donnent de différence en la hauteur du vif-argent  $1/2$  ligne ;

Environ 27 toises, 2 lignes  $1/2$  ;

Environ 150 toises, 15 lignes  $1/2$  qui font 1 pouce 3 lignes  $1/2$  ;

Et environ 500 toises, 37 lignes  $1/2$  qui font 3 pouces 1 ligne  $1/2$  ;

Voilà, au vrai, tout ce qui s'est passé en cette expérience.

Cette expérience eut un immense retentissement ; elle fut répétée dans toute l'Europe, notamment par Descartes, alors en Suède, et partout avec le même succès.

**PRESSIION ATMOSPHÉRIQUE.** — La pesanteur de l'air étant ainsi démontrée, il est évident que la masse atmosphérique exerce une pression assez considérable sur la surface de notre globe et sur les corps qui s'y trouvent. Nous avons dit ci-dessus que *cette pression était égale, en moyenne, au poids d'une colonne de mercure ayant pour base la surface considérée et pour hauteur  $0^m,76$* . Or 1 centimètre de mercure pesant  $13^s,59$ , le poids de  $0^m,76$  est de  $13^s,59 \times 76 = 1^k,033$  pour une surface de un centimètre carré. Cette pression de  $1^k,033$  est ce qu'on appelle la pression de *une atmosphère* ; elle s'exerce sur tous les points de la surface d'un corps, et, par suite, de même que cela a lieu pour un corps plongé dans un liquide, la résultante des diverses pressions est une poussée verticale de bas en haut égale au poids de l'air déplacé. L'air n'a donc pas pour effet de maintenir les corps à la surface de la terre, mais, au contraire, de les soulever, avec une force d'ailleurs peu considérable à cause de sa faible densité. C'est sur ce principe que sont fondés les *aérostats*.

La *pression atmosphérique* se démontre expérimentalement avec le *crève-veffie* et les *hémisphères de Magdebourg*.

Le *crève-vessie* (fig. 117) consiste en un manchon de verre, fermé hermétiquement d'un bout par une baudruche et que l'on met sur le plateau d'une machine à faire le vide, que nous décrirons ci-après et que l'on nomme *machine pneumatique*. La pression atmosphérique extérieure s'exerce sur la membrane de haut en bas ; mais elle est équilibrée par la pression intérieure de bas en haut, et la baudruche n'est point déprimée. Que l'on pompe l'air intérieur avec la machine pneumatique, la pression extérieure, agissant seule de plus en plus, déprime la baudruche et finit par la crever avec une forte détonation, produite par la brusque rentrée de l'air dans le manchon.

Les *hémisphères de Magdebourg* (fig. 118), imaginés par le célèbre Otto de Guericke dont nous parlerons tout à l'heure, consistent en deux hémisphères en cuivre, d'environ 0<sup>m</sup>,65 de diamètre, qui s'adaptent parfaitement l'un dans l'autre. On fait le vide dans l'intérieur de cette sorte de boîte. Il devient alors sinon impossible, au moins très difficile de les séparer. On rapporte que, lors de l'expérience publique que fit le savant avec cet appareil, il fallut seize chevaux tirant en sens opposé pour les disjoindre. En effet, la surface du



Fig. 118.

HÉMISPÈRES  
DE  
MAGDEBOURG.

cerle que formaient les deux hémisphères en s'appliquant l'un sur l'autre était de :  $0,325^2 \times 3,1416 = 0^m^2,3318$ , d'où la pression correspondante égalait  $3318 \times 1^k,033 = 3427^k,494$ . On démontre plus simplement encore la réalité de la pression atmosphérique au moyen d'un verre à boire complètement rempli d'eau. On ferme le verre en plaçant dessus une feuille de papier que l'on maintient avec la main en retournant le verre sens dessus dessous. La main étant retirée, la pression atmosphérique empêche le liquide de tomber ; la feuille de papier n'ayant pour but que de s'opposer à ce que l'air ne divise l'eau et ne rentre à sa place dans le verre.

Nous connaissons tous le jeu d'enfant appelé, je crois, l'*arrache-pavé*. Un disque de cuir mouillé est fixé par son centre à une corde qui le traverse. Le gamin applique, à tour de bras, ce disque sur le pavé ; la violence du choc chasse l'air, le vide se produit, la pression atmosphérique agissant sur le morceau de cuir le fait adhérer à la pierre comme s'il faisait corps avec elle, et l'enfant au moyen de la corde cherche à arracher le pavé qui, bien entendu, tient bon, malgré

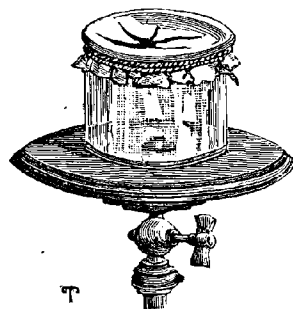


Fig. 117. — CRÈVE-VESSIE.

les efforts d'autres gamins. Mais qu'il s'agisse seulement d'un carreau, quelque peu tremblant dans son alvéole, on parvient facilement à l'en faire sortir.

C'est par la même raison que le liquide ne s'écoule pas d'un tonneau plein, même si l'on y a fait un trou, et qu'il est nécessaire de lui *donner de l'air* en perçant un second trou à la partie supérieure du tonneau pour obtenir l'écoulement du liquide.

D'après la pesanteur connue de l'air, si nous voulons évaluer la somme des pressions que la masse atmosphérique exerce sur la surface du globe, nous trouvons, en réduisant celle-ci en centimètres carrés, que la terre supporte une pression, un poids en kilogrammes représenté par 1 suivi de vingt zéros, c'est-à-dire cent quintillions de kilogrammes.

La surface du corps humain, étant moyennement de  $\frac{7}{4}$  de mètre carré, surpote une somme de pression égale à 17,500 kilogrammes environ.

Le corps résiste à cette force par la réaction égale et opposée des fluides intérieurs qu'il contient, et surtout par l'incompressibilité à peu près absolue des tissus qui le composent; il n'éprouve ainsi aucune gêne sensible dans ses mouvements de la part de la pesanteur de l'air. Jadis, on eût été effrayé, selon l'expression de l'abbé Delille,

Si quelque sage eût dit : « Regarde autour de toi,  
Homme faible! de l'air l'océan t'environne,  
Sur toi pèse en tous sens sa fluide colonne! »  
Mais la raison bientôt, venant le rassurer,  
Lui dit : « Cet océan, dont l'air vient l'entourer,  
Lui-même t'appuyant contre sa masse immense,  
Par un juste équilibre au dehors se balance,  
Et l'air intérieur, par un contraire effort,  
De sa force élastique exerce le ressort.  
Sans elle, au même instant, de ta mortelle argile,  
Sa masse écraserait l'édifice fragile. »

**EFFETS DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.** — Les changements de la pression atmosphérique ont une influence énorme sur tous les corps organisés ou inorganiques qui sont à la surface de la terre. La santé publique change évidemment avec les perturbations atmosphériques. C'est là un fait brut d'expérience, vrai pour tous les climats, une loi toute physique.

Une diminution de 1 centimètre dans la hauteur de la colonne barométrique indique une diminution de pression sur notre corps de 231 kilogrammes. Sous nos latitudes, c'est une chose à considérer.

En effet (1), sous nos latitudes, l'amplitude des oscillations barométriques est considérable; la pression peut varier en 24 heures de 30 à 40 millimètres de mercure, ce qui augmente ou diminue la pression exercée sur notre corps de 600 à 900 kilogrammes. C'est, en quelque sorte, comme si l'on nous transportait brusquement dans un climat très différent, de la plaine sur une montagne de 600 mètres de hauteur. Il est clair alors que les sécrétions doivent être altérées dans un sens ou dans l'autre, que les fibres nerveuses plus ou moins pressées au milieu des tissus doivent ressentir l'effet des variations barométriques, que les intestins doivent se distendre ou se rapprocher, que la quantité de gaz dissous dans le sang ou rendu à liberté doit dépendre encore des mêmes modifications de la pression atmosphérique. On remarquera en outre que, la pression diminuant, une quantité d'air en réalité moindre se trouve dans un volume donné; avec la baisse du baromètre coïncide, en général, une augmentation dans la quantité de vapeur d'eau en suspension dans l'air. Ce qui est pris par l'eau n'est pas occupé par l'air. Encore une raison pour que l'atmosphère utile qui nous entoure soit en réalité raréfiée, et pour que nous soyons obligés de courir après l'oxygène, qui est indispensable aux fonctions vitales. Le mal est petit pour celui qui a les globules sanguins en excès; la provision d'oxygène est assurée et au delà. Mais pour l'anémique, qui n'a à sa disposition qu'un nombre restreint de globules, la diminution dans la quantité absolue d'oxygène devient grave, l'approvisionnement devient insuffisant, et les organes respiratoires ont quelque peine à suppléer à la quantité par la vitesse de la fonction. De là ces troubles dans la circulation, ces mouvements fébriles si souvent observés, ces perturbations dans le système nerveux, les maux de tête, d'estomac, d'entrailles, etc.

M. Paul Bert, l'éminent professeur de physiologie à la Faculté des sciences de Paris, a confirmé, dans une série de recherches remarquables et de curieuses expériences, les théories relatives au rôle de la pression atmosphérique dans les variations de la santé publique, et il en a déduit les conséquences suivantes :

Lorsque la pression atmosphérique diminue, la quantité des gaz contenus dans le sang (oxygène, acide carbonique, azote) diminue également. Donc un homme qui s'élève en ballon ou gravit une montagne a dans le sang, à sa disposition, pour exciter ses tissus à fournir à sa dépense de force et de chaleur, une quantité de plus en plus petite et bientôt insuffisante d'oxygène. C'est pourquoi on est obligé de s'arrêter si

(1) De Parville, *Causeries scientifiques*.

souvent dans les ascensions de montagnes, et il y a impossibilité de dépasser une certaine limite où l'asphyxie devient menaçante. Le même appauvrissement se manifeste pour l'acide carbonique. Le mal tient surtout à la diminution dans la proportion d'oxygène. Cette diminution devient évidente dès que le baromètre descend de 20 centimètres, c'est-à-dire dès qu'on se trouve placé dans des conditions à peu près égales à celles où vivent cependant des millions d'hommes, particulièrement sur le plateau mexicain de l'Anahuac. Les habitants de ces hauts sommets sont pour la plupart anémiques.

M. Paul Bert montre ainsi que, dans les changements de pression bien accentués, le rôle dominant est joué par l'oxygène, agent chimique, à l'exclusion de la pression elle-même, agent mécanique. A une pression de 4 ou 5 atmosphères, l'oxygène devient, dans l'économie, un agent toxique d'une extrême énergie; il tue. A une pression basse, au contraire, il y a asphyxie, par défaut d'oxygénation. Dans les conditions normales, notre sang paraît à peu près saturé d'oxygène.

Il est donc possible de conjurer les dangers qui résultent de l'action de l'oxygène à haute et basse pression. Dans le premier cas, il faut, dans l'atmosphère que l'on respire, sous forte tension, diminuer la proportion d'oxygène, augmenter la proportion d'azote; dans le second cas, diminuer au contraire l'azote et augmenter l'oxygène. Ces préceptes trouvent leur application dans les voyages aéronautiques ou dans les industries qui soumettent les ouvriers à de hautes pressions. Par exemple, dans la pêche du corail ou des éponges, si l'on veut dépasser 5 à 6 atmosphères de pression d'eau, c'est-à-dire une profondeur de 50 à 60 mètres (10 mètres d'eau équivalent à une atmosphère), il faut que les machines soufflantes envoient au plongeur, au lieu d'air, un mélange d'air et d'azote.

Nous donnerons ci-après, dans le chapitre consacré aux *Aérostats*, et à propos du voyage du *Zénith*, les détails des expériences de M. Paul Bert et l'essai de l'application de ses découvertes.

Les changements dans la pression atmosphérique, qui ont une si grande influence sur l'économie animale, semblent exercer aussi une action sur les végétaux. Cela résulte encore des expériences qu'a fait connaître M. Paul Bert.

Il a recherché comment se produisait la germination du blé sous différentes pressions, le grain étant semé, bien entendu, sous des cloches, dans des conditions identiques. Voici les résultats obtenus. A la pression ordinaire, la germination a été complète et les brins étaient hauts de 20 centimètres. Dans la cloche où l'on avait fait descendre la pression de 25 centimètres de mercure, le blé a mal germé; les brins étaient chétifs,

fluets, jaunâtres, hauts de 15 centimètres. Enfin dans la cloche où l'on diminue la pression de 50 centimètres, pas un grain de blé n'a levé. Réciproquement, du blé maintenu sous la cloche à la pression de 5 atmosphères n'a pas levé davantage; les radicules sont seules sorties, et il s'est manifesté un commencement de fermentation.

Or, chaque fois que l'on s'élève de 10 mètres dans l'atmosphère, le baromètre baisse d'à peu près un millimètre; pousser la raréfaction de l'air à 25 centimètres au-dessous de la pression normale, c'est placer le végétal en expérience à 2,500 mètres au-dessus du niveau de la mer. Par conséquent, il est permis d'inférer que l'altitude influe directement sur la végétation par la diminution de la pression atmosphérique, en dehors des conditions climatiques ordinaires.

La pression atmosphérique a même une influence sur le dégagement du gaz emprisonné dans les roches. On a remarqué que les explosions de grisou dans les mines étaient surtout à redouter au moment des grandes dépressions du baromètre ou des mouvements brusques du thermomètre. On comprend très bien en effet que, lorsque la pression atmosphérique est brusquement diminuée au fond des puits, les gaz carbonés, jusque-là maintenus dans les interstices de la houille, s'échappent et emplissent les galeries. Qu'un mineur ouvre sa lampe malgré les règlements, et le feu se communique au mélange détonant, l'explosion survient. Il est bien clair que ces circonstances peuvent se présenter sans que la pression atmosphérique ait baissé; mais la dépression du baromètre détermine une cause aggravante dont on doit facilement retrouver la trace. MM. Scott et Galloway, ingénieurs anglais, ont comparé la statistique des accidents miniers avec les courbes de température et de pression tracées par les instruments enregistreurs de l'observatoire météorologique de Stonyhurst (Lancashire), et ils ont trouvé que, sur 530 explosions enregistrées en 4 ans, 40 pour 100 pouvaient être attribuées à des perturbations barométriques, et 22 pour 100 à une température élevée, anormale, soit plus de 60 pour 100 à mettre sur le compte des changements de pression atmosphérique. Cette proportion est énorme, et l'on ne saurait trop engager les chefs d'exploitation à redoubler de sévérité et à multiplier la surveillance dans les galeries, quand le baromètre annonce de grandes perturbations atmosphériques.

## CHAPITRE XI

## BAROMÈTRES

**HISTORIQUE.** — La pesanteur de l'air étant démontrée ainsi que la différence de pression atmosphérique selon les hauteurs, on voulut trouver un instrument qui donnât le poids de l'air à diverses altitudes ou dans certaines circonstances particulières, et qui fût plus commode et surtout plus exact que le *tube de Torricelli*, destiné plutôt à mesurer la pression

atmosphérique qu'à en constater les variations, qui, en un mot, était plutôt un *baroscope* (du grec *baros*, pesanteur, et *scopeō*, j'observe) qu'un *baromètre* (du grec *baros*, pesanteur, et *metron*, mesure).

Nous résumons, d'après l'*Histoire de la physique* de M. Hoeffler, les perfectionnements successifs qui ont été apportés au *tube de Torricelli*.

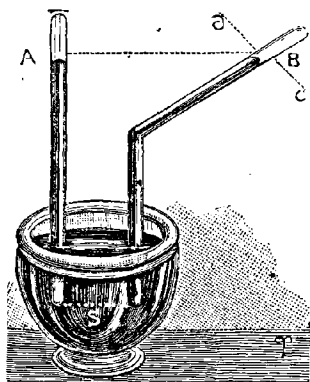


Fig. 119.

BAROMETRE DE MORLAND.

Après avoir essayé d'abord de substituer l'eau au mercure, ce qui obligeait à donner aux tubes une longueur de 32 pieds, et de les former avec diverses pièces ajustées avec des viroles, on revint à l'emploi du vif-

argent. Tout l'esprit des inventeurs se porta alors à agrandir artificiellement, pour pouvoir mieux la subdiviser, l'échelle des variations dans le tube barométrique, car la hauteur du mercure oscille dans des limites qui n'excèdent guère 12 centimètres.

A cet effet, Samuel Morland (1) imagina le *baromètre à tube coudé* (fig. 119). Si, par exemple, le mercure s'élève dans un tube droit jusqu'à A, dans un tube coudé il s'élèvera à la même hauteur en B; la distance

(1) Voici ci-après : *Acoustique*. — *Porte-voix*.



SB sera plus longue que SA; la facilité de voir le plus faible mouvement du mercure sera donc plus grande. Mais la surface du mercure dans le tube coudé est convexe (page 231). Or, à quel point, en *c* ou en *d*, faut-il



. CARDAN

marquer la hauteur barométrique. Puis, plus le tube est incliné, plus l'intérieur de ses parois oppose de résistance à la descente comme à l'élévation du mercure.

L'invention de Morland dut donc être rejetée.

En 1665, Hooke (1) proposa le *baromètre à roue* (fig. 120). C'est un tube dont le bout inférieur recourbé reçoit par son ouverture un petit poids en fer en contact avec la surface libre du mercure. Ce petit poids est suspendu à un fil dont l'autre extrémité porte un autre poids très faiblement

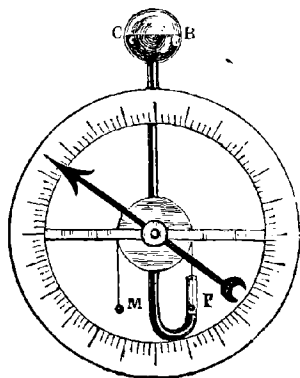


Fig. 120.

BAROMÈTRE DE HOOKE.

plus léger, de manière que le petit système, tournant autour d'une poulie mobile, se trouve *presque* en équilibre. A cette poulie est fixée une aiguille qui marque les divisions d'un cercle. On conçoit dès lors que, si, dans le bout supérieur, soufflé en boule, le mercure s'élève au-dessus du niveau CB, le petit poids descendra, et que, dans le cas contraire, il montera, faisant ainsi mouvoir l'aiguille, tantôt de droite à gauche, tantôt de gauche à droite. Un changement peu considérable du niveau dans le bout supérieur, élargi en boule, peut en produire un très considérable dans le bout inférieur, proportionnellement à la différence de leurs diamètres. Mais tout ce mécanisme, quelque ingénieux qu'il soit, ne servait à résoudre que fort incomplètement le problème proposé. Ainsi, quand, dans le bout inférieur, étroit, la surface du mercure commence à devenir convexe ou concave, c'est-à-dire quand le mercure commence à se mettre en mouvement pour monter ou pour descendre, le petit système de poids presque en équilibre n'a pas assez de force pour faire tourner la poulie qui est toujours sujette à quelque frottement, ce qui empêche l'aiguille de marquer des variations peu considérables; et lorsque la poulie se meut, les variations marquées sont un peu trop grandes. Ce baromètre fut donc aussi abandonné.

Le célèbre Huyghens essaya en 1672 d'employer le mercure concurremment avec l'eau dans la construction du baromètre; mais il constata que l'eau laisse dégager de l'air qui déprime un peu la colonne barométrique. Pour remédier à cet inconvénient, il imagina le *baromètre bitubulé* (fig. 121) [à deux tubulures]. Sur un tube

plus léger, de manière que le petit système, tournant autour d'une poulie mobile, se trouve *presque* en équilibre. A cette poulie est fixée une aiguille qui marque les divisions d'un cercle. On conçoit dès lors que, si, dans le bout supérieur, soufflé en boule, le mercure s'élève au-dessus du niveau CB, le petit poids descendra, et que, dans le cas contraire, il montera, faisant ainsi mouvoir l'aiguille, tantôt de droite à gauche, tantôt de gauche à droite. Un changement peu considérable du niveau dans le bout supérieur, élargi en boule, peut en produire un très considérable dans le bout inférieur, proportionnellement à la différence de

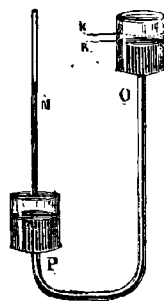


Fig. 121.

BAROMÈTRE  
BITUBULÉ  
D'HUYGHENS.

(1) HOOKE (Robert), savant géomètre anglais (1635-1703), secrétaire perpétuel et professeur de mécanique de la Société royale de Londres. S'est rendu célèbre par ses inventions relatives aux horloges, au micromètre, au microscope, etc., par ses découvertes en chimie, en astronomie, en mécanique. Il soupçonna, dit-on, avant Newton, la théorie de la gravitation et eut de vives discussions avec ce dernier auquel il contesta ses plus belles découvertes, avec Huyghens et avec Hévelius. Il a laissé de nombreux et savants ouvrages.

recourbé se fixent en O et en P deux cylindres dont le diamètre est dix fois plus grand que celui du tube. Si le mercure du cylindre supérieur descend d'une certaine quantité connue, soit de  $KK'$  à  $RR'$ , il montera de la même quantité dans le cylindre inférieur, et réciproquement. Ce dernier est surmonté d'un tube étroit ouvert, dans lequel on verse un liquide non congelable, comme l'esprit-de-vin rectifié. Ce liquide se déplacera d'une manière très sensible dans le tube étroit au moindre changement de niveau survenu dans les cylindres; on en trouvera aisément la valeur par une formule très simple. L'un des principaux inconvénients de ce baromètre vient de l'action de la température qui se fait surtout sentir sur le liquide, plus dilatable et plus vaporisable que le mercure. Mais cet inconvénient eut pour conséquence de faire pour la première fois bien comprendre la

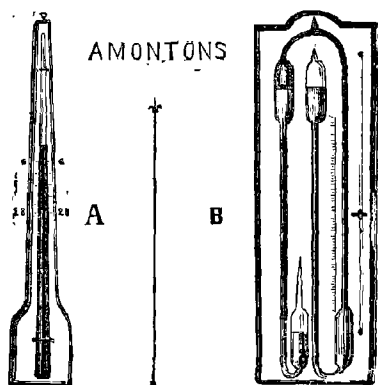


Fig. 122 et 123.

BAROMÈTRES D'AMONTONS.

nécessité de combiner les indications du baromètre avec celles du thermomètre.

D'autres physiciens entreprirent vainement de modifier ce baromètre; il fut également délaissé.

En 1693, Amontons (1) fit connaître son *baromètre de mer* (fig. 122), ainsi appelé parce qu'il avait été inventé pour l'usage spécial des marins. C'est un tuyau conique, fort étroit, dont l'ouverture inférieure, la plus large, n'a qu'une ligne de diamètre; le vide qui se trouve dans la partie supérieure suffit pour empêcher le

mercure de s'échapper par l'extrémité inférieure. Mais l'effet de la capillarité nuit beaucoup à l'exactitude de cet instrument. Le *baromètre polytubulé* (fig. 123) du même physicien était plus compliqué; mais il manquait de précision à cause des dilatations inégales des différentes matières dont il était composé.

(1) AMONTONS (Guillaume), physicien français (1663-1705). Atteint dès l'enfance d'une incurable surdité, il s'attacha avec passion à la science. Il est le véritable inventeur de la télégraphie, et nous parlerons longuement de lui ci-après. Il perfectionna tous les instruments de physique, mais son indifférence philosophique, au dire de Fontenelle, l'empêcha de faire fortune et d'occuper dans la science le rang qu'il mérite.

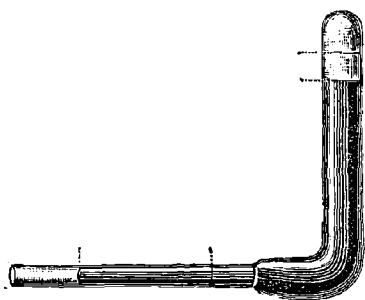


Fig. 124.

BAROMÈTRE RECTANGULAIRE.

Jean Bernoulli présenta, en 1710, à l'Académie des sciences de Paris un baromètre dont Cassini (Dominique) avait déjà indiqué le plan. Ce baromètre, dit *rectangulaire* (*fig. 124*), se compose de deux tubes de verre d'inégale grosseur, emboîtés l'un dans l'autre ; le diamètre du tube ver-

tical, plus gros, est un multiple déterminé d'avance du diamètre du tube horizontal. Il est évident que, si le mercure descend dans le premier, il se déplacera proportionnellement dans le second. Malheureusement, l'air qui s'introduisait facilement dans le petit tube donnait à cet instrument très simple un grand défaut.

De nos jours, on a pu atteindre à une grande perfection dans la construction des baromètres.

**BAROMÈTRE NORMAL.** — Ce baromètre, auquel les derniers perfectionnements ont été apportés par M. Regnault, n'est pas autre chose que le tube de Torricelli installé d'une façon permanente (*fig. 125*). On a rempli le tube de mercure chimiquement pur, et on l'a renversé dans une cuvette C pleine de mercure, puis on l'a assujéti dans une position invariable. Pour connaître à un moment précis la pression atmosphérique, il suffit de mesurer la

hauteur du sommet de la colonne de mercure au-dessus du niveau du mercure dans la cuvette. A cet effet, au-dessus de cette cuvette est une tige en fer, mobile dans un écrou, et se terminant, à ses deux extrémités, par deux pointes très aiguës. On amène la pointe inférieure jusqu'au contact du mercure de la cuvette, et alors on mesure la distance de la pointe supérieure au sommet de la colonne de mercure, en y ajoutant la longueur de la tige que l'on a mesurée une fois pour toutes. On a ainsi la hauteur barométrique.

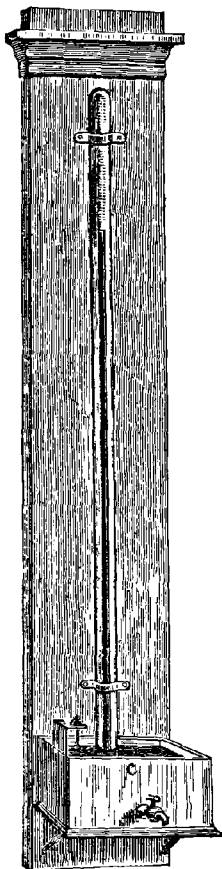


Fig. 125.

BAROMÈTRE NORMAL.

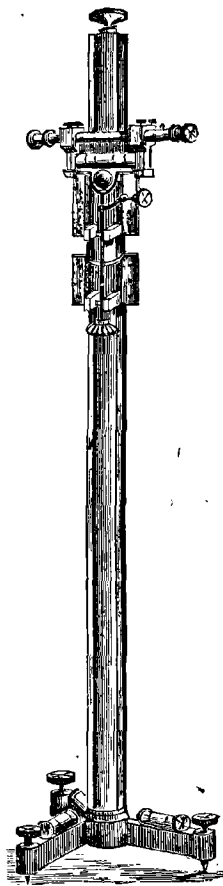


Fig. 126.

CATHÉTOMÈTRE.

Quant à mesurer exactement la distance de la pointe supérieure au sommet de la colonne de mercure, on se sert d'un instrument appelé *cathétomètre*, instrument dû à Dulong et Petit (1), et qui se compose (fig. 126) d'un cylindre creux en laiton qui tourne librement et sans jeu autour d'un axe vertical en fer, fixé sur un pied à trois vis calantes. Une longue règle, divisée en demi-millimètres, est liée au cylindre et tourne avec lui. Une lunette horizontale, portant son niveau, ses vis de rappel et ses vis de pression, peut glisser sur toute la longueur de la règle divisée. Le support de la lunette porte en outre un *vernier* (page 35), qui permet d'estimer les 25<sup>es</sup> et même les 50<sup>es</sup> de millimètre.

On se sert rarement, et seulement pour des observations très précises, de ce baromètre qui, outre l'inconvénient de ne pouvoir se transporter, exige que le mercure soit excessivement pur et très récemment bouilli pour qu'il ne contienne aucune humidité ni aucune bulle d'air; c'est dire que ce baromètre doit être préparé spécialement pour chaque expérience où son emploi est nécessaire. C'est pourquoi, pour les usages ordinaires, on a construit des instruments d'une exécution moins soignée, et qui, quelle que soit leur forme, se rapportent à deux types généraux: les *baromètres à cuvette* et les *baromètres à siphon*.

**BAROMÈTRE A CUVETTE.** — Le baromètre à cuvette se compose (fig. 127) d'un tube de verre de 0<sup>m</sup>,85 environ de longueur et de 0<sup>m</sup>,01 de diamètre extérieur, fermé par le bout supérieur, ouvert par le bout inférieur et qui, préalablement rempli de mercure, a été retourné dans une cuvette circulaire en verre, déjà en partie pleine de mercure et encastrée dans la planchette sur laquelle est fixé tout l'instrument. Le fond de cette cuvette est sphérique, plein de mercure, et le tube plonge dedans. On lui donne la plus grande largeur possible, un décimètre environ, afin de pouvoir considérer comme constant le niveau du mercure, ce qui n'est pas exact, puisque la pression atmosphérique le fait varier sans cesse, mais le mercure étant réparti sur une grande surface, cette différence de niveau peut être négligée.

La cuvette est surmontée d'une tubulure, et le tube, en la traversant, ne la bouche pas complètement; il existe un certain espace

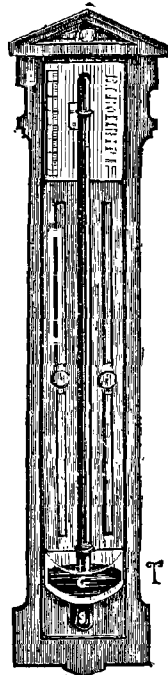


Fig. 127.

BAROMÈTRE  
A CUVETTE.(1) Voir ci-après : *Chaleur*.

entre les parois de verre des deux parties de l'instrument, de sorte que la pression atmosphérique peut se produire librement sur la surface du mercure de la cuvette et ainsi faire élever ou baisser la colonne de mercure du tube.

Dans le haut du tube est une échelle divisée en millimètres et destinée à mesurer la hauteur du mercure dans le tube, c'est-à-dire ses variations dans la portion vide du tube qui s'appelle la *chambre barométrique*. La graduation part du niveau du mercure dans la cuvette; mais, comme il eût été inutile de marquer les degrés de 0 à 0<sup>m</sup>,76, on ne commence guère qu'à 0<sup>m</sup>,56, le niveau du mercure variant seulement de quelques centimètres, à moins qu'on ne destine l'instrument à mesurer la pression atmosphérique à de grandes hauteurs.

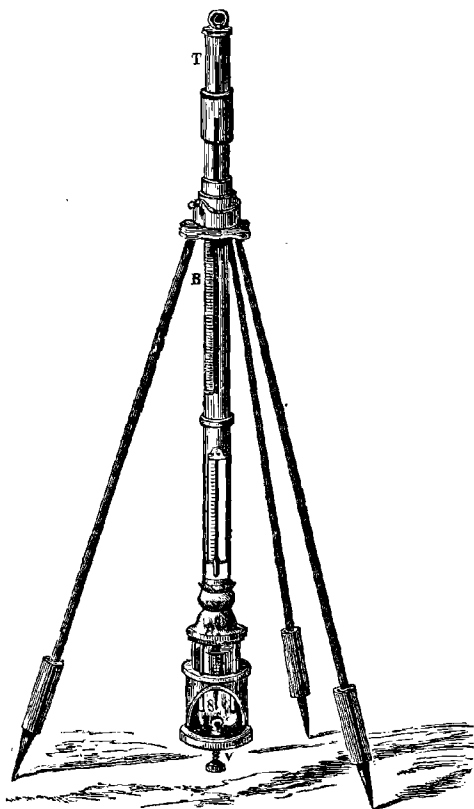


Fig. 128. — BAROMÈTRE DE FORTIN.

Une petite plaque mobile et à frottement très doux, glisse dans une coulisse parallèle au tube. A cette plaque, appelée *cursor*, est fixée une petite tige métallique horizontale qui couvre le tube sans le toucher, et qui correspond de l'autre côté de l'échelle à des inscriptions gravées sur une plaque parallèle et qui donnent,

comme nous le verrons tout à l'heure, des indications sur l'état de l'atmosphère. Enfin, un petit *thermomètre* est fixé sur la planchette à côté du baromètre.

**BAROMÈTRE DE FORTIN.** — *Le baromètre de Fortin*, le plus employé pour les observations météorologiques et le plus exact, se compose (*fig. 128*) d'une cuvette, formée elle-même : 1° d'un large tube de verre mastiqué par

(1) FORTIN (Jean), ou plutôt FROTIN (1719-1796), dont déjà nous avons signalé les instruments dus à son génie inventif (pages 34 et 147), était professeur d'hydrographie à Brest, puis constructeur d'instruments à Paris.

le haut dans un couvercle de bois doublé de cuivre; ce tube laisse passer le tube barométrique T; 2° d'une lanterne cylindrique en verre, mastiquée à ses deux bouts; 3° d'un cylindre de buis formé de deux bagues vissées l'une sur l'autre, dont l'une permet tout à la fois de visser le grand cylindre B qui termine la cuvette, et de rattacher cette partie inférieure au couvercle supérieur au moyen d'une longue vis, et l'autre sert à fixer la peau de chamois S qui sert de réservoir au mercure. Le fond du cylindre inférieur de cuivre est d'ailleurs traversé par une vis ascendante V qui relève ou abaisse à volonté la poche en peau de chamois contenant le mercure. Cette disposition a pour but de ramener la surface du mercure dans la cuvette à un niveau constant. A cet effet, le couvercle supérieur est percé d'un trou latéral, qui donne accès à une pointe d'ivoire O, invariablement fixée et dont l'extrémité marque le zéro de l'échelle.

Le tube du baromètre est effilé en pointe à son extrémité qui plonge dans la cuvette; une peau de chamois lie ce tube au tube central qui en surmonte le couvercle. Cette peau la ferme ainsi, tout en permettant à l'air de circuler librement. Le tube est garanti des chocs par une gaine cylindrique de cuivre, qui porte l'échelle, divisée en millimètres, servant à mesurer la hauteur du mercure. Cette gaine est coupée longitudinalement par deux fentes opposées, à travers lesquelles on voit le sommet du mercure. Entre le tube et la gaine se meut un curseur annulaire, formé de deux anneaux reliés entre eux: l'un est un vernier, permettant de lire les fractions de millimètre, qui glisse le long de l'échelle; l'autre porte un bouton auquel est fixé une roue dentée engrenant avec une crémaillère découpée dans le bord de la fente (*fig. 129*). Pour faire la lecture, on amène le bord inférieur de l'anneau-vernier à affleurer la partie supérieure de la surface du mercure, bombée par le fait de la capillarité. La pression atmosphérique s'exerce sur le mercure de la cuvette, car la gaine de laiton est séparée du tube par de petits morceaux de liège; elle communique avec la peau de chamois qui fixe le tube à la cuvette; les pores de cette peau sont assez larges pour être perméables aux gaz.

Il est évidemment indispensable que l'échelle et l'axe du baromètre soient dans une direction rigoureusement verticale. On obtient ce résultat en attachant l'instrument à une *suspension de Cardan* (1). Le tube est

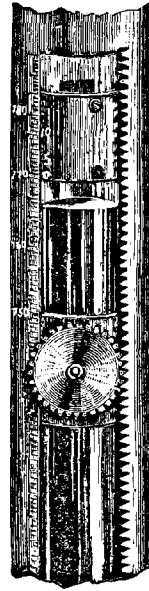


Fig. 129.  
VERNIER  
DU BAROMÈTRE  
FORTIN.

(1) CARDAN (Jérôme), savant mathématicien italien (1501-1576), auquel on doit une méthode

placé au centre de deux cercles concentriques ; le plus grand de ces cercles est supporté par trois pieds reposant sur le sol ; le second est soutenu à l'intérieur du premier par deux tiges opposées, autour desquelles il peut tourner ; enfin le tube est maintenu, dans le haut, par deux vis horizontales opposées l'une à l'autre, ayant leur écrou dans le deuxième anneau, de sorte que le tube peut prendre un mouvement autour de l'axe formé par les deux vis ; mais cet axe est perpendiculaire à celui autour duquel tourne l'anneau supérieur. Le tube, qui peut se déplacer dans deux directions rectangulaires entre elles, se placera toujours de façon que son centre de gravité soit dans la verticale du centre de suspension, c'est-à-dire sur l'axe même, et il sera ainsi toujours vertical :

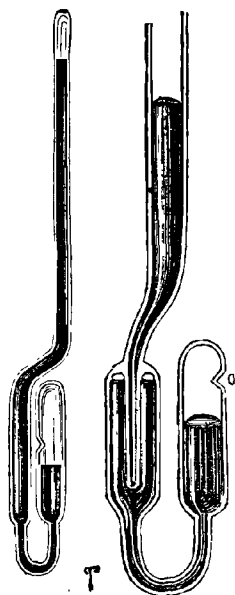


Fig. 130.

BAROMÈTRE A SIPHON.

Pour transporter le baromètre, on a soin de remplir la chambre barométrique en y faisant remonter le mercure au moyen de la vis V, afin d'éviter que le choc du mercure contre la paroi ne brise le tube, puis on l'enferme dans un étui.

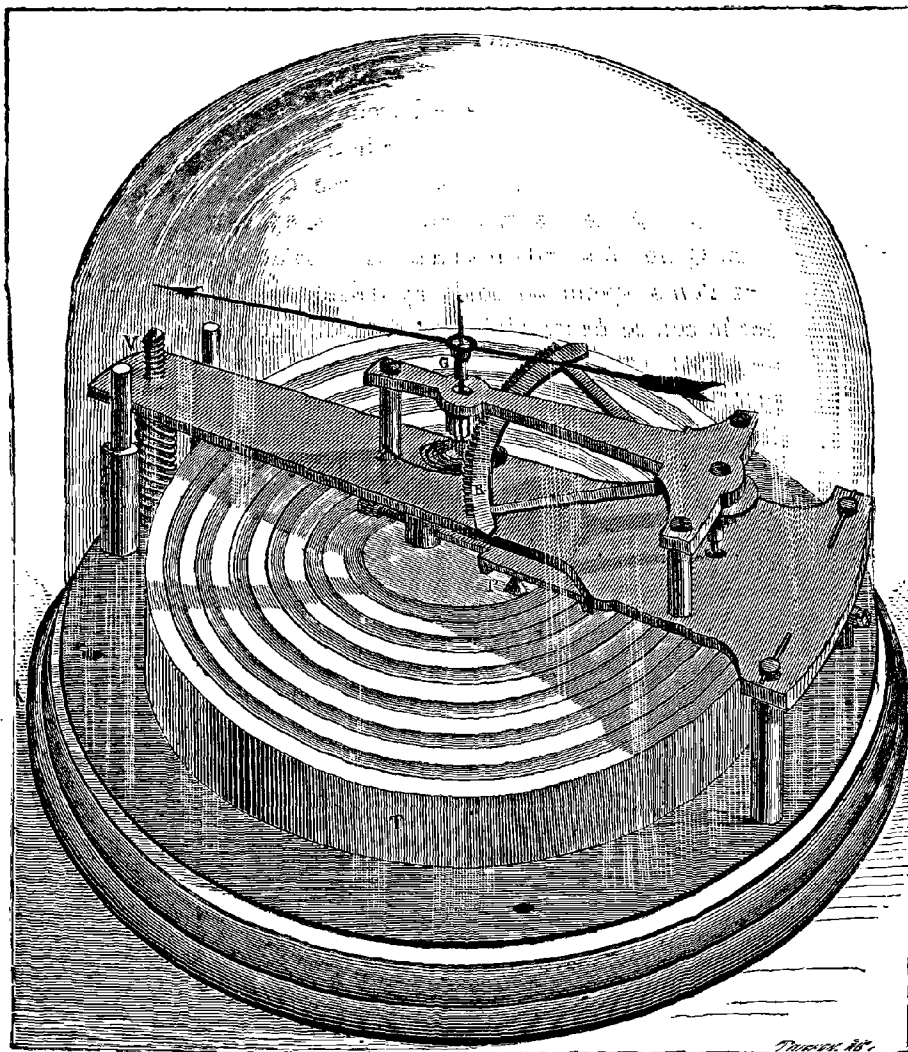
**BAROMÈTRE A SIPHON.** — Gay-Lussac construisit un baromètre beaucoup plus simple et beaucoup plus portatif que celui de Fortin, et cependant moins usuel, parce que, par suite de l'altérabilité très grande du mercure au contact de l'air, des erreurs de capillarité existent que l'on ne peut corriger. Il est vrai que l'erreur due à la capillarité qui déprime le niveau du mercure dans les tubes étroits diminue rapidement avec des tubes de plus gros calibre, et qu'elle est presque nulle quand le diamètre du tube est égal à 30 millimètres ; mais, avec ces dimensions, le baromètre n'est plus guère transportable. Le baromètre à siphon, inventé par Gay-Lussac, perfectionné par M. Buntén, a précisément pour but cependant d'être à l'abri de toute erreur capillaire, en restant commode à emporter en voyage.

Il se compose (*fig.* 130) de deux branches inégales en longueur, mais

pour résoudre les équations algébriques, appelée *formule de Cardan*. Esprit singulier, il joignait à une science profonde une imagination déréglée, croyait à la magie, se disait magicien lui-même et prétendait devoir à ses connaissances occultes les cures médicales merveilleuses qu'il accomplit en Italie, en France et en Angleterre. Sa vie privée fut désordonnée, et, comme fit plus tard J.-J. Rousseau, il publia une histoire de sa vie dans laquelle il étale cyniquement ses vices. On raconte qu'ayant prédit l'époque de sa mort, il se laissa mourir de faim pour ne pas recevoir un démenti. Quoiqu'il professât l'athéisme, le pape lui faisait une pension.



d'un diamètre rigoureusement égal; la plus grande est fermée et la plus courte porte une ouverture conique O très étroite. Elles sont unies par un tube capillaire, destiné à empêcher l'air de passer dans la *chambre*



Baromètre anéroïde de Vidie,  
Construit par M. REDIER, 8, cour. des Petites-Écuries, à Paris (page 270).

*barométrique* quand on renverse l'instrument. M. Buntén a même ajouté le gros tube soudé à la grande branche, dans lequel celle-ci se prolonge en forme de pointe effilée, de sorte que, si une bulle d'air pénétrait, elle irait se loger au sommet du gros tube plutôt que dans la grande branche.

Ce perfectionnement a l'inconvénient d'enlever beaucoup de solidité à l'appareil.

La hauteur de la colonne de mercure qui fait équilibre à la pression atmosphérique est la distance verticale des deux niveaux. On la mesure à l'aide d'une échelle dont le zéro donne la hauteur barométrique.

Ce baromètre se place, comme le baromètre à cuvette, sur des planchettes de bois ou dans des étuis, afin de le transporter facilement. Souvent aussi on l'entoure d'une gaine métallique qui porte deux échelles divisées, l'une ascendante, l'autre descendante, ayant même zéro vers le milieu du tube. Quand il s'agit de s'en servir, on l'attache à la suspension de Cardan, et l'on suspend un poids cylindrique à sa partie inférieure, afin d'amener le centre de gravité dans l'axe de figure.

**CONSTRUCTION DES BAROMÈTRES.** — Pour qu'un baromètre, soit à siphon, soit à cuvette, donne des indications précises, il est nécessaire que sa construction ait été faite avec le plus grand soin. D'abord le tube doit être bien droit, régulier dans toute sa longueur, et exempt de bulles et de stries; car, sans cela, la forme de la surface terminale du mercure ne serait pas la même, quelle que soit la hauteur du liquide. On le lave ensuite à l'acide azotique bouillant, on le rince à l'eau distillée, on le sèche, on le ferme à un bout et on souffle à l'autre extrémité une ampoule qui se termine en pointe effilée. On remplit le tube de mercure chimiquement pur, c'est-à-dire débarrassé de tous les métaux étrangers qu'il peut contenir, et, pour cela, on l'a fait digérer d'abord dans de l'acide azotique, on l'a lavé à grande eau, puis séché avec du papier buvard. Sur les tubes de verre, il y a toujours une couche d'air et d'humidité adhérente aux parois intérieures ou extérieures; sous la pression ordinaire de l'atmosphère, cette couche abandonne difficilement le verre; mais, dans le vide barométrique, où il n'y a pas de pression, elle se mélange avec le mercure; il faut la chasser. Pour cela, on place le tube, l'extrémité ouverte en haut, sur une grille de fer inclinée; on approche des charbons ardents, on promène avec une pince un de ces charbons incandescents le long du tube jusqu'à ce que l'ébullition se manifeste. Le mercure se dilate, une portion envahit l'ampoule, il prend un aspect mat, et l'air et l'humidité sont complètement entraînés par les vapeurs du mercure qui se dégagent. La surface du mercure devient alors brillante, les bulles d'air humide se sont logées dans l'ampoule; on brise alors cette ampoule et on renverse le tube dans la cuvette. Si le baromètre est bien purgé, le mercure, frappant l'extrémité du tube,

rend un coup sec et métallique ; mais le coup est sourd si quelque reste d'air ou d'humidité amortit le choc.

**BAROMÈTRE A CADRAN.** — Le baromètre de Hooke, de 1665, que nous décrivons ci-dessus, est devenu le *baromètre à cadran*, moins rigoureusement exact que les autres, à cause des frottements, et néanmoins plus répandu, surtout dans les appartements, parce qu'il donne des indications très apparentes. C'est simplement un baromètre à siphon, placé derrière un cadran sur lequel se meut une longue aiguille, dont les mouvements correspondent à ceux de la colonne de mercure (*fig. 131*). Un flotteur est placé sur le mercure de la branche ouverte et est relié par un fil à la gorge d'une poulie. Un autre fil enroulé parallèlement au premier supporte un poids qui fait équilibre au flotteur. A l'axe de la poulie est fixée l'aiguille qui remonte ou descend, entraînée par l'aiguille que met en mouvement l'action du contrepoids. Dans quelques baromètres à cadran, la poulie est remplacée par une petite roue dentée qui engrène avec une crémaillère fixée verticalement au flotteur. Un thermomètre est généralement placé sur l'appareil.

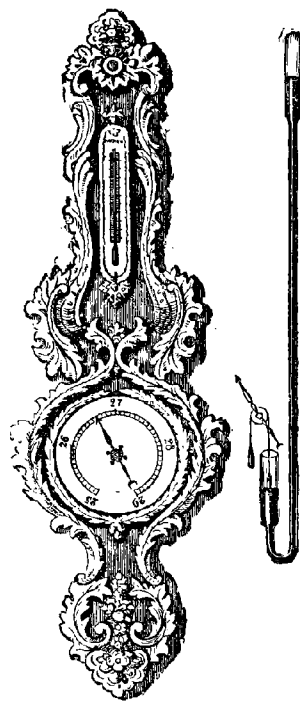


Fig. 131.

BAROMÈTRE A CADRAN.

**BAROMÈTRE-BALANCE.** — Ce baromètre, dont l'idée première est due à Samuel Morland, a été perfectionné par le P. Secchi, et est employé par lui comme *barométographe*, c'est-à-dire comme appareil enregistreur automatiquement les indications barométriques.

Nous extrayons de la lettre du P. Secchi, adressée en 1857 à l'Académie des sciences de Paris, la description de ce baromètre enregistreur.

« Supposez que nous ayons un baromètre à cuvette dont le tube ait un diamètre assez grand (par exemple, 15 millimètres), que la cuvette soit placée sur une table et que le tube cylindrique soit disposé de manière à pouvoir être élevé en le prenant à la main : on peut se demander quel sera l'effort nécessaire pour soulever ce tube. Le fait et le raisonnement prouvent qu'il faudra exactement faire un effort égal à celui qui est exercé par l'atmosphère sur le mercure de l'instrument ; c'est-à-dire qu'il

faudra soulever le poids du mercure renfermé dans ce tube. Voici donc une manière très simple de peser réellement la pression de l'atmosphère, qui consiste à attacher le baromètre à l'un des plateaux d'une balance et à placer des poids dans l'autre ; il est évident que, à tout changement de pression, il faudra faire une correspondante variation dans les poids du second plateau. Il va sans dire que, lorsqu'on veut obtenir la valeur de la pression absolue sur l'unité de surface, il faudra tenir compte du poids du tube, de la portion de poids que perd la portion immergée dans le mercure, et surtout de la section intérieure du tube.

» Mais la nécessité de connaître le diamètre intérieur du tube, qui paraît, au premier abord, un inconvénient, est, au contraire, un avantage immense de la construction actuelle ; car, en augmentant la section de ce tube, on peut accroître autant qu'on veut la force qui agit sur l'instrument. Supposons un tube dont la section soit de 10 centimètres carrés, et que la pression varie de 1 centimètre de hauteur ; le poids total à ajouter au second plateau sera de 10 centimètres cubes de mercure, c'est-à-dire 135 grammes, tandis qu'il serait seulement de 13<sup>es</sup>, 5 si le tube avait une section de 1 centimètre carré.

» On verra donc l'avantage qu'on peut tirer de cela pour la sensibilité de l'instrument.

» Cela bien compris, voici la nouvelle construction de l'appareil : elle consiste simplement à attacher le tube barométrique librement au bras d'un levier quelconque, comme une balance, une romaine ou autre machine à peser ; mais, pour se débarrasser du trouble de peser chaque fois, à chaque observation, surtout pour les observations différentielles, on pourra attacher au levier une aiguille plus ou moins longue, qui, se mouvant sur une échelle graduée, donnera très facilement à l'œil les variations de pression. J'en ai fait construire un à l'Observatoire, dont le tube a 15 millimètres de diamètre. C'est une espèce de balance romaine, au bras court de laquelle est suspendu le tube, qui est balancé de l'autre côté par un contrepoids ; une longue lame de verre servait d'abord d'index ; mais plus tard j'ai fixé, au-dessus du couteau de suspension, un miroir dans lequel je regarde l'image d'une échelle graduée, placée à distance. La variation d'un dixième de ligne est accusée par un mouvement de l'image de 6 lignes, et on pourrait faire encore davantage.

» Voici deux mots sur les avantages de ma construction.

» 1° Puisque la pression est pesée et non mesurée par la hauteur de la colonne mercurielle, on pourra faire le tube d'une matière quelconque, et surtout en fer, qui ne s'amalgame pas ; l'instrument ne sera donc plus si fragile qu'il l'a été jusqu'ici, et si l'on veut retenir le verre, on pourra

employer toute sorte de tubes, pourvu seulement que leur diamètre soit constant dans l'espace de l'excursion barométrique.

» 2° Comme en augmentant la section du tube on augmente la force et le poids, on pourra donc employer ce poids comme une force motrice pour mouvoir un crayon attaché au bras du levier, et ainsi faire marquer ses variations sur un papier en mouvement, sans aucune difficulté, car le mouvement résistant peut être vaincu par l'excès de force motrice.

» 3° Il est clair que, à l'aide de leviers et d'engrenages, on pourra, sans inconvénient, sans nuire à la précision nécessaire, augmenter l'échelle des observations; un tube même de baromètre ordinaire, à 5 millimètres de diamètre, attaché à un rouage délicat de montre ordinaire, a produit des effets très grands et parfaitement sûrs. Mais, pour des observations exactes, l'usage du miroir sera toujours préférable.

» 4° La nouvelle construction est indépendante de la forme du ménisque, de la pureté du mercure, de son poids spécifique, de la température et de la différence de gravité aux différentes latitudes; car toutes ces quantités ont une influence sur le volume du mercure et sur la hauteur de la colonne, qu'on doit mesurer pour obtenir son poids; et ici le poids est donné immédiatement. Si l'on emploie un tube en fer, on n'aura pas, autant qu'avec le verre, à craindre l'adhérence de l'air et de l'humidité, et l'on pourra faire bouillir très facilement le mercure, sans danger de rupture.

» 5° En faisant le tube en fer, on aura l'avantage de le pouvoir transporter sans danger; et, avec des détails de construction faciles à imaginer, on pourra avoir un instrument très sûr, et même portatif, pour la mesure des hauteurs.

» 6° La difficulté des tubes en verre a empêché jusqu'ici de faire des baromètres avec d'autres liquides que du mercure; on pourra désormais en faire avec l'eau ou avec d'autres liquides, et peut-être l'expérience en pourra montrer des avantages réels.

» Le baromètre que j'ai fait ainsi construire fonctionne très bien, et j'ai déjà remarqué que ses indications avancent toujours en temps sur celles d'un baromètre ordinaire, comme il est bien connu qu'il arrive avec les baromètres les plus parfaits. En ayant soin d'éviter les frottements dans la construction, on peut obtenir un instrument exact qui, modifié selon les besoins, pourra servir aux voyageurs et aux marins mieux que les baromètres actuels ou les anéroïdes, qui sont si bizarres et incertains. »

Perfectionné depuis, ce baromètre est devenu un *météorographe enregistreur*. Nous en reparlerons en même temps que de ceux de MM. Wheat-

stone, Ronalds, etc., qui ont appliqué à ces appareils météorologiques l'électricité et la photographie.

Nous nous contentons ici de donner la description du baromètre-balance le plus simple.

Le tube barométrique (*fig. 132*) en fonte est terminé à sa partie supérieure par un renflement, dans lequel se trouve l'extrémité de la colonne mercurielle.

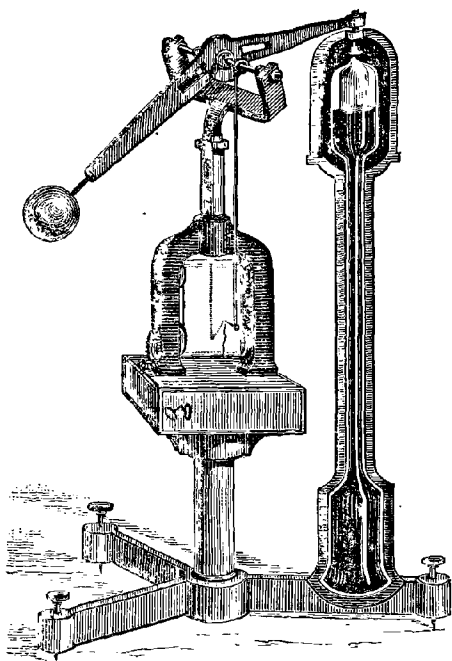


FIG. 132. — BAROMÈTRE-BALANCE.

Il est fixé à l'extrémité d'un levier très mobile, autour d'un axe, et supporte un contrepoids à son autre extrémité. Une grande aiguille, dont les oscillations sont évidemment liées aux oscillations du tube barométrique, porte un crayon qui trace ces oscillations sur un papier, animé d'un mouvement vertical à l'aide d'un mouvement d'horlogerie.

**BAROMÈTRES MÉTALLIQUES OU ANÉROÏDES.** — Ce genre de baromètres, inventé en 1847 par M. Vidie, est fondé sur les modifications de forme qu'un vase de métal, à parois très minces, dans lequel on a fait le vide, éprouve par suite de la pression atmos-

phérique. De plus en plus perfectionné, cet instrument se compose aujourd'hui (page 265) d'une boîte métallique T, dont la surface supérieure est plissée pour multiplier les points où s'exerce la pression. Au centre de la boîte existe une pointe en fer P qui agit sur une palette dont le mouvement est transmis à un râteau R. Ce râteau engrène avec un pignon placé au centre et qui supporte une aiguille G. Une vis de rappel V règle la position de l'aiguille et sert à la mettre au point convenable. Sous l'action de la pression atmosphérique, la boîte s'élève ou s'abaisse, et le râteau, conduit par la palette, tourne et fait tourner l'aiguille sur un cadran qui porte un nombre de divisions en rapport avec la sensibilité qu'on veut obtenir. On en fait de petits comme une montre de poche, et on peut atteindre facilement de grandes dimensions.

M. Bourdon a donné aux anéroïdes la forme d'un tube en laiton *a d*

(fig. 133) à parois très minces, contourné en croissant, dans lequel le vide est fait et qui est fixé en M à la boîte qui le renferme. Les deux extrémités libres s'articulent au moyen de deux petites bielles *ab*, *cd*, et d'un ressort avec une tige mobile portant à son extrémité un arc denté *mn*, qui engrène dans une roue dentée, laquelle supporte une longue aiguille mobile sur un cadran divisé. Quand la pression atmosphérique augmente, le tube se recourbe davantage, ses extrémités se rapprochent, l'aiguille marche de gauche à droite; si elle diminue, le tube, en vertu de son élasticité, revient à sa position première, entraînant l'aiguille de droite à gauche.

Les *anéroïdes*, qui présentent de grands avantages de solidité et de facilité de transport, ont le tort de ne donner généralement que des indications peu rigoureuses.

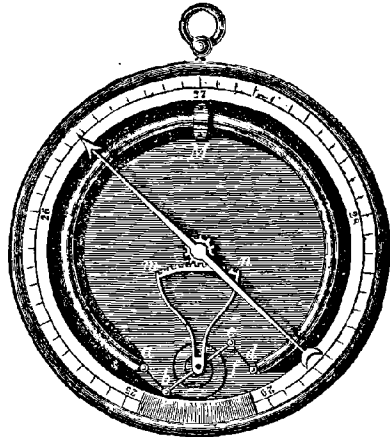


Fig. 133.

BAROMÈTRE ANÉROÏDE DE BOURDON.

**USAGES DU BAROMÈTRE. —**  
**1° INDICATION DU TEMPS. —** Le baromètre s'emploie pour l'indication du temps et pour la mesure des hauteurs.

Dès les premiers temps de sa découverte, on avait remarqué que, quand il va pleuvoir, le baromètre baisse, et qu'il s'élève quand le beau temps approche; mais, jusqu'en 1715, on ignora la cause de ces variations et on l'attribuait à la vapeur d'eau mêlée à l'atmosphère. Ce fut seulement à cette époque que de Mairan (1), de Béziers, indiqua le *poids relatif* de l'atmosphère comme la cause des variations barométriques. En effet, si le *poids absolu* d'un corps ne peut varier, son *poids relatif* se modifie à l'infini sous l'action d'une force quelconque. Ainsi une boule roulant sur une table unie y pèse moins que lorsqu'elle reste immobile. De même l'atmosphère agitée est plus légère, tandis que, au moment de la pluie, elle est presque immobile et partant plus lourde.

Cette opinion fut généralement adoptée.

Cependant, depuis que le réseau télégraphique s'est développé à la surface de l'univers, on a pu organiser un service de correspondance

(1) MAIRAN (J.-J. DORTOUS DE), physicien et littérateur (1678-1771), succéda à Fontenelle comme secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. On lui doit de nombreux travaux sur la physique et les mathématiques, entre autres un procédé de jaugeage des vaisseaux, qui fut accueilli par l'Académie et sanctionné par le roi.

entre les points qui ont été choisis comme stations météorologiques, et deux faits ont apparus :

1° Les oscillations barométriques sont d'une régularité parfaite sous l'équateur, et de plus en plus irrégulières avec la hauteur du pôle ou la latitude des lieux. M. Alexandre de Humboldt (1) a démontré cette régularité dans les régions équinoxiales. La colonne mercurielle y a une hauteur moyenne de 758 millimètres ; elle atteint 767 millimètres vers le 35° degré, dans le détroit de Gibraltar, dans l'île de Chypre, à Téhéran (Perse), à Caboul (Afghanistan), à Yeddo (Japon). A Paris, la hauteur moyenne atteint 756<sup>mm</sup>,6 ; à Königsberg, 760<sup>mm</sup>,9 ; à Berlin, 758<sup>mm</sup>,6 ; à Lima, 681<sup>mm</sup>,9 ; à l'hospice du mont Saint-Bernard, 563 ; au Spitzberg (75°), elle est remontée à 768 millimètres.

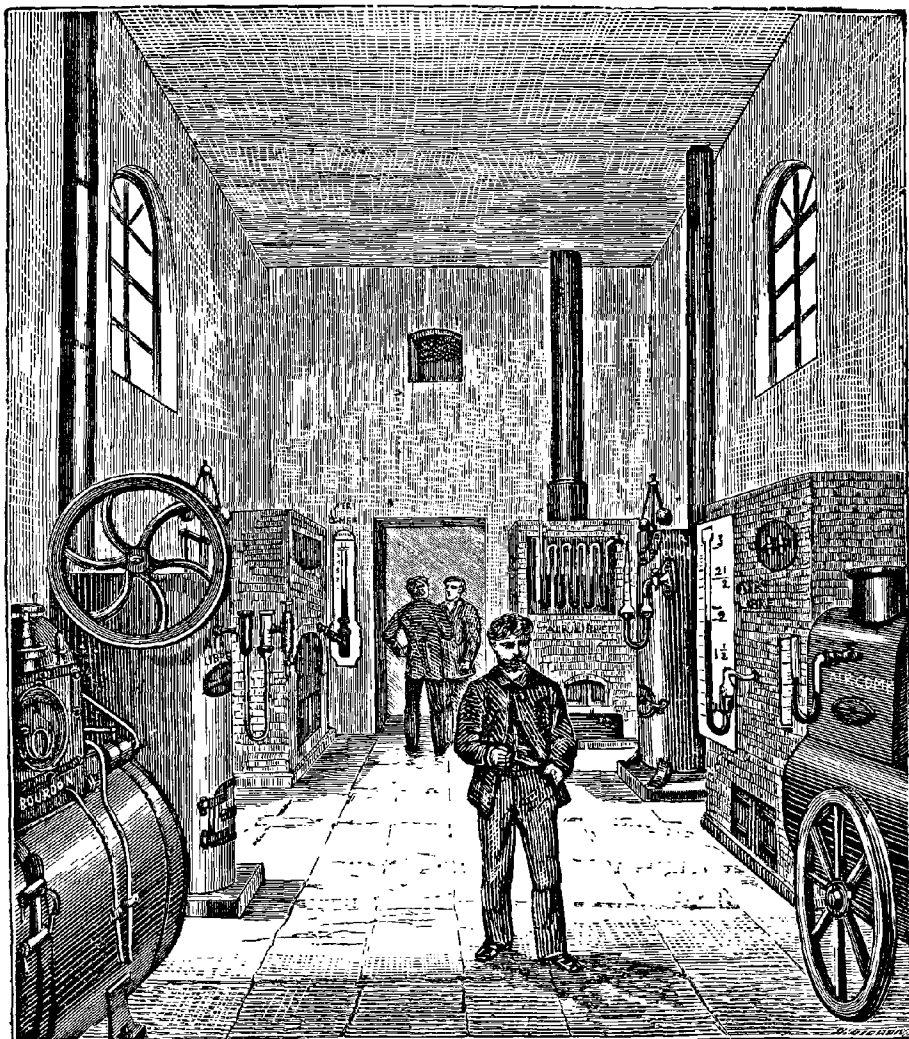
Tous les lieux situés sur un même parallèle ne supportent pas la même pression ; on attribue cette différence aux climats ou à la forme variable des continents. En unissant par des traits les points qui correspondent à une même pression, on obtient des courbes, appelées lignes *isobarométriques* (de *isos*, égal, et *baromètre*), qui ne se fondent pas tout à fait avec les parallèles. Ces courbes, imaginées par Kaemtz, « indiquent, dit M. Élisée Reclus, la véritable latitude pour les mouvements généraux de l'atmosphère. En dépit de l'extrême mobilité des airs, en dépit des vagues de tempête qui se déroulent avec fureur de l'un ou l'autre point de l'horizon et troublent pour un moment la régularité des phénomènes atmosphériques, ces lignes maintiennent d'année en année leur direction moyenne, indices des troubles de l'air ; elles montrent, par leur permanence et leur régularité, combien ces troubles dépendent eux-mêmes des grandes lois qui régissent la planète. ».

2° Dans nos contrées, la colonne mercurielle oscille d'une façon presque continuelle, suivant la direction du vent, le plus ou moins d'humidité contenue dans l'air. Ces variations ont lieu également selon les mois, les saisons. Généralement, la pression va en diminuant de janvier à juin, puis en augmentant de juin à janvier ; le baromètre baisse encore par les vents

(1) HUMBOLDT (Alexandre, baron de), savant prussien (1769-1859), d'abord ingénieur des mines, se livra à de nombreux voyages scientifiques, entre autres en Amérique, où il résida cinq années, et dans l'Asie septentrionale. Il en rapporta de magnifiques collections dont s'emparèrent les Anglais et qui ornent encore les galeries du Musée britannique. Ses travaux en anatomie, en zoologie, en chimie, en physique, en géologie sont immenses ; néanmoins, il n'occupa, en toutes ces sciences, que le second rang, après les Lavoisier, les de Jussieu, les Arago, etc. C'est surtout un vulgarisateur, et son grand ouvrage le *Cosmos* est surtout le récit des découvertes des autres, certifiées par ses propres expériences. Il s'est occupé spécialement du magnétisme terrestre, et nous parlerons de ses travaux. La Prusse lui doit de magnifiques établissements scientifiques, entre autres l'observatoire magnifique de Charlottenbourg, dans lequel le cuivre, substitué partout au fer et à l'acier, empêche toute erreur dans les observations.



du sud et monte par les vents du nord. Il existe peu, en physique, de phénomènes aussi obscurs dans leur origine que celui de ces variations ; jusqu'à présent elles n'ont pas été suffisamment expliquées.



Principaux manomètres employés dans l'industrie.

Il y a donc à tenir compte de ces faits quand on veut connaître d'avance les variations atmosphériques. Ceci établi, voici quelle est la marche météorologique du baromètre :

1° Le mercure qui monte et descend beaucoup annonce changement

de temps. En général, les différentes inconstances du mercure dénotent les mêmes inconstances que le temps.

2° La descente du mercure n'annonce pas toujours de la pluie, mais du vent. Les vents, en rassemblant ou dispersant les vapeurs aqueuses et les nuages, augmentent ou diminuent la masse de l'atmosphère; ils doivent donc, suivant leur nature, faire monter ou baisser le baromètre, et cet instrument annonce autant la différence des vents que de la pluie ou de la sécheresse; de là la règle suivante :

3° Le mercure descend plus ou moins suivant la nature des vents; le mercure baisse moins lorsque le vent est *nord, nord-est et est*, que pendant tout autre vent. Les vents froids sont ceux qui règnent dans les basses régions, les seuls que nous puissions sentir; ils condensent l'air et le rendent plus propre à supporter les nuages. A l'égard des vents qui règnent dans les régions supérieures, ils ont un effet contraire, parce qu'ils font refluer les nuages vers la terre.

4° Lorsqu'il y a deux vents en même temps, l'un près de la terre, l'autre dans les régions de l'atmosphère, si le vent le plus haut est *nord* et que le vent le plus bas soit *sud*, il survient alors quelquefois de la pluie, quoique le baromètre soit alors très haut; si, au contraire, c'est le vent du sud qui est le plus élevé et le vent du nord le plus bas, il ne pleuvra pas, quoique le baromètre soit très bas. Dans le premier cas, les nuages sont condensés, et l'atmosphère qui les soutient est raréfiée; l'équilibre est donc rompu, et l'air ne peut plus soutenir les nuages; dans le second, les nuages sont raréfiés, et l'air qui les soutient est condensé; il soutiendra d'autant mieux les nuages.

5° Pour peu que le mercure monte et continue à s'élever, après ou pendant une pluie abondante et longue, il y aura du beau temps.

6° Le mercure qui descend beaucoup, mais avec lenteur, indique continuation de temps mauvais ou inconstant; quand il monte beaucoup et lentement, il présage la continuation du beau temps. Dans ces deux derniers cas, la condensation et la raréfaction des nuages, l'élévation des vapeurs est graduelle, uniforme et lente, et l'atmosphère, par conséquent, ne s'allège et ne se charge qu'au bout d'un long temps.

7° Le mercure qui monte beaucoup et avec promptitude annonce que le beau temps sera de courte durée; quand il descend beaucoup et promptement, c'est une indication pareille pour le mauvais temps. La raison contraire de la règle précédente donne l'explication de celle-ci.

8° Quand le mercure reste un peu de temps au variable, le ciel n'est ni serein ni pluvieux, il ne fait ni beau ni mauvais; mais alors, pour peu que le mercure descende, il nous annonce de la pluie ou du vent; si,

au contraire, il monte, ne fût-ce que de très peu, on a lieu d'espérer du beau temps. Le conflit qui s'est opéré entre les nuages et l'air qui les soutient fait rester le mercure invariable ; mais quand il remonte ou descend, c'est qu'il s'est opéré des changements, qui, s'ils ne sont pas trop considérables, doivent détruire le temps ou beau ou mauvais ; car, s'ils étaient violents, ils ne dureraient pas.

9° Dans un temps chaud, la descente du mercure prédit le tonnerre quand elle est considérable ; si elle est très petite, il y a encore du beau temps à espérer. Les grands changements qui s'opèrent par la condensation des nuages et l'allègement de l'atmosphère causent des agitations qui électrisent les nuages et enflamment les substances gazeuses qui se sont élevées, par la chaleur, à différentes distances ; de là le tonnerre et les météores ignés qui se rapportent à ce terrible phénomène. On ne doit pas être étonné que, dans les tremblements de terre, lorsque l'air est rempli d'exhalaisons chaudes qui s'élèvent du sein de la terre échauffée et qui se crevasse, le baromètre descende au plus bas degré ; l'air est alors très raréfié, et comme il ne soutient plus les nuages, il tombe souvent des pluies considérables ; il se forme des vents ; des tempêtes violentes agitent et soulèvent les flots des fleuves et des mers voisines.

10° Quand le mercure monte en hiver, cela annonce de la gelée ; descend-il un peu sensiblement, il y aura un dégel ; monte-t-il encore hors de la gelée, il neigera. C'est ordinairement le vent du nord qui, en hiver, fait monter le mercure ; il y aura donc du froid, et par conséquent de la gelée. Le vent du sud, au contraire, le faisant descendre, amènera du dégel. Si les nuages se condensent et tombent durant la gelée, ils se résoudront en pluie que le froid convertira en neige ; mais, comme nous l'avons déjà remarqué, ce mouvement des nuages fera hausser la colonne de mercure.

Telles sont, en général, les règles de conjectures sûres que l'on a tirées par des observations exactes de la marche du baromètre, et que nous empruntons à un recueil de sciences ; tous les autres cas dépendent de ceux que nous indiquons et peuvent y être facilement ramenés.

**USAGES DU BAROMÈTRE. — 2° MESURE DES HAUTEURS.** — Puisque la hauteur du mercure diminue dans le baromètre à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il semble d'abord qu'il soit très facile de mesurer les hauteurs. La densité de l'air étant 10,464 fois moindre que celle du mercure, chaque dépression d'un millimètre de la colonne barométrique correspondrait à une hauteur de 10<sup>m</sup>,464, de sorte qu'il suffirait de multiplier ce nombre par le nombre de millimètres dont se serait abaissé le mercure

d'un baromètre transporté dans un lieu pour connaître la hauteur verticale de ce lieu. Ce résultat serait très inexact, parce que la densité de l'air diminue très rapidement avec la hauteur, par suite de l'excessive compressibilité de l'air. Le calcul de la mesure des hauteurs par le baromètre repose sur des formules analytiques très compliquées.

La plus célèbre de ces formules est celle de Laplace, dont l'expérience a vérifié l'exactitude approchée dans le cas où la hauteur à mesurer n'excède pas 6,000 mètres; mais, plus ordinairement, on se sert de la formule due à M. Babinet :

Appelant  $Z$  la différence de niveau entre deux stations,  $H$  la hauteur barométrique et  $T$  la température à la première station,  $h$  la hauteur barométrique et  $t$  la température à la seconde station, la formule s'écrit :

$$Z = 16,000 \left[ 1 + 0,002 (T + t) \right] \frac{H - h}{H + h}.$$

Il y a quelques années, deux savants, M. le colonel Laussedat et M. Maugin, en ont fait connaître une autre plus simple, destinée à servir surtout pour les reconnaissances militaires ou les promenades topographiques d'écoliers, et bonne seulement jusqu'à une altitude de 1,600 à 1,700 mètres. Cette formule est, en nous servant des mêmes lettres que ci-dessus :

$$Z = (H - h) \left[ 22^m, 63 - 0,008 (H + h) \right] \left[ 1 + \frac{2(T + t)}{1000} \right].$$

Quelques précautions sont indispensables pour observer le baromètre Fortin, le plus généralement employé, comme nous l'avons dit; nous reproduisons l'instruction suivante, émanée de l'Observatoire de Paris :

Lorsqu'on veut observer le baromètre, on commence par lire la température du thermomètre attaché à l'instrument, puis on fait affleurer exactement la surface du mercure à l'extrémité inférieure de la pointe d'ivoire en relevant ou baissant la peau de chamois au moyen de la vis qui la soutient. Quand le mercure est trop bas, on aperçoit un intervalle éclairé entre la pointe et son image réfléchie par le mercure; quand il est trop haut, on aperçoit le bourrelet formé autour de la pointe qui plonge dans le mercure.

L'affleurement étant obtenu, on donne avec le doigt quelques petits chocs à l'instrument pour vaincre l'adhérence du mercure au verre et pour rendre à la capillarité dans le tube sa valeur normale.

On fait ensuite mouvoir le curseur du tube barométrique jusqu'à ce que l'œil, placé dans le plan des bords antérieur et postérieur du bas du vernier, cesse

d'apercevoir un trait lumineux continu entre ces bords et le sommet arrondi du mercure. Le curseur ne doit pas couper le sommet, mais lui être tangent. Cette opération est facilitée par une feuille de papier blanc bien éclairée, que l'on pose en arrière du baromètre, le curseur étant lui-même un peu dans l'ombre.

Le vernier du curseur fait connaître la hauteur du mercure en millimètres ou fractions de millimètre, généralement les dixièmes.

Mais il faut faire à cette lecture une double correction. Il n'est pas de baromètre qui ne soit en erreur constante de quelques fractions de millimètre, soit par l'effet de la capillarité, soit par suite d'un défaut d'ajustage rigoureux de la pointe. L'acquéreur d'un baromètre Fortin doit donc exiger du constructeur un bulletin de comparaison de son instrument avec un étalon sûr. Cette comparaison fait connaître la correction constante, comprenant l'erreur due à la capillarité, qu'il faudra faire à toutes les lectures.

D'autre part, la hauteur observée du baromètre doit subir une seconde correction dépendant de la température marquée par le thermomètre de l'instrument ; cette correction se nomme *réduction du baromètre à zéro*. La chaleur qui dilate les corps augmente le volume du liquide ; les hauteurs obtenues quand la température s'élève sont donc trop fortes. Des tables spéciales donnent pour chaque température et chaque pression la correction qu'il faut faire. Le chiffre que l'on obtient, en consultant ces tables, doit être retranché de la hauteur si la température est au-dessus de zéro ; il doit être ajouté, au contraire, si la température est inférieure à zéro degré.

Il reste encore une troisième correction, due à la hauteur de la cuvette du baromètre au-dessus du niveau de la mer ; cette *réduction du baromètre au niveau de la mer* exige des données spéciales, et, en particulier, la température que marquerait le thermomètre de la station, si cette station était au niveau de la mer.

## CHAPITRE XII

### MESURE ET LOIS DE L'ÉLASTICITÉ DES GAZ

**PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES DES GAZ.** — Nous avons dit (page 28) que, lorsque dans un corps la *cohésion* est remplacée par la force d'*expansion*, ce corps est à l'état gazeux ; qu'on le nomme gaz, *fluide élastique*, *fluide aëriiforme*, et que cette force d'*expansion* était caractéristique de cet état.

Nous avons ajouté (page 48) que, dans les gaz, il n'y a pas de limite d'élasticité; que, conséquemment, leur compressibilité; était telle que l'on avait pu réduire le volume de certains gaz de 1 à 800 environ.

Ce sont les lois qui président à cette compressibilité et à cette élasticité que nous allons étudier dans ce chapitre; mais nous devons d'abord dire quelques mots de ces corps dont nous voulons nous occuper.

Il existe entre les gaz une grande diversité. Si l'air atmosphérique est transparent, incolore, insipide, inodore, le chlore est jaune verdâtre et son odeur provoque la toux; l'acide chloreux, plus foncé, d'une odeur plus âcre, s'enflamme et détone sous l'action de la chaleur; l'ammoniaque est insupportable à l'odorat, l'iode est violet, l'hydrogène sulfuré est fétide, le cyanogène brûle avec une belle flamme pourpre, etc. Mais tous sont élastiques, compressibles et pesants.

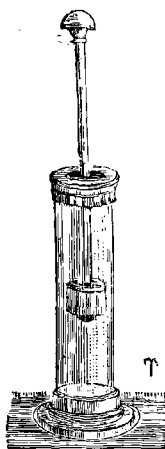


Fig. 134.

BRIQUET À AIR.

Leur élasticité se prouve expérimentalement au moyen d'une vessie à demi pleine d'air ou d'un gaz quelconque. La pression atmosphérique l'empêche de se gonfler; mais enlevez cette pression en plaçant la vessie sous le récipient d'une machine pneumatique (machine dont nous parlerons dans le chapitre suivant et qui est destinée à pomper l'air), et vous la verrez se gonfler immédiatement.

Leur compressibilité se démontre au moyen d'un cylindre de verre épais (fig. 134) dans lequel joue un piston. Que ce cylindre soit rempli d'air ou d'un gaz quelconque, en appuyant sur le piston on réduira extrêmement son volume. Mais si on lâche le piston, l'élasticité du gaz le rejettera aussitôt en haut.

Ce petit appareil est appelé *briquet à air*, parce que, en enfonçant brusquement le piston, on développe assez de chaleur pour enflammer du coton imbibé de sulfure de carbone, placé au fond du tube.

Les gaz sont pesants. Nous avons raconté quelles expériences il avait été nécessaire de faire pour convaincre, malgré Aristote, de la pesanteur de l'air.

Pour connaître cette pesanteur, il faut peser chaque gaz sous le volume qu'il occupe à la pression atmosphérique, c'est-à-dire dans une vessie libre de se contracter ou de se distendre et exposée à l'air. En principe, on peut le faire au moyen d'un ballon d'abord vide, puis rempli d'air et enfin rempli du gaz que l'on veut peser, et l'on obtient ainsi sa densité; mais les difficultés pratiques de l'opération entraînent à de nombreuses corrections que nous ne pouvons exposer ici.

Voici un tableau de la densité des principaux gaz :

NOMS DES GAZ.	POIDS SPÉCIFIQUE.	NOMS DES GAZ.	POIDS SPÉCIFIQUE.
Air atmosphérique.....	1,0000	Cyanogène.....	1,806
Acide carbonique.....	1,5290	Eau.....	0,6235
Acide chlorhydrique.....	1,247	Esprit de bois.....	1,120
Acide cyanhydrique.....	0,947	Essence de térébenthine.....	4,763
Acide sulfhydrique.....	1,191	Éther.....	2,586
Acide sulfureux.....	2,234	Gaz des marais.....	0,555
Alcool de vin.....	1,6133	Gaz d'éclairage.....	0,58
Alcool de pommes de terre.....	3,147	Hydrogène.....	0,06032
Ammoniaque.....	0,596	Iode.....	8,716
Azote.....	0,9714	Mercure.....	6,976
Benzine.....	2,77	Oxyde de carbone.....	0,957
Bioxyde d'azote.....	1,039	Oxygène.....	1,1036
Brome.....	5,540	Phosphore.....	4,420
Chlore.....	2,44	Soufre à 500°.....	6,617

**LOI DE MARIOTTE.** — En 1676, Mariotte (1), à la suite d'une série d'expériences sur la diminution du volume de l'air à mesure que son élasticité augmente par la compression, publiait son traité intitulé : *De la nature de l'air*, dans lequel il disait :

« La première question qu'on peut faire sur la nature de l'air est de savoir *s'il se condense précisément selon la proportion du poids dont il est chargé*, ou si cette condensation suit d'autres lois et d'autres proportions. Voici les raisonnements que j'ai faits pour savoir si la condensation de l'air se fait à proportion des poids dont il est pressé. Étant supposé, comme l'expérience le fait voir, que l'air se condense davantage lorsqu'il est chargé d'un plus grand poids, il s'ensuit nécessairement que si l'air, qui est depuis la surface de la terre jusqu'à la plus grande hauteur où il se termine, devenait plus léger, sa partie la plus basse se dilaterait plus qu'elle n'est, et que, s'il devenait plus pesant, cette même partie se condenserait davantage. Il faut donc conclure que la condensation qu'il a proche de la terre se fait selon une certaine proportion du poids de l'air supérieur dont il est pressé, et qu'en cet état il fait équilibre par son ressort précisément à tout le poids de l'air qu'il soutient. De là il s'ensuit que, si l'on enferme dans un baromètre du mercure *avec de l'air* et qu'on fasse l'expérience du vide, le mercure ne demeure pas dans le tuyau à la hauteur qu'il avait; car l'air qui y était enfermé avant l'expérience *fait*

(1) MARIOTTE (Edme), membre de l'Académie des sciences dès l'époque de sa fondation (1620-1684,) était abbé et avait obtenu le prieuré de Saint-Martin-sous-Beaune, dont il touchait les revenus, quoiqu'il résidât à Digne. Il confirma par de nombreuses expériences les théories de Galilée relatives aux mouvements des corps; mais il est resté célèbre surtout par la loi à laquelle il a donné son nom.

*équilibre par son ressort au poids de toute l'atmosphère, c'est-à-dire de la colonne d'air de même largeur qui s'étend depuis la surface du vaisseau jusqu'au haut de l'atmosphère, et, par conséquent, le mercure qui est dans le tuyau ne trouvant rien qui lui fasse équilibre, descendra; mais il ne*

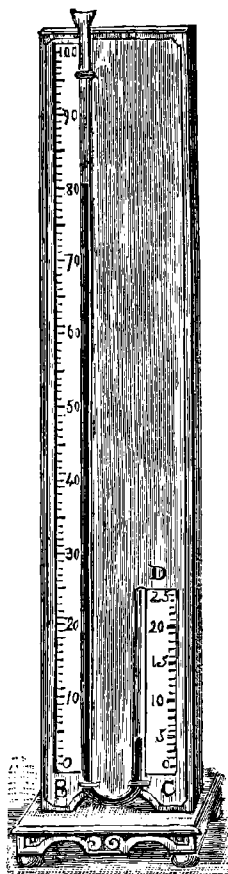


Fig. 135. — EXPÉRIENCE DE MARIOTTE.

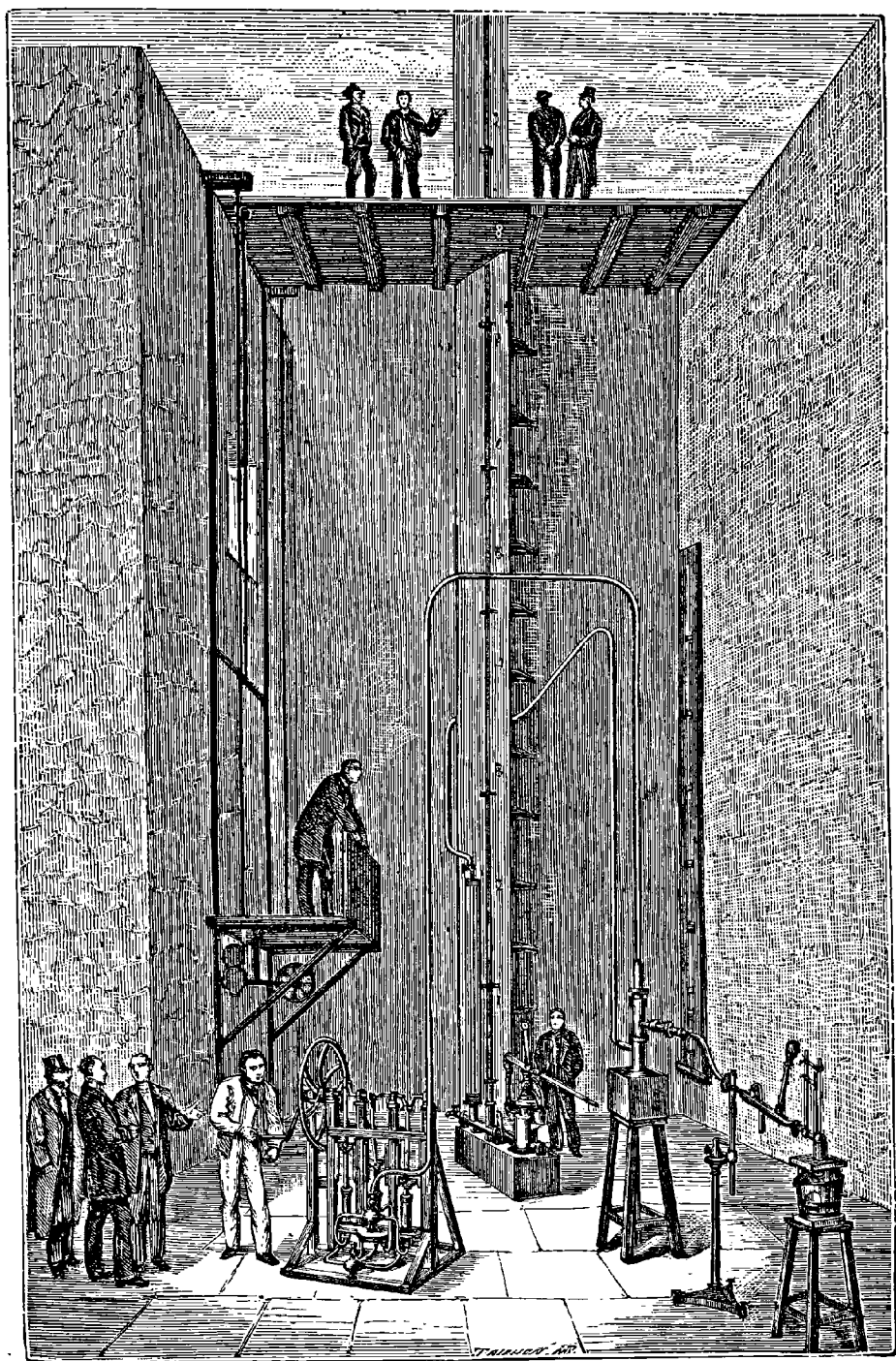
descendra pas entièrement; car, lorsqu'il descend, l'air enfermé dans le tuyau se dilate, et, par conséquent, son ressort n'est plus suffisant pour faire équilibre avec tout le poids de l'air supérieur. Il faut donc qu'une partie du mercure demeure dans le tuyau à une hauteur telle que, l'air qui y est enfermé étant dans une condensation qui lui donne une force de ressort capable de soutenir seulement une partie du poids de l'atmosphère, le mercure qui demeure dans le tuyau fasse équilibre avec le reste, et alors il se fera équilibre entre le poids de toute la colonne d'air et le poids de ce mercure resté (dans le tube), joint avec la force du ressort de l'air enfermé. Or, si l'air doit se condenser à proportion des poids dont il est chargé, il faut nécessairement qu'ayant fait une expérience en laquelle le mercure demeure dans le tuyau à la hauteur de 14 pouces, l'air qui est enfermé dans le reste du tuyau soit alors dilaté *deux fois plus* qu'il n'était avant l'expérience, pourvu que dans le même temps les baromètres sans air élèvent leur mercure à 28 pouces précisément. »

Pour s'assurer de l'exactitude de ce raisonnement, Mariotte fit l'expérience suivante (*fig. 135*) :

On prend un tube ABCD recourbé en forme de siphon, fixé sur une planchette de bois, dont la petite branche DC est fermée et graduée en parties d'égale capacité, tandis que la grande branche AB est ouverte en entonnoir par le haut et simplement divisée en centimètres. On verse du mercure dans le tube de façon que, dans les deux branches, il atteigne le niveau horizontal marqué zéro. L'air enfermé dans la petite branche, entre la 5<sup>e</sup> et la 25<sup>e</sup> division, possède évidemment alors une élasticité égale à la pression de l'atmosphère. On remarque bien qu'il occupe, en ce moment, l'espace du tube compris entre la 5<sup>e</sup> et la 25<sup>e</sup> division; puis on verse du mercure dans la grande branche jusqu'à ce que le volume de l'air soit réduit de moitié dans la petite branche, c'est-à-dire que le mercure y ait atteint



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Expériences de M. Regnault, au Collège de France (page 300).



la quinzième division. On s'aperçoit alors que, dans la grande branche, le niveau a atteint précisément la hauteur qu'a le baromètre à ce moment-là, c'est-à-dire la hauteur donnée par une pression atmosphérique. En ajoutant à cette pression la pression qui s'exerce au sommet de la colonne, on voit qu'au moment où le volume d'air contenu dans la petite branche est réduit de moitié, la pression est double de ce qu'elle était d'abord. Si l'on verse encore du mercure de façon à réduire le volume de l'air au tiers, au quart du volume primitif, on constate que la différence de niveau est de deux, trois fois la hauteur du baromètre, c'est-à-dire que l'on fait équilibre à une pression de trois ou quatre atmosphères.

Il en est de même dans le cas où le gaz se dilate, et où, par conséquent, sa pression diminue. Pour le vérifier par l'expérience, on renverse dans une cuve profonde pleine de mercure, un tube barométrique (*fig. 136*) incomplètement rempli de mercure et on l'y plonge jusqu'à ce que le niveau du liquide soit le même dans le tube et dans l'éprouvette. L'élasticité de l'air intérieur AC est égale à la pression atmosphérique. On soulève alors le tube jusqu'à ce que ce volume primitif AC de l'air soit doublé. On trouve ainsi que la colonne de mercure DB, qui s'est élevée dans ce tube, est égale à la moitié de la hauteur barométrique; que donc la pression supportée par l'air intérieur, dont le volume a doublé, est devenue moitié moindre.

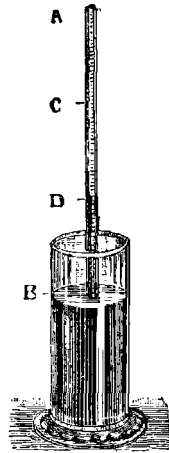


Fig. 136.

Par ces expériences était démontrée cette loi de Mariotte, susceptible de plusieurs énoncés qui rentrent les uns dans les autres :

1° *Les volumes qu'occupe une même masse de gaz à la même température, mais sous des pressions diverses, sont inversement proportionnels à ces pressions.*

2° *Une même masse de gaz conservant la même température, mais changeant de volume, le produit du nombre qui mesure le volume par celui qui mesure la force élastique du gaz reste toujours le même.*

3° *Une même masse de gaz conservant la même température, mais changeant de volume, la densité du gaz est proportionnelle à la force élastique.*

En même temps que Mariotte, cette loi était découverte par Boyle (1);

(1) BOYLE (Robert), célèbre physicien anglais (1626-1691), fils du comte de Cork et d'Orrery préféra s'adonner aux sciences qu'à la politique, et on lui doit de nombreuses et précieuses observations. Il était en même temps un ami zélé de la religion; il a écrit de nombreux traités de philo-

c'est pourquoi les Anglais ont donné à cette loi le nom du célèbre physicien. Tous les savants de l'époque répétèrent l'expérience, et tous arrivèrent aux mêmes résultats. Ce ne fut qu'en 1826 qu'Erstedt et Swendsen montrèrent que tous les gaz ne suivent pas exactement cette loi. En 1842, Magnus (1) et bientôt après Despretz (2) prouvèrent qu'elle cesse d'être rigoureusement vraie lorsque les gaz subissent des pressions très fortes; Dulong et Arago, par leurs belles expériences exécutées dans la cour du collège Henri IV, cherchèrent vainement à en rétablir l'exactitude. Enfin, M. Regnault a constaté des variations dans la loi pour les différents gaz.

Aussi, pour nous résumer, « on doit, selon l'expression de M. Jamin dans son *Cours de physique*, se représenter la loi de Mariotte comme une loi *limite*, un cas particulier qui ne se réalise pas, et dont les divers corps gazeux s'approchent ou s'éloignent, soit en plus, soit en moins, suivant leur nature, suivant les pressions initiales qu'ils possèdent, et probablement aussi, suivant les autres circonstances dans lesquelles on les considère et notamment leur température. »

**MANOMÈTRES.** — Ces instruments (du grec *manos*, rare, peu dense, et *metron*, mesure) sont destinés à mesurer la force d'élasticité d'un gaz, non pas libre, mais renfermé dans un espace clos, et, plus particulièrement, les variations de la tension d'une vapeur. L'unité dont on se sert ordinairement pour exprimer cette force d'élasticité est appelée *atmosphère* (page 250).

Soupçonné par Otto de Guericke et par Boyle, le manomètre ne fut réellement inventé que par Bénédicte de Saussure (3). Bientôt perfectionnés, ces instruments se distinguent en trois espèces : 1° *Manomètres à air libre*; 2° *manomètres à air comprimé*; 3° *manomètres métalliques*. Nous donnons (page 273) le dessin des principaux types de manomètres usités aujourd'hui dans l'industrie.

Le *manomètre à air libre* est tout simplement un baromètre à siphon dont une des branches, haute de 4 à 5 mètres, est ouverte, et dont la

sophie pieuse, et il fut un des principaux fondateurs de la *Société royale de Londres*, d'abord nommée *Collège philosophique*. Il a laissé aussi une quantité considérable de travaux relatifs à la chimie.

(1) MAGNUS (Henri-Gustave), professeur de physique à l'université de Berlin (1802-1870).

(2) DESPRETZ (César-Mansuète), professeur de physique à la Sorbonne (1792-1863).

(3) DE SAUSSURE (Bénédict-Horace), grand naturaliste suisse (1740-1799), professa la philosophie à Genève, explora les Alpes dans toute leur étendue, et fut un des premiers qui parvint à la cime du mont Blanc. Il rendit par ces excursions de grands services aux sciences naturelles. Il inventa ou perfectionna plusieurs instruments de physique, entre autres l'hygromètre, le thermomètre, l'eudiomètre. Son fils, Théodore de Saussure (1767-1841), s'est fait un nom par ses beaux travaux sur la physique et la chimie végétales.

petite branche communique avec la chambre où est renfermé le gaz ou la vapeur. Les deux branches se réunissent dans une cuvette pleine de mercure. Le plus souvent, cette cuvette est en fer forgé. Le grand tube et la cuvette sont fixés sur une planchette, destinée à recevoir la graduation.

Pour graduer ce *manomètre*, on a marqué 1, c'est-à-dire une atmosphère, au niveau du mercure dans la cuvette; puis, à partir de ce point et de 0<sup>m</sup>,76 en 0<sup>m</sup>,76, on marque successivement 2, 3, 4, 5..., indiquant le nombre d'atmosphères.

L'air, le gaz ou la vapeur, dont on veut mesurer la force élastique, agit sur le mercure. Évidemment, si le niveau du mercure est le même dans le tube que dans la cuvette, c'est que la pression régnant dans la cuvette est égale à la pression atmosphérique. Si le mercure s'élève dans le tube, c'est que la pression du gaz surpasse la pression atmosphérique. Autant de fois, dans le tube, le mercure monte de 0<sup>m</sup>,76, autant de pressions atmosphériques, d'*atmosphères*, supporte le mercure dans la cuvette sous l'action de l'élasticité du gaz ou de la vapeur considérée.

Dans l'industrie, c'est principalement pour apprécier la force élastique des vapeurs que l'on fait usage du *manomètre*. Mais d'abord la grande longueur du manomètre ordinaire à air libre est un inconvénient fort grave. On a cherché, il est vrai, à remédier à cet inconvénient par le *manomètre à branches multiples*, dans lequel la hauteur de la colonne qui marque la pression de la vapeur, moins une atmosphère, se trouve divisée par le nombre de tubes qui en forment les courbures successives. La fragilité de tubes de verre est un autre inconvénient. On a tenté d'employer un tube de fer; pour apprécier la hauteur du liquide, un morceau de fer flotte sur le mercure, dans le tube, et est soutenu par un fil qui passe sur une poulie et est supporté par un contrepoids, lequel se déplace le long d'une règle divisée suivant les fluctuations du flotteur. On se sert aussi d'un autre appareil, composé d'un tube de fer, enfoncé dans le sol recourbé, et soutenant chacun un cylindre. L'un, en fonte, communique avec la vapeur; l'autre, en cristal, est gradué. Le mercure est dans le cylindre en fonte et arrive dans le cylindre en cristal quand la pression de la vapeur est de deux atmosphères. La différence de diamètre entre le tube et le cylindre fait que le mercure, montant de 0<sup>m</sup>,76 dans le tube, ne monte que de 0<sup>m</sup>,05 dans le cylindre.

Le *manomètre à air comprimé*, qui repose plus particulièrement sur la loi de Mariotte, a été construit en admettant ce principe que *la loi de Mariotte est rigoureusement vraie dans tous les calculs et dans toutes les*

*applications que l'on en peut faire, si les gaz sont très éloignés de leur point de liquéfaction.*

L'instrument n'est autre chose que le tube de Mariotte. C'est un tube recourbé sur lui-même, dont l'une des branches est fermée et l'autre ouverte. La courbure contient du mercure jusqu'à une certaine hauteur. Dans la petite branche se trouve de l'air sec ; l'autre branche ouverte communique avec le vase clos qui contient le gaz ou la vapeur dont on veut mesurer la force élastique.

L'instrument est réglé de façon que le mercure soit à une même hauteur si la pression de la vapeur équivaut à une atmosphère. Quand cette pression augmente, le niveau augmente également, mais, selon la loi de Mariotte, à des hauteurs décroissantes pour d'égales augmentations de pression.

L'instrument étant de moins en moins sensible à mesure que les pressions augmentent, on donne la forme conique à la branche qui renferme l'air, de sorte que les divisions correspondant aux atmosphères successives aient des longueurs à peu près égales.

**MANOMÈTRES MÉTALLIQUES.** — La fragilité des tubes de verre que nous signalions tout à l'heure et leur encrassement résultant de ce que le mercure se salit à la longue, ce qui leur fait perdre leur transparence, l'oxydation du mercure qui diminue le volume de l'air, tous ces inconvénients ont fait adopter dans un grand nombre d'industries les manomètres métalliques, fondés sur les changements de forme que la pression du gaz ou de la vapeur peut faire subir à des systèmes solides, combinés d'ailleurs diversément, et dont le type est celui de M. Bourdon, l'habile constructeur dont nous avons parlé, à qui l'on doit le baromètre anéroïde.

Son manomètre se compose d'un tube en laiton d'environ 0<sup>m</sup>,70 de longueur, à parois minces, flexibles et légèrement aplatis, roulé en hélice et placé dans un cadre elliptique. Une extrémité est mise en communication par un robinet avec le réservoir de pression ; à l'autre extrémité est fixée une aiguille d'acier qui parcourt les divisions d'un cadran. Lorsque le robinet est en communication avec l'atmosphère, l'aiguille s'arrête à la division 1 ; si la pression augmente, la courbure du tube diminue, l'extrémité mobile s'éloigne de l'autre et l'aiguille parcourt les différentes divisions du cadran. Ces manomètres sont principalement employés pour les locomotives, à cause de leur solidité et de leur bon marché. Toutefois, comme les pièces qui les composent s'altèrent par l'usage, il est nécessaire de soumettre assez fréquemment ces instruments à des contrôles sérieux.

*Manomètre Cailletet.* — M. L. Cailletet, un des savants physiciens de notre époque, vient de réaliser un nouveau manomètre destiné particulièrement à mesurer les pressions énormes de 200, 300, 500 atmosphères, manomètre déjà expérimenté avec succès et, entre autres applications, propre à déterminer avec une grande précision la profondeur de la mer, en indiquant les pressions que supporte un manomètre à telle ou telle profondeur (page 172), problème réputé fort difficile jusqu'ici. Ce manomètre est en verre. M. Cailletet a prouvé que les tubes en verre présentaient une élasticité remarquable, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de déformation permanente, mais au contraire reviennent à leur état primitif lorsque la force qui les déforme cesse d'agir. En outre, il a démontré que la quantité dont varie le volume d'un réservoir cylindrique en verre comprimé sur ses parois extérieures est *proportionnelle* à la pression. Il a donc construit une sorte de thermomètre (*fig. 137*) en verre, dont le réservoir cylindrique, plein de mercure, est installé dans une enveloppe d'acier assez épaisse pour résister aux plus fortes pressions. La tige seule sort de la gaine métallique. Si l'on exerce une pression sur le thermomètre par l'entremise d'eau, par exemple, le réservoir en verre se comprimera, le mercure s'élèvera dans le tube capillaire, et, de sa hauteur, on pourra conclure la pression. La sensibilité dépendra du rapport entre les diamètres du réservoir et de la tige.

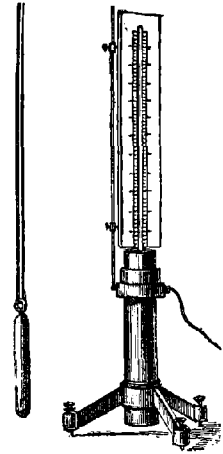


Fig. 137.  
MANOMÈTRE  
DE M. CAILLETET.

M. Cailletet a expérimenté ce manomètre à Toulon ; la Méditerranée est très profonde dans cette région. Pour vérifier si, à des profondeurs très grandes, la déformation du verre restait bien proportionnelle à la pression, il a comprimé ses manomètres jusqu'à 400 atmosphères, pression correspondant à une profondeur de 4,000 mètres. Les instruments ont été parfaitement d'accord. Nous avons donc maintenant une nouvelle méthode de sondage rigoureuse, qui rendra de grands services à la science et à l'hydrographie.

## CHAPITRE XIII

MACHINES PNEUMATIQUES — MACHINES  
DE COMPRESSION

**HISTORIQUE.** — Ce fut vers l'an 1650, au milieu des horreurs de la guerre de Trente ans, dans une ville pillée, assiégée, brûlée à plusieurs reprises, qu'un homme de génie, Otto de Guéricke (1), bourgmestre de Magdebourg (Saxe), se livra à ces expériences fameuses, à ces recherches profondes et savantes auxquelles est due la découverte de cette machine si précieuse pour la science, que l'on nomme la *machine pneumatique* (du grec *pneumaticos*, de *pneuma*, air).

Otto de Guéricke avait conçu l'idée de s'assurer si le vide existait, si la nature admet le vide, *vacuum in natura datur*, selon son expression. Il se servit d'abord (2) d'un tonneau, assez solidement fermé pour que l'air du dehors n'y pût entrer; puis il le remplit d'eau et adapta à la partie inférieure une pompe, pensant qu'à mesure qu'il en retirerait ainsi l'eau par en bas, il se produirait en haut un espace vide. Trois hommes robustes étaient employés à manœuvrer la pompe; mais, pendant ce travail, on entendait sur tous les points du tonneau des sifflements aigus : c'était l'air qui y pénétrait avec force pour remplir l'espace vide. Le but était manqué.

Après avoir plusieurs fois renouvelé vainement cette tentative, Otto de Guéricke se fit construire un globe en cuivre, susceptible d'être ouvert ou fermé en haut à l'aide d'un robinet; à la partie inférieure, il adapta une pompe pour faire sortir l'air du globe, comme il avait fait pour le baril

(1) GUÉRICKE (Otto de), né à Magdebourg en 1602, mort à Hambourg en 1686. Outre ses découvertes en physique, on lui doit de précieuses observations astronomiques; il a le premier annoncé la périodicité des comètes. Ses œuvres ont été réunies sous le titre de : *Experimenta nova ut vocant Magdeburga de vacuo spatio*. Sa vie fut vouée à la science, et néanmoins, comme tous les savants, ce fut un grand citoyen, et il a écrit l'histoire de sa ville natale, pillée, brûlée, détruite par des Majestés ignorantes et stupides.

(2) Hoeffler, *Histoire de la Physique et de la Chimie*.



rempli d'eau ; ce fut donc là une pompe à air. Deux hommes vigoureux étaient occupés à faire jouer le piston, lorsque tout à coup, au moment où tout l'air paraissait avoir été retiré, le globe de métal se contracta avec



OTTO DE GUÉRICKE.

fracas, à la grande terreur des assistants ; on aurait dit un linge chiffonné avec la main.

Le patient et sagace physicien ne se découragea pas de ses insuccès vingt fois réitérés ; il perfectionna son appareil, et, enfin, il parvint à réa-

liser le mécanisme appelé d'abord *antlia pneumatica* (fig. 138), qui est devenu la *machine pneumatique*.

Pour rendre cette machine portable et plus facile à manier, l'auteur l'avait munie d'un trépied en fer. Le corps de pompe *gh* est en laiton, assujéti verticalement par son extrémité supérieure, amincie en tuyau *n*,

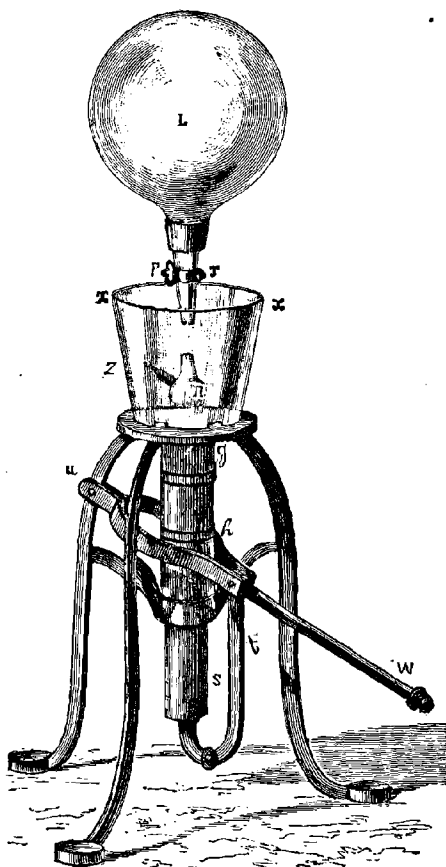


Fig. 138. — ANTLIA PNEUMATICA  
D'OTTO DE GUÉRICKE.

avec la partie inférieure du vase arrondi L, en verre, où doit se faire le vide. Le piston *s*, fixé à une tige recourbée *t*, est mis en mouvement par le levier *wu*. Le fluide soutiré est rejeté en dehors par l'ouverture *zo*, pratiquée en haut et sur le côté du corps de pompe. Le vase *xx*, où plonge le bec du globe récipent L, est rempli d'eau pour assurer la fermeture exacte du robinet *qr*.

Cet appareil primitif fut bientôt perfectionné par son auteur même et amené à peu près à la forme de la *machine pneumatique à simple effet* que nous décrivons ci-après. Il put, avec son aide, faire un grand nombre d'expériences que l'on répète encore dans les cours de physique et qui eurent un grand retentissement. En 1654, le célèbre bourgmestre de Magdebourg reçut l'invitation de faire fonctionner la machine pneumatique devant l'empereur Ferdinand III et les princes allemands réunis à la diète de Ra-

tisbonne. C'est là qu'eut lieu l'expérience des *hémisphères de Magdebourg*, que nous avons décrite ci-dessus.

Un des premiers, Robert Boyle répéta ces expériences, perfectionna l'instrument, et, en 1659, en donna la description, ce qui le fait passer en Angleterre pour l'inventeur de la machine pneumatique, quoique lui-même déclare dans son livre le droit de priorité du physicien allemand.

Depuis cette époque, la *machine pneumatique* a reçu de nombreux perfectionnements. Beaucoup de savants s'en sont occupés, entre autres

Denis Papin (1), l'abbé Nollet (2), Hauksbee (3), Schrader, Macvivar, Buchanan; et, plus récemment, MM. Babinet, Deleuil, Breton, Bianchi; et enfin Giessler, Alvergnyat, etc., en se fondant sur un autre principe.

**MACHINE PNEUMATIQUE A SIMPLE EFFET.** — Elle se compose (*fig. 139*) d'un corps de pompe C, en verre ou en métal, dans lequel se meut un piston P, traversé par un canal que ferme une soupape *s*, placée à son extrémité inférieure, et s'ouvrant de bas en haut. Un canal AB part du fond du cylindre et va déboucher au centre D d'un disque

de verre douci avec soin et que l'on appelle la *platine*; ce canal a son extrémité D en pas de vis, afin que l'on y visse un récipient quelconque. La platine peut être recouverte par une cloche en verre E dont les bords se collent bien exactement et, afin de ne point laisser pénétrer l'air, on étend sur le disque une couche de caoutchouc chauffé. Un bouchon *t* ferme le tube de communication; il est fixé à l'extrémité d'une tige de fer qui traverse à frottement dur le piston, de sorte qu'il s'élève et s'abaisse avec lui; mais un renflement à l'extrémité supérieure de la tige ne lui permet qu'un mouvement très peu élevé au-dessus de l'ouverture du tube qu'il doit boucher.

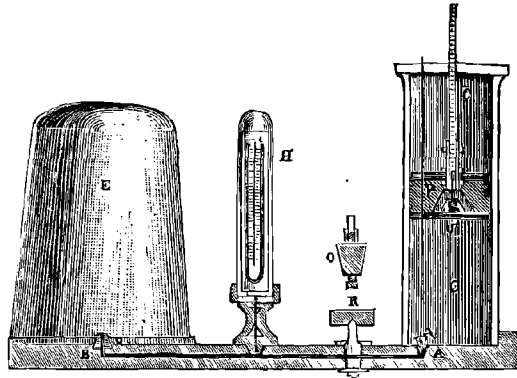


Fig. 139.

MACHINE PNEUMATIQUE A UN CORPS DE POMPE.

Or, supposons que le piston soit au bas du cylindre et qu'on l'élève, la soupape *t* est soulevée et l'air de la cloche E est appelé dans le cylindre C. En abaissant le piston, la soupape *t* se ferme; l'air qui est dans le cylindre C ne peut retourner en E; il se comprime, soulève la soupape *s* et s'échappe à l'extérieur. En continuant ainsi, tout l'air contenu dans E sera puisé peu à peu.

Or, supposons que le piston soit au bas du cylindre et qu'on l'élève, la soupape *t* est soulevée et l'air de la cloche E est appelé dans le cylindre C. En abaissant le piston, la soupape *t* se ferme; l'air qui est dans le cylindre C ne peut retourner en E; il se comprime, soulève la soupape *s* et s'échappe à l'extérieur. En continuant ainsi, tout l'air contenu dans E sera puisé peu à peu.

Cependant chaque coup de piston n'enlève qu'une fraction, toujours la même, contenue dans le récipient. Or, la propriété fondamentale des

(1) DENIS PAPIN. Voir ci-après : *Machines à vapeurs*.

(2) NOBLET (l'abbé), professeur de physique (1700-1770), membre de l'Académie des sciences. On créa pour lui une chaire de physique au collège de Navarre, et Louis XV le nomma maître de physique et d'histoire naturelle des enfants de France. Il s'occupa beaucoup d'électricité. Son ouvrage *Leçons de physique expérimentale* a longtemps été classique.

(3) HAUKSBEЕ. Voir ci-après : *Acoustique*.

gaz étant de remplir toujours complètement l'espace qui leur est offert, le volume de l'air ne diminue pas sous le récipient, il perd seulement de sa force élastique; il est donc impossible de produire le vide absolu, mais, théoriquement, on pourrait en approcher autant qu'on le voudrait.

Il est nécessaire de connaître à chaque instant la force élastique de l'air du récipient. Pour cela, on a placé sur l'appareil une petite cloche H, appelée l'éprouvette, qui communique par un robinet avec le récipient E et qui contient un baromètre tronqué, formé d'un tube recourbé dont les

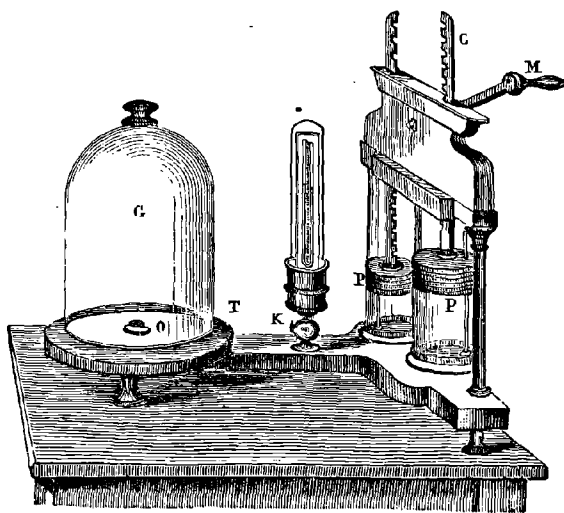


Fig. 140.

MACHINE PNEUMATIQUE A DEUX CORPS DE POMPE.

branches ont 0<sup>m</sup>,28 à 0<sup>m</sup>,30 de longueur. L'une de ces branches est fermée et pleine de mercure, l'autre est ouverte. Lorsque la pression de l'air dans le récipient est plus faible que celle représentée par la colonne de mercure qui remplit la branche fermée du baromètre, le mercure descend et une échelle graduée permet de mesurer exactement la différence de niveau entre les deux branches du

baromètre, c'est-à-dire la force élastique du gaz.

Pour faire rentrer l'air dans le récipient, on se sert du robinet R. La clef O de ce robinet est percée de part en part d'une ouverture qui ordinairement est placée dans l'axe du tube AB; une seconde ouverture la traverse, qui ouvre une communication avec l'air extérieur. On tourne cette clef de façon à établir les communications, soit du récipient avec le corps de pompe, soit du récipient avec l'air extérieur.

**MACHINE PNEUMATIQUE A DEUX CORPS DE POMPE.** — Construite sur les mêmes principes (*fig.* 140), cette machine pneumatique, la plus généralement employée dans les cabinets de physique, se compose de deux corps de pompe PP, dans chacun desquels est un piston formé de plusieurs rondelles de cuir et muni d'une tige à crémaillère, dont les dents s'engrènent avec un pignon C, qu'on fait mouvoir alternativement de gauche à droite et de droite à gauche à l'aide d'un double levier M. Les deux corps

de pompe communiquent par deux conduits avec le canal d'aspiration qui aboutit en O, au centre de la platine T, sous la cloche G. L'éprouvette K est fixée, de la même façon que nous avons dite, au canal d'aspiration. Or, quand le piston monte dans un cylindre, sa soupape reste fermée et celle du canal d'aspiration s'ouvre, ainsi que celle de l'autre piston, de sorte qu'un seul piston est en communication avec le récipient; quand le piston se rabaisse, la réciproque a lieu.

La machine ainsi construite a l'avantage de faire le vide d'une manière continue, tandis que, dans la machine à un seul corps de pompe, l'air du récipient ne subit aucune modification pendant la descente du piston. Néanmoins, elle n'est encore qu'à simple effet, puisque chaque piston, pendant sa descente, ne produit aucun épuisement.

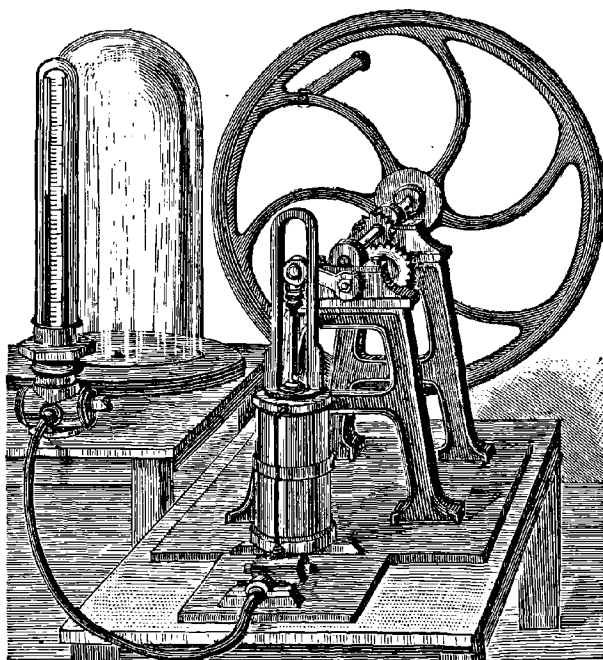


Fig. 141. — MACHINE PNEUMATIQUE BIANCHI.

M. Babinet (1) a apporté à cette machine quelques perfectionnements qui permettent de pousser la raréfaction jusqu'à moins de 1 millimètre de pression.

**MACHINE PNEUMATIQUE DE M. BIANCHI (2).** — Cette machine, à double effet, très usitée dans les cabinets de physique, se compose (*fig. 141*) d'un seul corps de pompe; mais la cavité qui contient la soupape n'est plus en relation avec l'atmosphère que par la tige du piston, qui, à cet effet, est creuse. Une tige rigide de laiton traverse le piston à frottement dur, et se termine, à son extrémité inférieure par la soupape

(1) Voir ci-après : *Météorologie*.

(2) BIANCHI (Barthélemy), constructeur d'instruments de physique, né en 1821, s'est fait connaître par ses savantes expériences sur la poudre comprimée, par des appareils pour la liquéfaction de certains gaz pour l'étude des phénomènes de la polarisation rotatoire, etc.

ordinaire, qui ferme l'ouverture du tube d'épuisement, et à son extrémité supérieure par une autre soupape qui ferme l'ouverture d'un tuyau métallique descendant extérieurement jusqu'au canal d'épuisement. Le récipient se trouve ainsi en relation successivement avec la partie inférieure et avec la partie supérieure du corps de pompe. C'est ainsi que tour à tour l'une ou l'autre soupape s'ouvre pour recevoir l'air appelé du récipient.

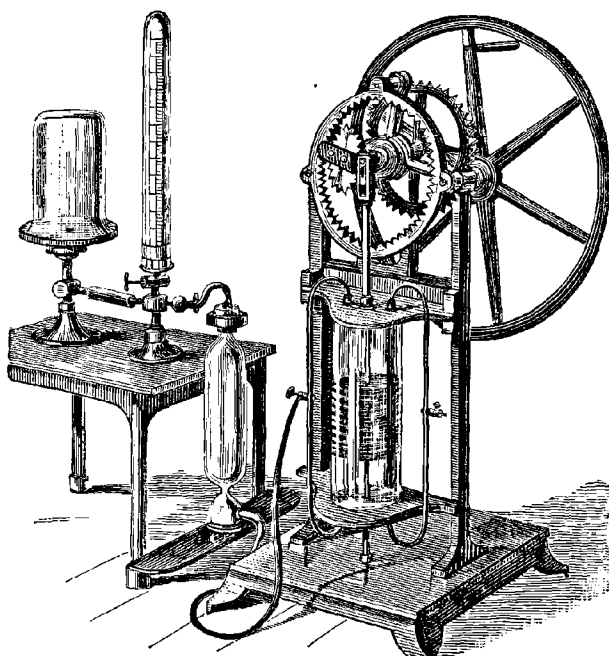


Fig. 142. — MACHINE PNEUMATIQUE DELEUIL.

arrête le jeu des soupapes, coule lentement et continuellement d'un godet placé en haut de la tige du piston, poussant l'huile déjà existante dans un réservoir. Enfin, au lieu du levier qui fait mouvoir les pistons, M. Bianchi emploie la rotation d'une manivelle qui, par un système de roues dentées, communique le mouvement à une deuxième manivelle et de là aux pistons. Enfin, le corps de pompe peut, à volonté, être vertical ou horizontal.

**MACHINE PNEUMATIQUE DE M. DELEUIL (1).** — Dans cette machine (*fig.* 142), le piston est séparé par un intervalle d'un cinquantième de

(1) DELEUIL (Louis-Joseph), né vers 1805, et son fils se sont distingués par la construction d'admirables appareils de physique et de chimie.

millimètre environ du corps de pompe; il est métallique, d'une grande longueur et porte sur toute sa surface des stries horizontales; tandis que, d'un côté, des soupapes mettent alternativement les deux portions du corps de pompe en communication avec le récipient, d'un autre côté, les soupapes reçoivent l'air expulsé qui s'écoule par un robinet. Elle est mue, comme celle de Bianchi, par une manivelle animée d'un mouvement de rotation.

**MACHINE PNEUMATIQUE DE M. ALVERGNIAT.**— Cette machine, dont l'idée première est due à M. Geïssler, constructeur de Berlin, mais qui a été admirablement perfectionnée de nos jours par M. Alvergnyat, est basée sur un autre principe que les précédentes : la raréfaction s'obtient par la communication du récipient avec le vide barométrique. Elle se compose (*fig. 143*) d'un tube vertical en verre, servant de tube barométrique, et dont l'extrémité inférieure communique par un long tuyau en caoutchouc avec un ballon en verre, formant cuvette, qu'une corde et un treuil mené par une manivelle placent à la hauteur que l'on désire. A la partie supérieure du tube se trouve un robinet à trois voies communiquant soit avec le récipient

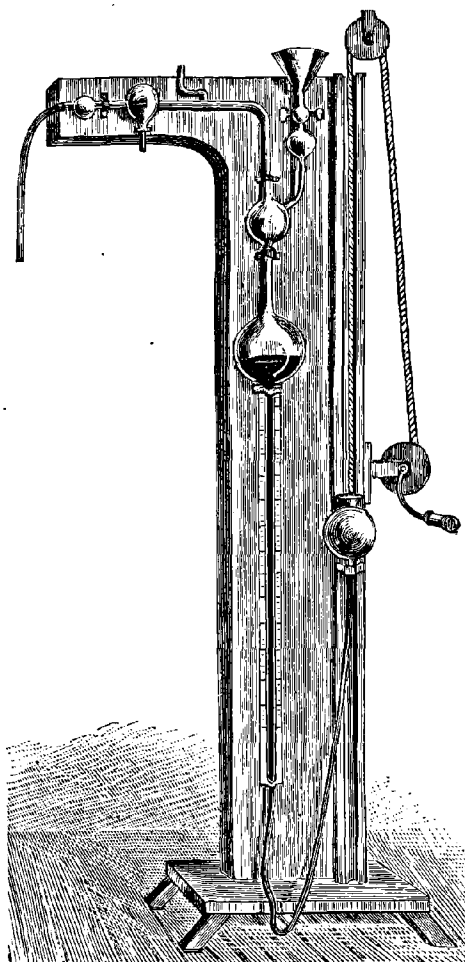


Fig. 143.

MACHINE PNEUMATIQUE DE M. ALVERGNIAT.

par un tuyau en caoutchouc, soit avec un entonnoir précédé lui-même d'un robinet. Un autre robinet permet d'établir ou d'intercepter la communication avec le récipient. Ces robinets sont entièrement en verre. On a choisi cette matière parce qu'elle est susceptible d'une grande perfection et permet de clore presque hermétiquement les ouvertures.

Voici comment on procède. La cuvette étant amenée au-dessus du robinet de l'entonnoir, on remplit les deux tubes de mercure que l'on verse

par l'entonnoir. En vertu du principe des vases communicants, le mercure remplit les deux tubes et une partie de l'entonnoir. Si l'on supprime alors la communication avec ce dernier et qu'on descende la cuvette, le vide barométrique se fait. On tourne alors le robinet à trois voies de manière à intercepter la communication avec le récipient et à le rétablir avec l'entonnoir. On relève la cuvette, on ouvre le robinet qui est sous l'entonnoir. L'air, qui était dans le tube de verre, s'échappe. On a ainsi obtenu le même résultat qu'avec un coup de piston dans une machine ordinaire. Le vide est parfait, mais seulement dans un très petit espace ; il faut recommencer la même série d'opérations un grand nombre de fois pour obtenir le vide dans un récipient un peu considérable ; aussi ne se sert-on de la machine de M. Alvergniat que pour obtenir un vide plus parfait dans un récipient où l'air est déjà très raréfié.

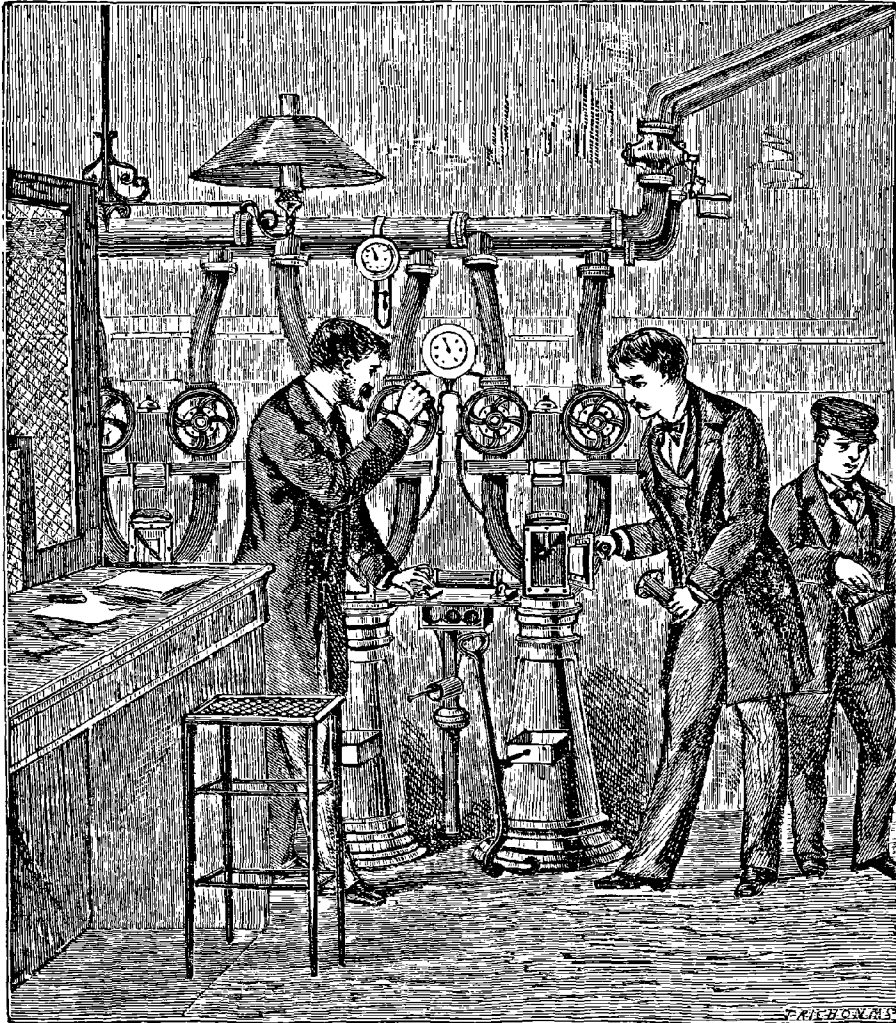
**MACHINE PNEUMATIQUE DE MM. DANGER ET GAIRAUD.** — À peu près semblable à celle de M. Alvergniat, cette machine se compose : 1° d'un tube barométrique de 80 centimètres de long et de 7 à 8 millimètres de diamètre, tordu en siphon à sa partie inférieure, à peu près comme un S renversé ; 2° d'un bocal ou œuf de verre plus ou moins grand, qui peut contenir de 1/4 de litre jusqu'à deux litres. Le tube porte à sa partie inférieure un robinet en fer. Le bocal en porte deux, l'un en bas, vers l'entrée du tube, et l'autre en haut, lequel est surmonté d'un entonnoir. L'appareil est monté sur une table. Pour faire jouer cette machine, on ouvre le robinet d'en haut, on remplit complètement, par l'entonnoir, le bocal de mercure ; puis on ferme le même robinet pour que l'air ne puisse plus entrer, et l'on ouvre les deux autres robinets ; alors le mercure du bocal s'écoule, par suite de son poids, le long du tube, dans une cuve placée au-dessous à la manière de la cuvette d'un baromètre, et le bocal se vide ainsi naturellement et complètement, puisque le tube est assez long pour contenir la colonne de 0<sup>m</sup>,76 de mercure que l'air peut soutenir ; le tube reste donc plein de mercure jusqu'à cette hauteur de 0<sup>m</sup>,76, et le vide est parfait dans tout le bocal, comme dans la chambre barométrique. On peut ensuite fermer le robinet du haut du tube, en dessous du bocal, et l'on a une sorte de bouteille absolument vide.

**MACHINES DE COMPRESSION.** — Les *machines de compression* sont des appareils destinés à comprimer l'air dans un récipient, à produire l'effet contraire à celui des machines pneumatiques.

La première machine à compression fut le *fusil à vent*, inventé vers 1560 par Jean Lobsinger ou par Guter de Nuremberg, ou par Marin de Lisieux.



Il a été perfectionné par Jean et Nicolas Bouillet, arquebusiers à Saint-Étienne et à Paris. On prétend cependant que, dans l'antiquité, Ctésibius et plus tard Archimède, au siège de Syracuse, avaient déjà construit de



La poste pneumatique, à Paris (page 307).

longs tubes au moyen desquels les flèches et les pierres pouvaient être lancées sur l'ennemi. L'arquebuse à vent ne fut en usage dans les armées que pendant quelques années du moyen âge. Une petite pompe était logée dans la crosse de l'arme, et le réservoir d'air comprimé était l'es-

pace annulaire compris entre le canon du fusil et un cylindre de plus fort calibre qui enveloppait celui-ci. Un petit réservoir, muni d'un robinet, renfermait les balles, et, à mesure qu'on avait tiré un coup, on ouvrait le robinet, un projectile descendait dans la culasse : celle-ci communiquait avec le réservoir d'air comprimé au moyen d'une petite soupape qui s'ouvrait brusquement en pressant la détente (fig. 144).



Fig. 144.

SOLDAT ARMÉ DU FUSIL À VENT.

La force de projection diminuait à mesure que le réservoir d'air comprimé se vidait ; après un petit nombre de décharges, il fallait recharger l'arme, c'est-à-dire comprimer l'air de nouveau.

Le fusil à vent fut, à cause de ce grave inconvénient, abandonné par l'armée, et seuls quelques amateurs le conservèrent pour la chasse.

Napoléon I<sup>er</sup> interdit l'usage des fusils à vent, parce que, quoiqu'ils produisent une détonation, celle-ci est trop faible pour appeler l'attention, et ces armes furent jugées dangereuses.

Cependant nous devons parler, parmi les fusils à vent, d'un de ceux qui provoquèrent le plus d'enthousiasme à leur apparition.

Ce fusil, inventé par M. l'ingénieur Perrot, de Rouen, fut préconisé

par Arago à la Chambre des députés, et M. le baron de Meyendorf, conseiller d'État russe, voulut vainement en assurer la possession à son pays.

C'était un fusil de position, destiné à la défense des places. L'air se comprimait dans deux cylindres en tôle forte, de 2 mètres de longueur sur 25 centimètres de diamètre, au moyen de deux pompes horizontales à pression successive. Dès que la pression était parvenue à cent atmosphères, les pompes marchaient seules, de sorte qu'il n'y avait pas d'explosion à craindre. Une cartouchière perpendiculaire, contenant plusieurs milliers de balles, en laisse tomber une dans l'âme du canon, après chaque coup, à l'aide d'un robinet. Ce fusil, muni de trois canons, pouvait lancer 15 à 20 balles par seconde. Il ne fut point adopté, et, sauf les machines fantas-

tiques présentées pendant le siège de Paris par quelques esprits malades, les armes à air comprimé n'ont point été, depuis lors, l'objet d'études sérieuses.

Cependant, l'invention du fusil à vent avait fait bientôt imaginer d'autres machines à comprimer l'air. Ce fut une précieuse invention ; car les applications des *machines de compression* sont innombrables et nous en citerons quelques-unes.

Les machines de compression de Hauksbee et de l'abbé Nollet consistent en un ballon de verre auquel s'adapte, au moyen d'un tube transversal, une pompe foulante en laiton. Hurter, Billiaux, Cuthbertson y apportèrent plusieurs perfectionnements. La machine pneumatique est à peu près identique à la machine de compression (*fig. 145*) ; il suffit de placer le récipient du côté des soupapes d'expulsion au lieu d'être du côté des soupapes d'aspiration. Généralement, dans les machines de compression destinées aux expériences de cabinet, le récipient est en cuivre ou en verre très épais, garni d'un grillage pour empêcher, en cas d'explosion, que les éclats de verre ne se projettent au loin ; il est fermé à ses deux bouts par des plateaux de cuivre, maintenus par des colonnes et des écrous. Le baromètre de la machine pneumatique est remplacé par un petit manomètre.

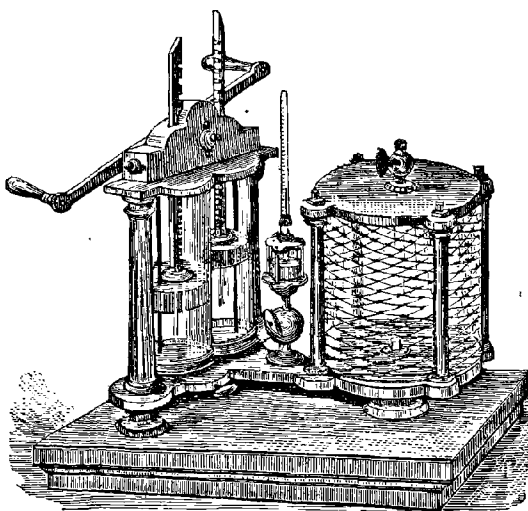


Fig. 145. — MACHINE DE COMPRESSION.

**POMPES DE COMPRESSION.** — Dans les cabinets de physique, on se sert fréquemment d'un appareil appelé *Pompe de compression*, dû à Gay-Lussac, et qui est à la fois une *machine pneumatique* et une *machine de compression*.

Il consiste (*fig. 146*), en un corps de pompe A d'un petit diamètre, dans lequel se meut, au moyen d'une poignée P, un piston massif, c'est-à-dire sans soupape. Ce corps de pompe communique, par sa partie inférieure, avec deux tubes horizontaux, munis de robinets B et C, et dans lesquels des soupapes *o* et *s*, maintenues par des petits ressorts en spi-

rale, s'ouvrent en sens opposé, c'est-à-dire l'une quand le piston produit une aspiration, l'autre quand le piston refoule l'air dans le corps de pompe.

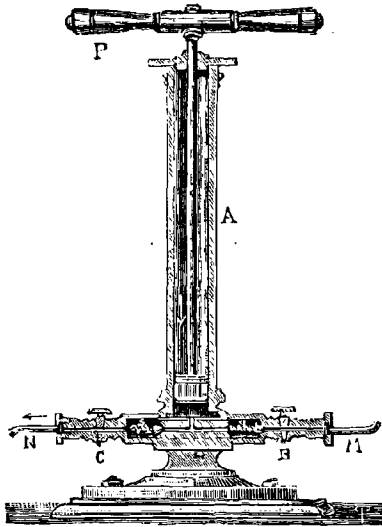


Fig. 146. — POMPE DE GAY-LUSSAC.

Pour obtenir un degré de compression très élevé, on accouple de différentes façons des pompes analogues à celles-là. Dans les expériences que fit M. Regnault au Collège de France, relativement à la loi de Mariotte (page 284), il avait besoin d'instruments de compression très puissants. Il accouplait donc trois pompes, dont les tiges sont articulées à trois portions coudées d'un axe, par l'intermédiaire de trois bielles ; l'axe, muni d'un volant, est mis en mouvement à l'aide de manivelles. Les diverses soupapes d'aspiration communiquent avec un réservoir unique en rapport avec l'air extérieur, et le gaz refoulé se rend dans un autre réservoir mis en communication avec les appareils particuliers dont il se servait.

**EXPÉRIENCES DIVERSES AU MOYEN DE LA MACHINE PNEUMATIQUE ET DE LA MACHINE DE COMPRESSION.** — On a imaginé un grand nombre d'expériences pour montrer les effets du vide ; quelques-unes sont répétées dans tous les cours de physique. Outre celles du *crève-vessie* et des *hémisphères de Magdebourg*, dont nous avons parlé ci-dessus, nous en citerons quelques-unes.

**FONTAINE DANS LE VIDE.** — On place sous la cloche de la machine pneumatique un vase aux trois quarts plein d'eau, dont la partie supérieure est ouverte par un robinet (*fig. 147*). A mesure que le

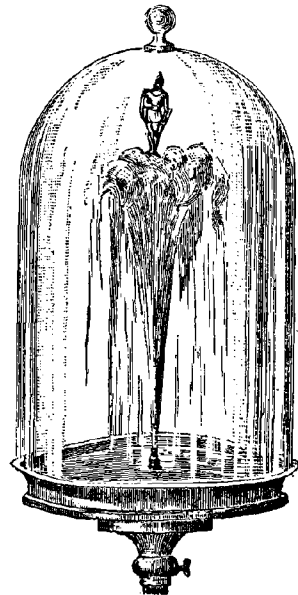


Fig. 147.

FONTAINE DANS LE VIDE.

vide se fait, l'air de ce vase, pressant le liquide, le fait jaillir avec assez de force pour supporter une petite statuette creuse en porcelaine.

**COUPE-POMME.** — Que l'on remplace la cloche par un manchon de verre dont les bords soient tranchants, et que l'on mette une pomme pour boucher l'ouverture, la pression atmosphérique poussera la pomme à l'intérieur de la cloche; elle sera coupée, et le cylindre ainsi formé pénétrera dans l'appareil.

Si, au lieu d'une pomme on plaçait la main, on verrait, même si les bords n'étaient pas tranchants, la main se gonfler par la dilatation de l'air que renferment les tissus, et si l'on continuait l'expérience, le sang ne tarderait pas à jaillir.

**MOULINET DANS LE VIDE.** — Un petit moulin à ailettes (*fig.* 148) est placé sous la cloche de la machine pneumatique; on fait le vide. Si l'on ôte alors une petite cheville en cuivre qui bouche un trou latéral de la cloche, l'air extérieur se précipite dans l'appareil et met en mouvement le moulinet.

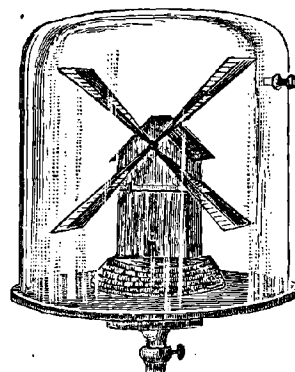


Fig. 148.

MOULINET DANS LE VIDE.

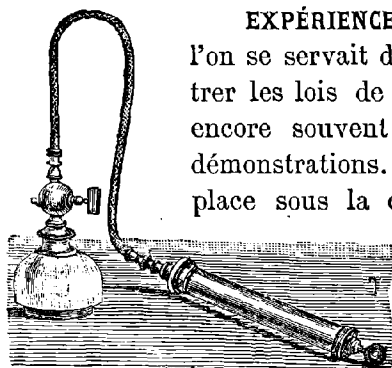


Fig. 149. — VENTOUSE CHARRIÈRE.

**EXPÉRIENCES SCIENTIFIQUES.** — Nous avons vu que l'on se servait de la machine pneumatique pour démontrer les lois de la chute des corps; nous nous servirons encore souvent de ce précieux instrument pour nos démonstrations. Citons ici quelques expériences. Que l'on place sous la cloche d'une machine pneumatique une bougie allumée, on voit la flamme perdre de son intensité à mesure que l'air se raréfie, et finir par s'éteindre. Que l'on y place un animal, un mammifère ou un oiseau, il périt presque aussitôt; un poisson résiste davantage, un insecte vit plusieurs jours dans une atmosphère excessivement raréfiée. L'on démontre ainsi que l'oxygène contenu dans l'air est indispensable à la combustion et à la vie.

En médecine, on fait usage des ventouses à pompe, petites cloches de verre dont on applique l'ouverture sur la peau: une petite machine pneu-

matiquée à un seul cylindre, mastiquée sur la tubulure de la cloche, permet de faire le vide (*fig. 149*). La peau se tuméfie, et, si on la pique, le sang jaillit aussitôt.

Le célèbre fabricant d'instruments de chirurgie et d'appareils scientifiques, M. Charrière, a donné à ces ventouses la forme que nous reproduisons dans la figure.

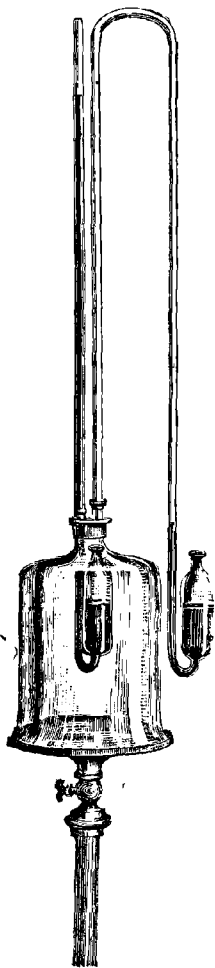


Fig. 150. — CLOCHE  
A DOUBLE BAROMÈTRE.

**CLOCHE A DOUBLE BAROMÈTRE.** — La cloche (*fig. 150*) placée sur la platine a deux ouvertures : l'une est traversée par un baromètre à siphon, l'autre par un grand tube recourbé, se terminant par un réservoir. Les deux tubes sont pleins de mercure : dans le baromètre, il s'élève à la hauteur de la pression atmosphérique ; dans le tube recourbé, il est au même niveau dans le réservoir et dans le tube. On fait agir la machine pneumatique ; à mesure que le vide se fait, le mercure baisse dans le baromètre, parce que la pression de l'air dans la cloche devenant moindre, la colonne de mercure qui lui fait équilibre diminue de hauteur ; en même temps, dans le tube recourbé, il quitte le réservoir et monte dans le tube vertical, mesurant ainsi la différence qui existe entre la force élastique de l'air dans le récipient et la pression atmosphérique. Si l'on pouvait faire le vide exactement, le niveau du mercure serait le même dans les deux branches du baromètre, tandis que, dans le tube recourbé, il serait monté à la hauteur où il était d'abord dans le baromètre marquant la pression atmosphérique.

**APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU VIDE ET DE L'AIR COMPRIMÉ.** — Les applications de la machine pneumatique et de l'air comprimé sont déjà fort diverses dans l'industrie, et elles sont susceptibles

de beaucoup d'extension.

Mille petits appareils sont basés sur leur emploi : les *patères pneumatiques* qui se tiennent contre les parois d'une chambre sans qu'il soit nécessaire d'y enfoncer de gros clous ; les *dentiers artificiels* qui suppriment les crochets par lesquels les dents s'accrochaient aux gencives ; de petits *injecteurs* destinés à remplacer les clyso pompes et les irriga-

teurs, etc. Nous citerons encore l'*appareil hydrothérapique* de M. Walter Lécuyer, qui permet de prendre à domicile ces douches, dont le rôle thérapeutique est de plus en plus considéré par le public. Cet appareil (*fig. 151*) consiste en un cylindre de tôle d'environ 2 mètres de hauteur, auquel est adaptée une pompe, au moyen de laquelle on chasse de l'eau dans l'intérieur bien clos du cylindre. L'air qui y est enfermé est comprimé par l'eau au fur et à mesure que celle-ci y pénètre, jusqu'à ce qu'il soit réduit d'environ deux tiers, c'est-à-dire qu'il supporte 3 atmosphères. Un tube traverse tout le cylindre et sort par le haut, se contourne et se termine en pomme d'arrosoir. Si l'on ouvre le robinet qui ferme ce tuyau dans le haut du réservoir, l'eau chassée par la pression de l'air se précipite violemment dans le tuyau, et détermine un jet assez puissant, et pendant un temps assez long, pour que le système capillaire du patient soit fouetté aussi énergiquement qu'il est désirable.

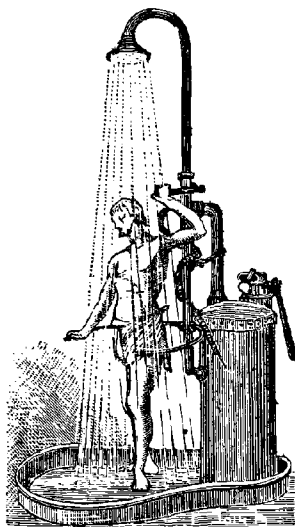


Fig. 151.

APPAREIL HYDROTHERAPIQUE  
à air comprimé.

**ÉGOUTTAGE DU SUCRE DANS LES RAFFINERIES.** — Lorsque les cassonades ont été fondues, clarifiées, filtrées, versées dans les formes, on doit procéder à l'*égouttage* des pains, afin de les débarrasser de la mélasse que le sucre pourrait encore contenir. Cette opération dure *sept ou huit jours*, pendant lesquels les pains, rangés la pointe en bas sur des coffres percés de trous, s'égouttent peu à peu. Mais, dans certaines fabriques, on l'effectue en *un quart d'heure* au moyen de l'appareil appelé *sucette* (*fig. 152*).

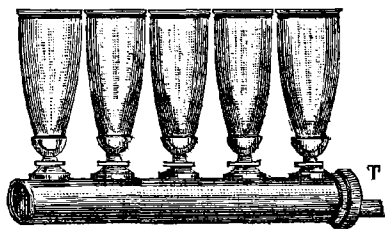


Fig. 152. — SUCETTE.

Sur un tube de cuivre de petit diamètre sont des tubulures verticales munies de robinets et garnies de récipients dans lesquels se placent les pains de sucre à égoutter. Au moyen d'une machine pneumatique, généralement celle de M. Bianchi, on fait le vide dans le tuyau; le sirop, aspiré violemment, coule en abondance, se rend dans un réservoir préparé à cet effet, et le sucre est devenu absolument sec.

**FABRICATION DE L'EAU DE SELTZ.** — L'eau de Seltz naturelle, c'est-à-dire celle que produit la célèbre fontaine du duché de Nassau, n'est

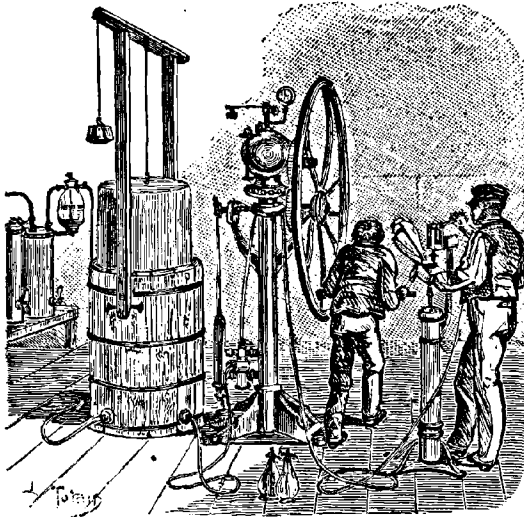


Fig. 153. — FABRICATION DE L'EAU DE SELTZ.

que de l'eau ordinaire contenant en dissolution de l'acide carbonique. Pour préparer artificiellement cette boisson rafraîchissante et saine, on charge dans de l'eau pure de l'acide carbonique au moyen d'une forte pression. L'acide carbonique, produit dans un cylindre métallique (fig. 153) par de l'acide sulfurique étendu sur du carbonate de chaux, traverse trois flacons laveurs et se rend dans un gazomètre. Une pompe le refoule, en même temps que l'eau, dans un récipient sphé-

rique, muni d'un manomètre, et le liquide ainsi formé se rend dans un siphon, où il pénètre sous une pression de 10 à 12 atmosphères.

**MACHINES SOUFFLANTES.** —

Le soufflet de nos foyers n'est pas autre chose qu'un appareil propre à aspirer et à comprimer l'air ; lorsqu'il s'agit d'un courant d'air plus intense, on a recours à la machine soufflante qui agit comme la pompe de Gay-Lussac. C'est un vaste cylindre (fig. 154) dans lequel se meut par la vapeur un piston plein. En abaissant celui-ci, l'air qu'il comprime au-dessous de lui ferme la soupape de gauche et ouvre celle de droite, tandis qu'au-dessus de

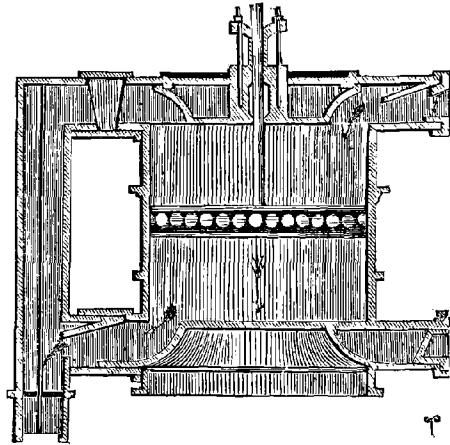


Fig. 154. — MACHINE SOUFFLANTE.

lui la soupape de droite se ferme et celle de gauche s'ouvre ; il s'échappe alors par un conduit latéral aboutissant à une tuyère, c'est-à-dire à une immense buse de soufflet. Si le piston remonte, le contraire a lieu, et alors l'air pénètre par le haut dans le canal latéral qui aboutit à la tuyère.



CHEMIN DE FER ATMOSPHÉRIQUE DE SAINT-GERMAIN. — L'idée de faire servir la pression atmosphérique comme force motrice remonte aux premières expériences d'Otto de Guéricke; mais, en 1810 seulement, un

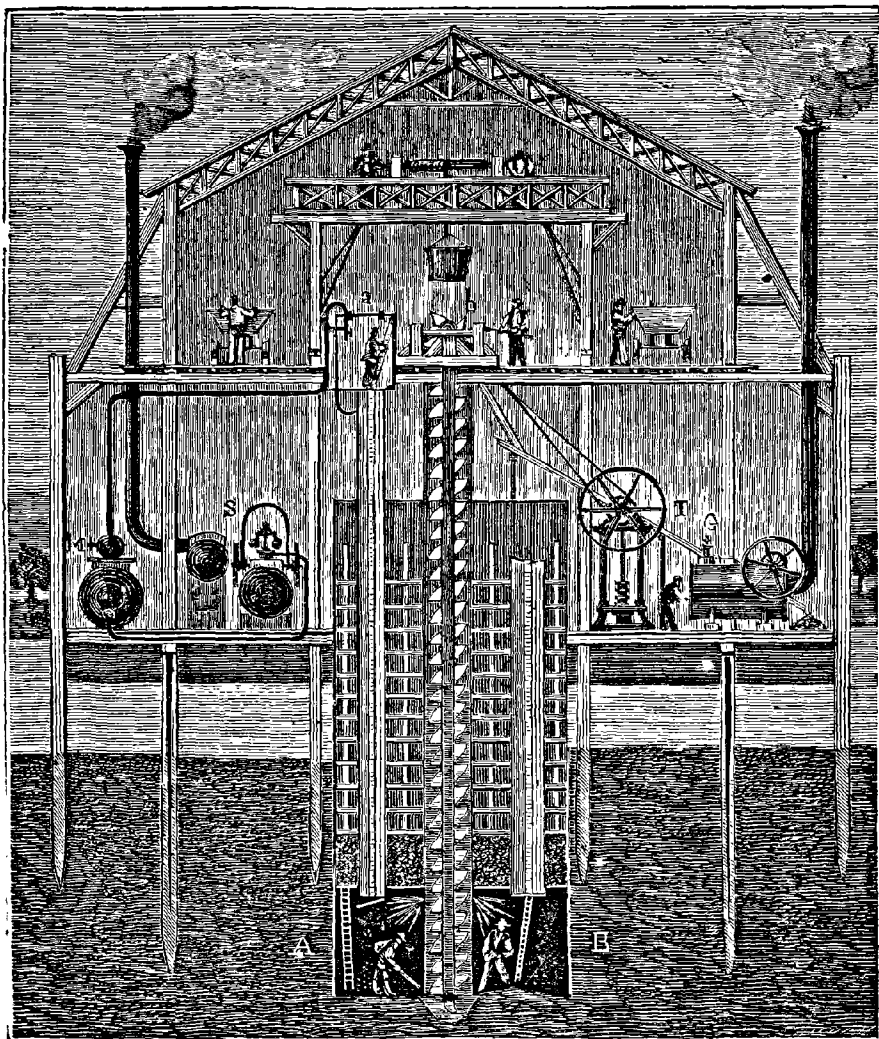


Fig. 155. — Fondation des piles du pont de Kehl (page 310).

ingénieur suédois, D. Medhurst, voulut faire passer cette idée dans la pratique. Ses tentatives furent infructueuses. En 1824, un Anglais, Wallace, imagina un tube dans lequel on faisait le vide et que devaient parcourir les wagons. Enfin, en 1846, perfectionnant le système de D. Medhurst,

des ingénieurs anglais, MM. Clegg et Samuda, construisirent des chemins de fer atmosphériques. Le premier reliait Kingstown et Dalkey, en Irlande, stations distantes de 3 kilomètres environ. Presque aussitôt en Angleterre furent établis les chemins de fer atmosphériques de Pouth-Devor, de Croydon, et en France celui de Saint-Germain-en-Laye.

Nous copions dans un journal de l'époque un article annonçant le fonctionnement de ce système, afin de montrer l'enthousiasme qui l'accueillit alors, enthousiasme bientôt refroidi par les dépenses considérables qu'exigeait l'exploitation du chemin de fer. Inauguré en 1847, la compagnie de l'Ouest fut obligée de l'abandonner en 1860.

« Après tant d'espérances et d'inquiétudes, tant de promesses et de retards, tant d'essais et de tâtonnements, le chemin de fer atmosphérique de Saint-Germain est enfin livré à la circulation. Depuis la première application de la vapeur, rien d'aussi grave ne s'était produit dans la science des locomotions ; car il ne s'agissait de rien moins que de la suppression de la vapeur elle-même, qui du moins n'est plus employée qu'indirectement dans le nouveau système. Cette rampe ardue de Saint-Germain, devant laquelle les plus puissantes machines avaient reculé, est aujourd'hui escaladée par d'énormes convois le plus lestement du monde. Les voyageurs, au lieu de débarquer au Pecq et de suer sang et eau pour gravir la fameuse terrasse, sont enlevés comme des fétus de paille jusqu'au pied du château où naquit Louis XIV.

» C'est là une conquête admirable sans doute, mais elle a été chèrement payée. L'État y a contribué pour deux millions, et la compagnie du chemin de fer pour une somme plus forte encore. Le nouveau chemin n'a pourtant que 8,667 mètres (de Nanterre à Saint-Germain) ; et toutes les difficultés du problème ne sont que du Vésinet au château, sur 3 kilomètres environ : un pont de vingt ou trente arches sur la Seine, un remblai gigantesque, une tranchée qui rappelle les gouffres des montagnes, un souterrain qui passe sous la forêt royale, et une rampe telle qu'on n'en avait jamais franchi depuis le temps où

» Dans un chemin montant, sablonneux, malaisé,  
Six forts chevaux traînaient un coche. »

Laissons M. Michel Chevalier nous décrire le mécanisme :

« Un chemin atmosphérique est, à proprement parler, une série d'appareils disposés à la file l'un de l'autre, en communication l'un avec l'autre, et longs chacun de 3, 4 ou 5 kilomètres. Il consiste en un gros tube de fonte couché entre les rails, sur le sol, dans lequel des machines à vapeur, espacées comme nous venons de le dire, épuisent l'air par aspiration. Un

piston placé dans le tube est poussé par la pression de l'atmosphère de manière à se porter en avant dans le tube du côté où l'air s'épuise et où se fait le vide. Le piston marche ainsi rapidement dans l'intérieur du tube ayant une fente longitudinale en dessus. Cette fente est fermée par une soupape ou charnière qui ne se relève en chaque point qu'à l'instant même du passage du convoi, et qui se rabat aussitôt de manière à clore hermétiquement le tube, afin que de nouveau on puisse y faire le vide par l'aspiration de l'air, quand un autre convoi se présentera.

» A Saint-Germain, comme la résistance à vaincre est très grande à cause de la pente à gravir ( $0^m,035$  par mètre), tout est doublé. Il s'y trouve deux doubles machines d'aspiration à vapeur. Le poids énorme de quelques-unes de ces pièces donnera une idée de leur puissance. Un cylindre à vapeur pèse 5,800 kilogrammes ; un cylindre pneumatique, 8,000 ; un volant, 13,000 ; la grande roue dont l'arbre transmet le mouvement aux pistons pneumatiques, 18,000. Les bielles en fer forgé des cylindres à vapeur pèsent 2,230 kilogrammes ; l'arbre qui fait mouvoir les pistons pneumatiques, 6,238. Tout cela est l'œuvre de M. Halette d'Arras, de M. Charbonnier de Colmar, et de M. Eugène Flachet, ingénieurs. Il y a trente ans, il n'y avait pas en Europe une forge qui eût pu se flatter de réussir une pièce pareille. »

On a essayé, en reprenant l'idée de Wallace, de construire des chemins de fer atmosphériques se mouvant à l'intérieur d'un tube. Une ligne d'essai a été construite par M. Rammel dans le parc de Sydenham. La première voiture du convoi porte un disque, muni d'une sorte de brosse sur les bords, qui intercepte suffisamment l'air. On produit le vide dans le tube, et les wagons sont attirés immédiatement.

A New-York, il existe également un petit chemin de fer atmosphérique menant d'un bout à l'autre de la ville, de Warren-street à la rivière du Nord. Mais toutes ces tentatives, à moins de perfectionnements non encore réalisés, ne paraissent pas devoir être mises en pratique sur une grande échelle.

**POSTE PNEUMATIQUE.** — A Paris, à Londres, dans quelques autres très grandes villes, l'encombrement des lignes télégraphiques entre certains quartiers a nécessité l'installation de tubes atmosphériques, concurremment avec les fils électriques. Une boîte, fermant hermétiquement le tube, est chargée de plusieurs plis, dont chacun contient les dépêches envoyées par la station centrale aux stations de passage. Cette boîte, cylindrique, est aspirée rapidement par le vide fait en avant ; quelquefois, comme au *pneumatic Dispatch* de Londres, elle est en même temps refoulée par la

pression. L'installation de ce tube à Paris, dans un périmètre assez étendu (ministère de l'intérieur, Bourse, Château-d'Eau, etc.), a été assez bien faite pour qu'une différence de pression d'une demi-atmosphère suffise pour entraîner la boîte.

Récemment, un nouveau perfectionnement a été introduit dans le service de ces tubes pneumatiques par M. Ch. Bontemps (1). Il arrive parfois que la boîte s'arrête en chemin, bouche la voie et suspende toute communication.

Il fallait savoir où le tuyau était bouché : pour cela on mettait le tuyau en rapport avec un réservoir, contenant un volume d'air connu, sous une pression déterminée. Une fois la communication établie, on mesurait la pression nouvelle, et, de sa diminution, on concluait le volume d'air qui avait pénétré dans le tube, et, par suite, la longueur même du tube jusqu'au point obstrué. Le moyen, peu exact en pratique, a été ainsi remplacé par le *chronographe* de M. Ch. Bontemps.

A l'extrémité libre du tuyau on tire un coup de pistolet. L'onde sonore chemine dans le tube, se heurte à l'obstacle et revient au point de départ, où elle ébranle une membrane fixée à l'origine même du tube ; elle se réfléchit et retourne sur ses pas jusqu'à la boîte arrêtée pour se réfléchir une seconde fois sur la membrane. L'intervalle de temps compris entre les deux ébranlements est enregistré électriquement et mesuré en fractions de secondes par un trembleur électrique ; on connaît la vitesse du son par seconde, on en déduit avec précision la distance où s'est arrêtée la boîte aux dépêches.

**FONDATION DES PILES DE PONTS TUBULAIRES (2).** — Avant 1843, un grand nombre d'ingénieurs anglais remplacèrent le système ordinaire des pilots en bois, sur lesquels on asseyait les fondations des ponts, les uns par des pilots en bois ou en fonte garnis à leur extrémité inférieure d'un pas de vis, et dont l'enfoncement s'obtenait par un mouvement de rotation produit au moyen d'une sorte de cabestan ; les autres, par des pilots creux en fonte, qu'on enfonçait comme ceux en bois au moyen de *sonnettes*.

Plus tard, M. le docteur Pots eut l'idée, non pas d'agir sur le pieu, pour obtenir son enfoncement, mais sur le sol environnant. On prend un pilot creux en tôle ou en fonte, semblable à un énorme tuyau de poêle ; on

(1) De Parville. *Causeuses scientifiques*.

(2) Cet historique est dû à M. Prat, qui l'a publié dans le *Messager de l'Allier*, lors de la construction du pont tubulaire de Moulins, afin de réclamer pour un Français, M. Trigert, l'honneur de l'invention, attribuée jusque-là, bien à tort, à un Anglais.

le ferme à sa partie supérieure par un couvercle luté avec soin et que traverse un conduit en cuir communiquant avec une machine d'aspiration. Si, ainsi disposé, on l'établit verticalement sur le lit d'une rivière, en faisant fonctionner cette machine, l'eau qui l'environne tend à s'y précipiter; mais, dans cette brusque irruption, les couches de terrain sur lequel repose le pilot sont désagrégées, et leurs débris entraînés par l'eau dans son intérieur. Le pieu descend alors, en vertu de son propre poids, auquel vient s'ajouter la pression atmosphérique qui s'exerce sur son couvercle. Lorsqu'il est rempli de terre et d'eau, on le vide, et on recommence l'opération jusqu'à ce qu'on soit arrivé à la profondeur voulue. On coule alors du béton dans l'intérieur de ce pilot.

C'est d'après ce principe qu'on a établi les fondations de plusieurs ponts en Angleterre; les pilots employés avaient des diamètres variant entre 40 et 70 centimètres.

Vers 1845, un ingénieur français, M. Trigert (1), chargé de l'établissement et de l'exploitation des houillères de Chalennes (Maine-et-Loire), situées dans une île de la Loire, se servit d'un procédé tout nouveau pour se mettre à l'abri de l'envahissement des eaux dans le forage des puits d'extraction et dans l'exploitation même de la mine. Dès que les puits furent arrivés au niveau de l'eau, il y fit descendre un tube en fonte formé d'anneaux cylindriques de 1 mètre à 1<sup>m</sup>,50 de rayon, boulonnés entre eux; après avoir établi sur sa partie supérieure un appareil auquel on a donné le nom de *sas à air*, il y comprima de l'air au moyen d'une machine soufflante; cet air, agissant comme un piston, repoussa l'eau qui se trouvait à la partie inférieure du tube par-dessous les bords, et les ouvriers descendus au fond du puits purent y continuer leur forage sans être incommodés par les eaux. Mais, à mesure que cette opération se continuait, le tube descendait, et on y ajoutait de nouveaux anneaux par sa partie supérieure. C'est ainsi qu'on est arrivé à dépasser les couches aquifères du lit de la Loire pour extraire le charbon.

En 1852, un ingénieur anglais, M. Cubbit, chargé de la direction des travaux du pont de Rochester (comté de Kent), se rappelant les résultats remarquables obtenus par l'emploi de l'air comprimé dans les mines de Chalennes, eut l'idée non plus d'enfoncer les pilots, comme l'avait fait M. Pots, au moyen du vide, mais bien au moyen de l'air comprimé, d'après des procédés qui sont à peu de chose près ceux de M. Trigert. Ce pont, tout en maçonnerie, repose sur deux piles; chacune d'elles est établie

(1) TRIGERT (Émile), ingénieur civil (1809-1867), géologue distingué, lauréat de l'Académie des sciences.

sur une plate-forme soutenue par 14 pilots en fonte de 2 mètres de diamètre et remplis de béton. Les fondations ont jusqu'à 18 mètres de profondeur.

Peu de temps après furent construits les ponts de la Quarantaine à Lyon, de Mâcon sur la Saône, de Moulins sur l'Allier, de Bordeaux pour le viaduc de jonction du chemin de fer d'Orléans au chemin de fer du Midi, avec ce même système un peu modifié. Le diamètre des pilots fut porté jusqu'à 3 mètres ; on réduisit leur nombre à trois par pile, et enfin, au lieu de les arrêter au niveau de l'étiage pour y asseoir les maçonneries, on les éleva jusqu'à la hauteur du tablier qu'ils soutiennent, en en faisant de véritables colonnes remplies de béton et reliées entre elles par des panneaux en fonte.

**PONT DE KEHL.** — En 1860, de nouveaux perfectionnements furent apportés au système, pour la construction du pont de Kehl, entreprise par la Compagnie du chemin de fer de l'Est, dans le but de réunir les chemins de fer français avec le chemin badois.

Il avait été reconnu que les quatre piles que l'on avait décidé de poser dans le lit du Rhin ne pouvaient présenter une stabilité convenable qu'à la condition de s'enfoncer jusqu'à 25 mètres environ au-dessous du niveau ordinaire des eaux, ce qui représente une profondeur de 20 mètres au-dessous du fond de la rivière.

Comme avait fait M. Trigert, les ingénieurs chargés de l'exécution du grand travail de Kehl firent descendre au fond du fleuve un vaste tube en métal, ouvert à sa partie inférieure, fermé à la partie supérieure ; l'eau était chassée par la pression de l'air comprimé. Les ouvriers s'y introduisaient alors et travaillaient à pied sec au fond du fleuve ; les terres déblayées, les graviers, étaient ensuite tirés au jour au moyen de treuils et de bennes, et le travail recommençait.

L'interruption du travail, causée par le temps employé à la manœuvre d'extraction des terres déblayées, rendait beaucoup trop longues les opérations. C'est sur ce point que portèrent les perfectionnements.

Chaque pile du pont exige l'emploi de quatre chambres rectangulaires en tôle, telles que celle qui est représentée en AB dans notre dessin (*fig.* 153, page 305) ; ces chambres ont 7 mètres de longueur sur 5<sup>m</sup>,80. On les fait descendre dans le lit du fleuve en même temps et au même niveau.

En décrire une suffira pour donner une idée complète de l'appareil destiné à la fondation d'une pile.

La chambre est ouverte à sa partie inférieure, qui repose sur le sol ; la partie supérieure est fermée par une plaque de tôle que traversent trois

tubes : l'un, placé au centre, descend jusqu'au sol et renferme une chaîne à godets, appelée *noria*, qui extrait au jour, à mesure qu'on les déblaye, les graviers et les sables ; les deux autres tubes, plus petits, sont remplis, comme la chambre, d'air comprimé, et à leur partie supérieure se trouvent deux compartiments où les ouvriers pénètrent du dehors avant de descendre dans la chambre. Notre dessin ne représente qu'un de ces compartiments *a* ; l'autre est supprimé pour laisser voir la tête de la *noria* et le plan incliné sur lequel se déversent les pierres et le sable élevés dans les godets. Le compartiment *a*, nommé écluse à air comprimé, peut à volonté être mis en communication avec le dehors ou avec la chambre, au moyen de soupapes qui s'ouvrent pour laisser entrer ou sortir les ouvriers. Lorsque les ouvriers, au nombre de sept ou huit, sont entrés dans cette écluse à air, la soupape se referme et l'on commence à ouvrir un robinet qui introduit peu à peu l'air comprimé de la chambre dans l'écluse.

C'est alors, à mesure que la pression s'établit d'une portion à l'autre de l'appareil, que les ouvriers éprouvent un léger malaise, auquel du reste ils s'habituent assez vite ; le moyen qu'ils emploient pour s'en délivrer consiste à aspirer fortement l'air comprimé qui les entoure, puis refermer la bouche et comprimer encore, par un effet des muscles du thorax et de la joue, cet air aspiré à pleins poumons ; la trompe d'Eustache se distend, et l'air peut pénétrer, par ce conduit qui s'ouvre ainsi, jusque derrière le tympan dont la membrane était pressée déjà à l'extérieur par l'air de l'écluse ; il s'établit alors un certain équilibre de pression sur les deux côtés du tympan, et l'on entend à ce moment une sorte de petit sifflement dans l'oreille, à la suite duquel le malaise disparaît entièrement.

Pour compléter la description de l'appareil, il nous reste à dire que les ouvriers, après que la pression est établie dans l'écluse *a*, dans le tube et dans la chambre AB, descendent dans cette chambre, creusent le sol et amassent les déblais au pied du conduit qui renferme la chaîne à godets. Pour qu'ils puissent, pendant leur travail, communiquer avec les ouvriers du dehors, un petit télégraphe électrique est installé dans la chambre. L'air comprimé vient du réservoir M, la pompe de compression est figurée en S ; de l'autre côté du tube, on voit le générateur de vapeur G et la machine T, qui communique le mouvement à la tête de la *noria*.

A mesure que la chambre descend, on construit au-dessus une sorte de grande caisse en bois dont les joints sont calfatés avec soin, et on verse du béton.

Quand l'appareil a été descendu à la profondeur voulue, on a enlevé seulement trois tubes ; on a laissé enfoui le reste de la chambre

et on a rempli de béton tout l'espace intérieur de la caisse en bois. On a formé de cette façon une énorme masse de maçonnerie enfoncée de 18 à 19 mètres au-dessous du fond et présentant la stabilité la plus complète.

**PONT DE COLLONGES.** — La notice relative aux fondations du pont de Collonges, publiée dans le volume consacré aux travaux présentés à l'Exposition universelle de 1878 par l'administration des ponts et chaussées, nous donnera un aperçu des progrès réalisés depuis.

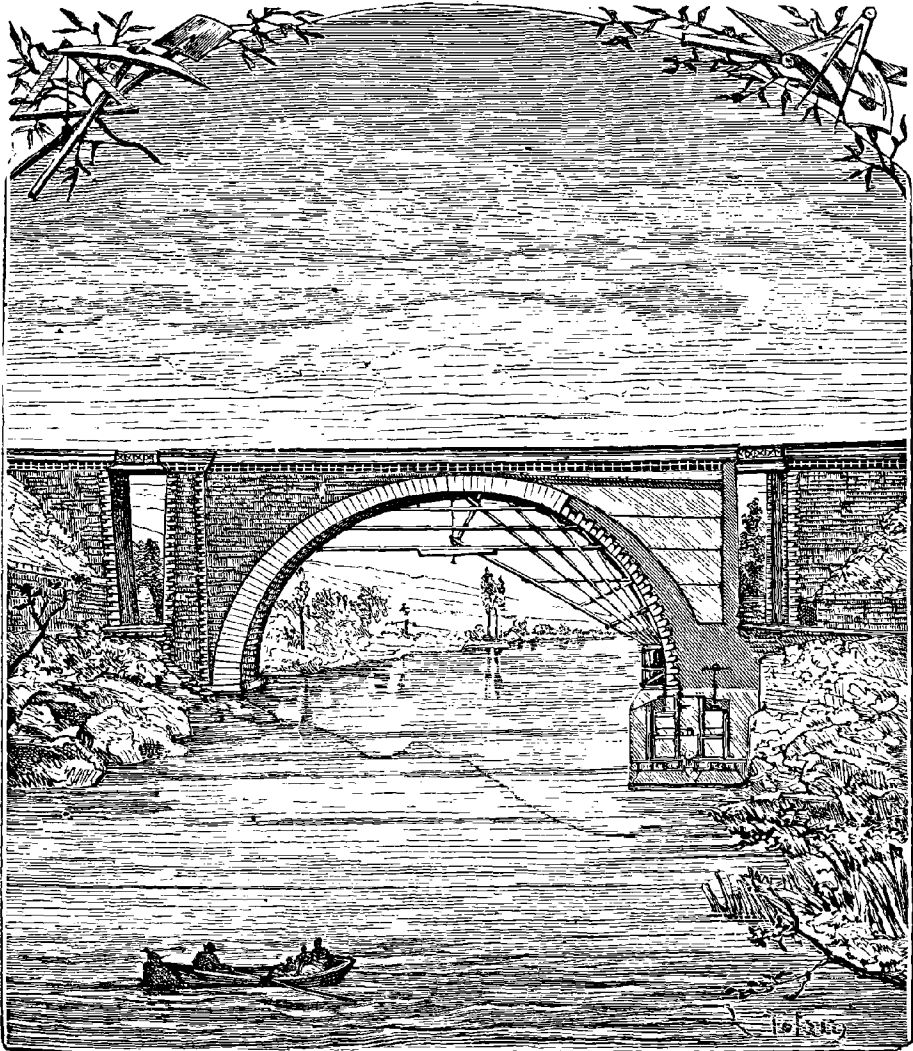
« Les dispositions du caisson diffèrent de celles qui avaient été adoptées jusque-là. La chambre de travail seule renfermait de l'air comprimé, et toutes les manœuvres pour l'extraction des déblais ou la descente des matériaux étaient faites à l'air libre. Les *sas à air* étaient fixes, en contre-bas du plafond de la chambre de travail et installés de telle sorte que le passage des bennes fût sans effet appréciable sur la tension de l'air. La chambre de travail, construite en forte tôle de 0<sup>m</sup>,009, avait ses parois renforcées par des armatures ; des consoles, supportant le plafond, le mettaient en état de résister à une surcharge de 1,500 tonnes. Au-dessus, une simple chemise en tôle de 0<sup>m</sup>,004 séparait de l'eau la maçonnerie élevée à l'air libre.

» Le plafond était traversé, vers son milieu, par un puits rectangulaire de 2<sup>m</sup>,85 sur 1<sup>m</sup>,15, subdivisé lui-même par des cloisons transversales, en trois cheminées ouvertes à l'air libre. La cheminée centrale contenait les échelles et le tuyau d'amenée de l'air comprimé. Les deux cheminées latérales servaient au passage des bennes montantes et descendantes, dont un homme dirigeait les mouvements à l'entrée et à la sortie de la chambre de travail. Chaque benne, pour entrer et pour sortir, traversait un coffret cubique formant sas, de 0<sup>m</sup>,85 de côté, par le jeu d'un tiroir et d'une porte-clapet.

» Au fond de la cheminée centrale, entre les deux coffrets des bennes, était ménagé un palier où se tenait l'ouvrier chargé de décrocher et d'accrocher ; le même ouvrier commandait la manœuvre des robinets. De ce palier on pouvait descendre, par une porte verticale, de 0<sup>m</sup>,50 de largeur sur 0<sup>m</sup>,90 de hauteur, dans une petite chambre formant écluse pour le passage des hommes et ouvrant, par une seconde porte verticale de 0<sup>m</sup>,50 sur 1<sup>m</sup>,40 dans la chambre de travail. Le plancher de cette écluse était seulement à 0<sup>m</sup>,40 au-dessus du niveau des fouilles. Les parois du puits, n'ayant à supporter aucune pression, étaient formées de feuilles de tôle de 0<sup>m</sup>,005 à 0<sup>m</sup>,007 et simplement préservées contre les chocs des bennes par un coffrage en planches de sapin. Tout le système d'ailleurs



des sas et des cheminées pouvait être enlevé dès que l'air comprimé n'aurait plus à refouler les eaux, c'est-à-dire au moment où le fonçage serait achevé et la chambre maçonnée intérieurement. »



Fondation des piles du pont de Collonges, sur le Rhône (page 312).

Les dispositions qui viennent d'être décrites présentaient les avantages suivants :

1° Le nombre des ouvriers placés dans l'air comprimé était réduit au minimum.

2° Les hommes, dans la chambre de travail, éprouvaient un sentiment de grande sécurité, parce que l'issue était rapprochée et la communication toujours facile avec l'ouvrier occupant le fond du puits à air libre.

3° L'introduction ou la sortie des matériaux ne produisait pas de changement sensible dans la pression.

4° La surface des parois à surveiller, pour éviter les fuites d'air comprimé, était aussi faible que possible.

5° La fixité de l'écluse à air permettait de réaliser une grande économie de temps. Sans interrompre le travail, on allongeait la cheminée au fur et à mesure de l'enfoncement du caisson, de façon à tenir toujours le sommet au-dessus du niveau des crues.

6° La dépense était notablement réduite par la substitution de tôles minces, pour la cheminée rectangulaire, aux tôles qui auraient eu à résister à la pression de l'air comprimé; enfin, on consommait peu d'air dans le passage des matériaux et des outils.

Ces fondations ont été exécutées sous la direction de M. Collet-Meygret, ingénieur en chef, par M. Sadi-Carnot, ingénieur ordinaire, qui a fait l'étude du système et qui en a suivi l'application.

Nous avons dit que les ouvriers travaillant dans des chambres d'air comprimé n'éprouvaient qu'un léger malaise bientôt dissipé; cependant, il faut avouer qu'ils sont exposés, au *moment de la décompression*, à des accidents assez graves: des paraplégies, des paralysies plus étendues; parfois même, quoique rarement, la mort est soudaine. Les expériences savantes de M. Paul Bert ont démontré que la cause de ces accidents est le brusque dégagement des gaz d'abord dissous, qui obstruent le calibre des vaisseaux et font courir au sujet les mêmes périls qu'une injection d'air dans les veines. Mais ces dangers de décompression brusque ne sont redoutables que lorsque la pression est au-dessus de 3 atmosphères, et rarement les plongeurs qui pénètrent le plus profondément dans l'eau vont au delà de 40 mètres, c'est-à-dire en subissant une pression de 4 atmosphères. Cependant, avec quelque précaution que l'on procède généralement à la décompression, les ouvriers travaillant dans les piles de pont, entre autres, sont souvent atteints d'horribles démangeaisons qu'ils appellent *puces*, de gonflements qu'ils désignent sous le nom de *mouton*. Ces indispositions graves, suite d'imprudences, sont des emphysemes du tissu sous-cutané et intra-musculaire, c'est-à-dire une infiltration gazeuse dans le tissu cellulaire. Elles se guérissent d'ailleurs facilement. Quant aux remèdes aux accidents graves provenant d'une brusque décompression, le savant physiologiste dont nous parlons préconise les

inhalations d'oxygène dès les premiers symptômes, puis, le premier danger passé, d'avoir recours à une recompression suivie d'une très lente décompression.

**LE SPIROPHORE.** — M. le docteur Woillez a récemment imaginé un appareil fondé sur les mêmes principes de pneumatique et destiné à rappeler à la vie les asphyxiés par submersion. Cet appareil de sauvetage (fig. 156), appelé *spirophore* (du grec *spiros*, souffle, et *phoros*, qui porte) détermine mécaniquement les mou-

vements respiratoires par une manœuvre facile, et fait parvenir l'air pur jusque dans les dernières ramifications des poumons. On sait que ce n'est point l'eau absorbée qui étouffe le noyé, mais seulement l'impossibilité où il se trouve de respirer; il suffit donc très souvent de rétablir la fonction respiratoire pour rappeler la victime à la vie. Le *spirophore* atteint ce but. Il se compose d'un cylindre de tôle fermé par un bout et ouvert de l'autre, et assez grand pour contenir le corps de l'asphyxié, la tête restant en

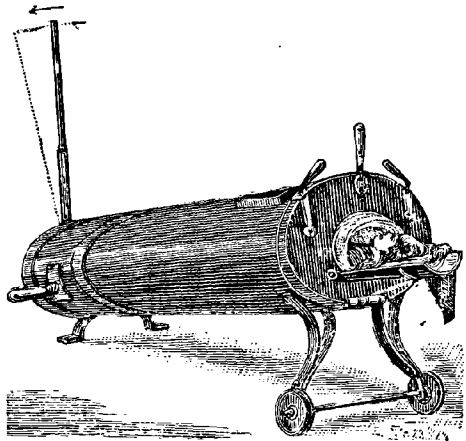


Fig. 156.

SPIROPHORE CONSTRUIT PAR M. CHARRIÈRE.

dehors. On clôt l'ouverture autour du cou à l'aide d'un disque de peau. Le cylindre est en communication par un tuyau avec un puissant soufflet renfermant plus de 20 litres d'air, qui se manœuvre par l'intermédiaire d'un levier comme une pompe.

Lorsque l'asphyxié est enfermé dans le cylindre on abaisse vivement le levier du soufflet, le vide se fait autour du corps, et l'air extérieur, obéissant à cette aspiration, pénètre dans l'intérieur de la poitrine, dont on voit très bien s'effectuer les mouvements d'inspiration et d'expiration par une lucarne en verre ménagée dans le cylindre. On abaisse le levier 18 fois par minute; les poumons sont ainsi traversés par au moins 135 litres d'air en un quart d'heure. Si alors la respiration naturelle ne s'est pas opérée, c'est qu'évidemment le noyé est mort; mais, dans un grand nombre de cas, son usage peut sauver la vie d'un malheureux; car on cite des exemples de noyés rappelés à la vie après une heure d'immersion.

Cet appareil, expérimenté déjà avec succès à l'hôpital Saint-Louis prendra probablement bientôt place dans les pavillons de secours aux noyés.

L'organisation de ces pavillons est extrêmement remarquable. Outre tous les médicaments nécessaires, ils contiennent un *caléfacteur* (fig. 157) de cuivre, de 1<sup>m</sup>,78 de longueur sur 0<sup>m</sup>,76 de largeur et 0<sup>m</sup>,53 de hauteur, à l'intérieur duquel 120 litres d'eau froide peuvent être portés à 35° en six minutes, et à l'ébullition en dix minutes. Ce caléfacteur communique avec une baignoire munie d'une douche. Sur 91 noyés (37 en 1875, 29 en 1876, 25 en 1877) apportés dans les postes, 4 seulement sont morts,

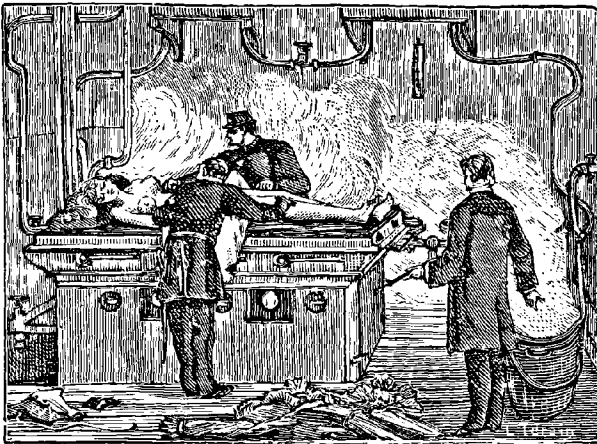


Fig. 157. — CALÉFACTEUR.

d'après la statistique publiée par la préfecture de police. Et ces noyés étaient restés dans l'eau, l'un plus de 35 minutes, l'autre une demi-heure; le troisième 7 minutes, le quatrième 20 minutes.

**FREINS PNEUMATIQUES.** — Pour hâter l'arrêt progressif d'un train, on se sert encore en France du

frein à engrenages que tout le monde connaît. Il y en a un sous la locomotive, un aussi à l'arrière, quelques autres disséminés sous des wagons çà et là, si le nombre des voitures est considérable. Au coup de sifflet du mécanicien, les agents tournent la manivelle qui fait fonctionner les organes de commande, et les roues, saisies entre des sabots, glissent au lieu de tourner. Le frottement sur le rail épuise plus ou moins rapidement la vitesse.

Depuis longtemps, on se préoccupe de remplacer ce système quelque peu primitif, et, dès 1872, aux États-Unis, plus de 1,500 locomotives et 5,000 wagons avaient le frein à air comprimé de Westinghouse. C'est un piston dans lequel l'air, en se comprimant, fait fonctionner un frein ordinaire. Le mécanicien commande tout le système au moyen d'un tuyau de transmission; en quelques instants les freins, dont chacun des wagons est muni, sont serrés, depuis le commencement jusqu'à l'extrémité du train. Avec ce frein, il est possible d'arrêter un train lancé à pleine vitesse en 200 mètres; aujourd'hui, avec le frein dont on se sert en France, il faut près d'un kilomètre.

Un autre système, appelé *frein de la Compagnie du Smith vacuum*

*brake*, a été essayé récemment par les ingénieurs de la Compagnie des chemins de fer du Nord, et leur avis favorable fait supposer que ce frein sera adopté.

Sous chaque wagon à frein est placé un cylindre hermétiquement clos, plissé, en caoutchouc fort, pouvant se replier sur lui-même, s'affaisser ou se relever, comme une lanterne vénitienne, maintenu fixe par une de ses bases et libre par l'autre. Tous ces cylindres sont reliés ensemble par un tube métallique de la dernière voiture jusqu'à la locomotive. Là, le tube métallique s'ouvre en un cône dans lequel on peut diriger un jet de vapeur emprunté à la chaudière. Ce jet entraîne l'air, le chasse au dehors et détermine une forte aspiration ; tous les soufflets, obéissant à la pression atmosphérique, se replient sur eux-mêmes, tirent sur le levier de commande du frein, disposé sous le wagon à la base mobile du cylindre, et presque instantanément le frein cale la roue, avec cet avantage que le serrage va de l'arrière à l'avant, puisque le vide se fait d'abord dans la voiture de queue, ce qui empêche les secousses produites par le choc des voitures l'une contre l'autre.

**CLOCHES A PLONGEUR.** — Pendant toute l'antiquité et tout le moyen âge, les abîmes de la mer étaient, pour ainsi dire, inconnus aux hommes. Pline rapporte les plus singulières et les plus fantastiques histoires sur les huîtres perlières, les éponges et le corail. Il nous initie à l'industrie des plongeurs allant chercher leur proie au fond des eaux et il nous raconte les luttes de l'homme contre les monstres marins :

« Une multitude de canicules (*squales*) infestent les mers où sont les éponges, au grand danger des plongeurs. Ces hommes disent qu'une espèce de nuage, semblable pour la forme à des poissons plats, s'épaissit sur leur tête, la presse et les empêche de remonter à la surface ; que, pour cette raison, ils se munissent de stylets très aigus attachés à des lignes, et que le nuage, s'il n'était percé de la sorte ne s'écarterait pas. Tout ceci n'est, je crois, que l'effet de l'obscurité et de la peur : personne n'a jamais parlé d'un animal-nuage, d'un animal-brouillard (c'est le nom qu'ils donnent à cet ennemi). Mais ce qui est vrai, c'est un combat terrible avec les canicules (*squales*) ; elles attaquent les aines, les talons, et toutes les parties blanches du corps ; la seule ressource, c'est d'aller au-devant d'elles et de prendre l'offensive ; en effet, elles ont autant peur de l'homme qu'elles lui font peur. Sous l'eau la partie est égale, mais à la surface de l'eau, le danger est imminent ; le plongeur perd la ressource d'aller en face de la canicule, du moment qu'il s'efforce de sortir de la mer ; son seul espoir est en ses compagnons, qui tirent la corde attachée sous ses bras. Pendant le combat, il secoue de la main gauche cette corde, en signe de péril ; de la droite, armée d'un stylet, il soutient la

lutte. On le tire d'abord avec assez de lenteur ; mais, dès qu'il est dans le voisinage du navire, on le voit mettre en pièces, si on ne l'enlève avec une rapidité extrême ; et souvent, déjà tiré hors de l'eau, le plongeur est enlevé aux mains de ses compagnons, si lui-même, ramassant son corps en forme de boule, ne seconde leurs efforts. D'autres, il est vrai, brandissent des tridents ; mais le monstre a l'instinct de se placer sous le navire, et de là, il combat en sûreté. On met donc le plus grand soin à guetter l'approche de ce poisson redoutable. »

On voit que les procédés employés, les dangers à courir, les précautions à prendre étaient dans l'antiquité les mêmes que dans les temps modernes.

Voici, en effet, comment un voyageur décrit la pêche des éponges :

« C'est surtout en Grèce qu'a lieu cette pêche. Il faut, pour bien voir les pêcheurs dans leur travail, que l'eau soit calme et n'ait pas plus de dix ou douze mètres de profondeur. Ceux qui pêchent les huîtres à perles et le grand coquillage appelé *buccinum tritonium* descendent à une profondeur bien plus considérable. Ce n'est pas sans une profonde émotion que l'on voit partir deux hommes nus dans un petit canot, armés seulement d'un grand couteau attaché à leur ceinture de cuir ; ils s'arrêtent, fixent leur coup d'œil sur l'abîme ; puis soudain, l'un des deux, étendant les bras et entre-croisant les mains, plonge... La vague se referme sur lui ; au bout de quelques minutes le plongeur reparaît avec une grosse éponge, se hisse dans son canot, y jette négligemment sa conquête, et bientôt plonge de nouveau pour en apporter une autre, et ainsi de suite toute la journée, jusqu'à ce qu'à la fin, peut-être, il descende pour ne plus reparaître.

» Il travaille ainsi, ne revenant chez lui qu'épuisé de fatigue, saignant du nez et des oreilles : si une crampe raidit ses membres pendant qu'il plonge, c'en est fait de lui ; malheur à lui s'il rencontre au fond de la mer un bivalve qui l'étreint de ses huit bras, et fixe sur sa poitrine ses suçoirs absorbants, le *chamagigas*, monstre énorme qui existe dans ces mers comme dans les mers de l'Inde, et qui est de force à couper un câble. Malheur à lui s'il tombe dans la chevelure flottante du *chama griphode*, espèce de filet inextricable. Quelquefois, après avoir échappé à tous ces dangers, survient un requin qui le dévore. »

Passons à la pêche des perles, telle qu'elle s'exécute dans le golfe de Californie. Partout ailleurs, du reste, le procédé est à peu près semblable.

Les bateaux disposés pour la pêche contiennent les rameurs et les plongeurs. Ces derniers plongent alternativement, c'est-à-dire que l'un plonge alors que l'autre se repose. Une corde, à l'extrémité de laquelle est attachée une pierre d'une certaine grosseur et qu'ils tiennent entre leurs

orteils, les aide à descendre plus rapidement ; cette même corde, dont l'autre bout est fixé au canot, leur sert à remonter, lorsque leur poids est augmenté par celui des coquilles qu'ils ont détachées des rochers à dix ou douze toises au-dessous de la surface de l'eau. Ces coquilles se mettent dans un filet que le plongeur porte devant lui comme un tablier. Il n'est pas rare de voir ces hommes rester trois à quatre minutes sous l'eau, et remonter épuisés de fatigue, ce qui ne les empêche pas de plonger ainsi quarante ou cinquante fois dans une matinée. On choisit de préférence, comme plongeurs, à cause de leur courage et de leur habileté, les Indiens Hiaquis, qui habitent les bords de la rivière de ce nom. Quoique les requins abondent dans le voisinage de ces pêcheries, comme dans toutes les parties fréquentées de ces côtes, les Hiaquis plongent avec une témérité qui fait frémir, surtout lorsqu'on songe à la seule arme qu'ils ont avec eux. C'est un morceau de bois dont les deux bouts sont aiguisés et durcis au feu ; cette arme grossière, qu'ils portent dans la ceinture de leurs caleçons de cuir, s'appelle *ustaca*. On sait que, par suite de la conformation de sa mâchoire inférieure, le requin est obligé de se tourner sur le dos pour saisir sa proie ; c'est à ce moment qu'il plantent leur bâton dans sa gueule qui ne peut plus se refermer... Tous les soirs, les huîtres recueillies sont mises en tas sur le rivage, et là, on les laisse s'ouvrir par l'effet de la putréfaction que la chaleur ne tarde pas à déterminer. Lorsque cette putréfaction est complète, on lave les coquilles, comme on fait des sables aurifères. Ce lavage a lieu dans de grandes auges en bois ; on examine avec soin l'horrible masse de matière animale en décomposition, on en extrait les perles, sans s'inquiéter des miasmes pestilentiels qui s'en dégagent, on les livre au commerce, et nos dames délicates et élégantes s'en parent ensuite avec orgueil.

Il nous semble inutile de dire que, pendant le moyen âge, aucune tentative n'avait été faite afin de plonger impunément dans les eaux, de savoir ce qu'elles renfermaient ou afin de perfectionner les procédés employés pour aller arracher à leur sein ce dont on avait besoin. La Bible ayant déclaré la mer insondable, c'eût été un crime de violer ses secrets.

Vers 1677 seulement, Halley (1) inaugurait les voyages sous-marins en descendant à 15 mètres de profondeur au moyen d'une *cloche à plon-*

(1) HALLEY (Edmond), célèbre astronome anglais (1656-1742). Il reconnut la périodicité des comètes, et prédit dès 1705 le retour périodique de celle à laquelle on donne son nom. En 1678, à vingt-deux ans, il était reçu membre de la Société royale de Londres, et en devint secrétaire perpétuel en 1713. Astronome à Greenwich, il précisa la position de 350 étoiles. Au prix de nombreux voyages et d'un long séjour dans l'île Sainte-Hélène, il détermina les lois des variations de la boussole. C'est à lui que l'on doit la première édition des œuvres de Newton.

*geur* qu'il avait inventée et fait construire. C'est l'appareil, plus ou moins modifié, qui a servi jusqu'en 1830, et qui est souvent encore employé. Mais cet appareil ne sert guère que sur les côtes, pour la construction des jetées, des phares, des fortifications, des bassins, etc., partout, en un mot, où il faut exécuter d'importants travaux sous-marins.

La cloche à plongeur se compose d'une grande cloche de fonte, affectant la forme d'une pyramide tronquée, communiquant au moyen de tubes en caoutchouc avec une pompe foulante par sa partie supérieure, laquelle est formée d'une plaque très lourde et percée de nombreuses ouvertures vitrées pour donner du jour à l'intérieur de l'appareil. On a néanmoins besoin d'une lanterne pour travailler. Le poids de la cloche la fait descendre au fond de l'eau, et des chaînes de fer attachées à une grue permettent de la soulever, le travail fini. Elle porte des bancs ou des madriers transversaux. C'est là que les ouvriers se tiennent pendant qu'on descend l'instrument. Lorsqu'on arrive sur le sol, ceux-ci travaillent sur le fond de la mer; mais, comme ils ne peuvent sortir de leur étroite cellule, leur action est limitée à un très petit espace. Aussi se sert-on plus souvent, quand il ne s'agit pas simplement d'une fouille dans un endroit déterminé, du *scaphandre*.

**SCAPHANDRE.** — Le *scaphandre* (du grec *scaphè*, nacelle, et *aner*, *andros*, homme) est un vêtement fait de caoutchouc ou d'une autre étoffe imperméable et de métal, que revêt le plongeur et qui lui permet d'aller et de venir sous l'eau. Dès le siècle dernier un habitant de Breslau, le docteur Mhurr, avait tenté d'exécuter un appareil de ce genre; mais, après divers perfectionnements apportés successivement par MM. Siebe, Delange, Cabirol, etc., ce fut seulement de notre temps que MM. Rouquayrol, ingénieur, et Denayrouze, lieutenant de vaisseau, parvinrent à rendre cet appareil absolument propre à l'usage auquel il est destiné.

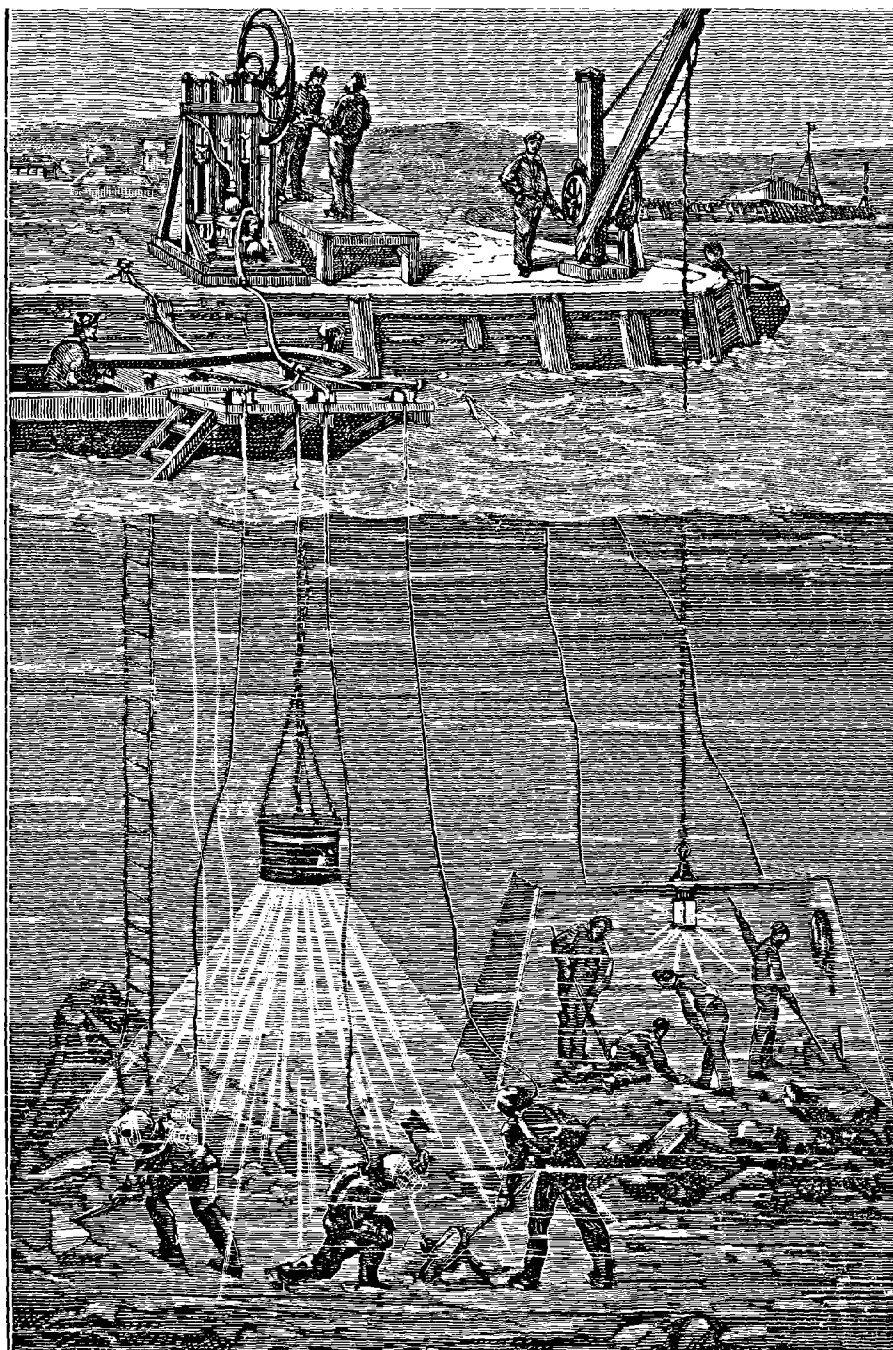
« Leur invention, dit un écrivain compétent (1), répond à toutes les exigences des travaux sous-marins. Que l'homme soit nu ou recouvert d'une enveloppe imperméable, sa respiration ne dépend que de sa volonté; c'est l'activité de ses poumons qui la règle dans tous les cas.

» On obtient ce résultat au moyen d'un *poumon artificiel* ou *réservoir régulateur*. Ce poumon artificiel consiste en un réservoir d'acier ou de fer, capable de résister à une très forte pression, et surmonté d'une chambre qui régularise l'afflux de l'air. Le plongeur le porte sur le dos. Un tuyau de respiration part de cette chambre, et se termine par un

(1) L. Sonrel. *Le Fond de la mer*.



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Cloches à plongeurs, scaphandres, etc. (pages 317 et suivantes).



ferme-bouche, fait d'une simple feuille de caoutchouc qui s'applique entre les lèvres et les dents du plongeur. Une soupape, dont ce tuyau est muni, se prête à l'expulsion de l'air et s'oppose à la rentrée de l'eau. Le réservoir d'acier est séparé de la chambre à air par une soupape conique s'ouvrant de la chambre à air vers le réservoir, de manière à ne céder que sous l'influence d'une pression extérieure, tandis que toute pression émanée du réservoir ferme la soupape.

» La marche de la pompe n'a pas besoin dès lors d'être régulière comme dans le scaphandre. L'air qu'elle envoie au plongeur s'emmagasine dans le réservoir d'acier. Le plongeur l'en tire suivant ses besoins et sans aucune fatigue, au moyen de la disposition suivante.

» La chambre à air est fermée par un couvercle mobile auquel est fixée la tige de la soupape conique. Le couvercle est formé d'un plateau d'un diamètre moindre que le diamètre intérieur de la chambre, et recouvert d'une feuille de caoutchouc qui, d'une surface plus grande que celle du plateau, le relie hermétiquement aux parois centrales de la chambre. Il est susceptible de céder à une pression, soit intérieure, soit extérieure, de s'élever dans le premier cas et de s'abaisser dans le second.

» Qu'une pression soit exercée sur le plateau, ce dernier la transmettra immédiatement à la soupape par l'intermédiaire de la tige; l'orifice de communication entre le réservoir et la chambre à air s'ouvrira, et le premier laissera couler dans la chambre une partie de l'air comprimé qu'il renferme. Si la chambre contient un excès d'air, la pression de ce gaz contre le plateau mobile maintient la soupape fermée.....

» L'ouvrier aspire, c'est-à-dire qu'il prend à la chambre à air une partie de son contenu; aussitôt la pression extérieure agit sur le plateau, le fait descendre, et avec lui la tige de la soupape qui s'ouvre. L'air du réservoir pénètre dans la chambre à air, rétablit l'équilibre entre l'intérieur de celle-ci et le milieu ambiant, fait remonter par suite le plateau. La soupape conique, revenant à sa position primitive, intercepte de nouveau la communication entre le réservoir et la chambre à air, jusqu'à ce qu'une autre aspiration ramène la même série de phénomènes. Dès que le plongeur respire, la soupape, qui se trouve sous le tuyau, s'ouvre et laisse échapper dans l'eau l'air expulsé de la poitrine... »

MM. Rouquayrol et Denayrouse ont tout fait pour que leur appareil, d'une utilité si incontestable pour les travaux sous-marins, fût à la portée de tout le monde. Il n'y a plus besoin de plongeurs habiles et intelligents, ni de manœuvriers longtemps exercés, pour donner à la pompe un mouvement uniforme. .

Malgré la perfection de cet appareil, d'autres machines ont été

présentées pour accomplir les travaux sous-marins. Nous parlerons de quelques-unes.

**BATEAUX SOUS-MARINS. — Hydrostat Payerne.** — Le bateau sous-marin Payerne et Lamiral, essayé sur la Seine en 1844, fut officiellement adopté en 1847. Conduit à Brest, il fut employé à débarrasser le chenal d'une roche primitive très dure, qui se trouvait précisément dans la ligne que devait parcourir le *Valmy* au moment de son lance-

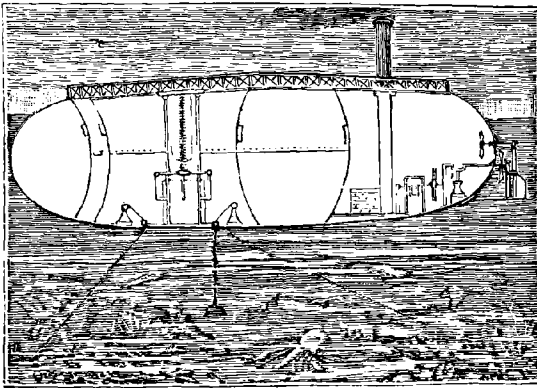


Fig. 158. — HYDROSTAT PAYERNE.

ment; plus tard, ramené à Paris, il servit à enlever la pile du pont au Double et à débarrasser le fond de la rivière de pilotis et de débris; en 1857, il enlève à Cherbourg, dans la passe Chantereine, de grandes quantités de roches; et, dès 1850, le ministre des travaux publics invitait, sur le rapport d'une commission spéciale, les ingénieurs à se

servir de ce bateau sous-marin pour les travaux hydrauliques qui leur seraient confiés.

Ce bateau (fig. 158) a une forme ovoïde; il est en tôle assemblée et solidement rivée. Des lentilles de verre, placées au milieu de la paroi, y laissent pénétrer un jour abondant. Il est divisé en plusieurs chambres ou compartiments, et la plus vaste, celle du milieu, qu'on appelle la chambre de travail, est munie d'un plancher mobile qu'on relève au moment où l'on veut établir le contact entre l'eau ou le sol du fond et l'intérieur du bateau. Celui-ci, avant le départ, est rempli d'air comprimé à une pression déterminée par la profondeur à laquelle on se propose de descendre; puis on laisse pénétrer au moyen de robinets, dans les compartiments spéciaux, une quantité d'eau telle que la densité du bateau soit un peu supérieure à celle du volume d'eau qu'il déplace: il gagne alors le fond. D'après cela, on conçoit aisément que, se trouvant, grâce à l'air qu'il contient, posséder une densité sensiblement égale à celle de l'eau, il s'y trouve à peu près en équilibre; et il suffit soit d'ajouter un peu d'eau, soit d'en enlever, pour que le bateau s'enfonce ou s'élève avec la plus grande facilité; le lest ainsi ajouté ou retranché représente en réalité le dernier milligramme qui fait trébucher une balance fortement chargée.

Une fois le bateau arrivé au fond de l'eau, l'équipage dévisse le plancher mobile du compartiment du milieu, et travaille tout à son aise. Si, au bout de quelques heures, l'air se trouve vicié, il suffit de le mettre en contact avec des substances capables d'absorber l'acide carbonique, ce qui, d'ailleurs, a lieu avec la plus grande facilité, en faisant passer l'air d'un compartiment dans un autre, et lui faisant alors traverser une solution de potasse.

*Le Nautilus.* — Sur un artifice à peu près semblable est fondé le *Nautilus*, cloche à plongeur dont le succès fut immense, il y a quelques années, en Amérique et en Europe.

Cet appareil se présente comme une énorme cloche à melon ; elle est faite en plaques de tôle boulonnée, et renferme deux compartiments. Le compartiment inférieur est fermé par des portes qui s'ouvrent à volonté ; le compartiment supérieur est surmonté d'une trappe pouvant s'ouvrir de haut en bas et de bas en haut pour le passage des ouvriers. L'intérieur est de plus garni latéralement de chambres pouvant se remplir d'air ou d'eau selon le besoin. La cloche est en communication, par un tube à dévidoir, placé d'un côté de la trappe et pouvant s'allonger, avec un récipient placé dans l'air, soit sur un radeau qui suit la cloche, soit sur une rive, si le travail se fait près du bord. Une pompe à compression entretient, au moyen d'un second tube placé de l'autre côté de la trappe, le récipient plein d'air suffisamment comprimé, et, par suite, la cloche remplie de cet air lui-même. L'intérieur est garni tout autour de chambres destinées à se remplir alternativement d'air ou d'eau, pour rendre le tout léger ou lourd, selon que l'on veut monter ou descendre.

A l'état de repos la cloche flotte sur l'eau ; mais si les 6 ou 7 ouvriers que peut contenir le compartiment du centre y sont entrés, et qu'ils veulent descendre au fond, ils ouvrent un robinet qui laisse entrer l'eau dans la chambre latérale, et un autre robinet qui en laisse sortir l'air ; la cloche devient lourde et descend. Le compartiment inférieur du centre ne peut, d'ailleurs, se remplir d'eau, parce qu'il reste plein d'air. Quand on tient le fond, on peut descendre dans ce compartiment inférieur et travailler sur le sol, avec un peu d'eau seulement sur les pieds. Les ouvriers veulent-ils remonter, ils ouvrent le robinet qui laisse venir de l'air comprimé du récipient dans la chambre latérale, et ouvrent celui qui laisse échapper l'eau à l'extérieur ; la cloche alors redevient légère et remonte. Ils peuvent donc, par cet artifice, descendre et monter à volonté. Ils peuvent même aussi, lorsqu'ils sont au fond sur le sol, aller où ils veulent, à droite ou à gauche, en avant ou en arrière ; ils n'ont pour cela qu'à pous-

ser la cloche en dedans d'un côté, en prenant leur point d'appui sur la terre. C'est surtout dans ce dernier fait qu'existe le perfectionnement.

Quand cette cloche est vidée de son lest, qui est l'eau elle-même, elle peut, de plus, enlever un poids de six tonnes.

**TRAMWAYS A AIR COMPRIMÉ.** — Nous terminerons cet aperçu des applications de la pneumatique à l'industrie par quelques lignes sur la substitution des moteurs inanimés aux chevaux pour la traction des tramways, question qui préoccupe fort aujourd'hui les inventeurs. Parmi

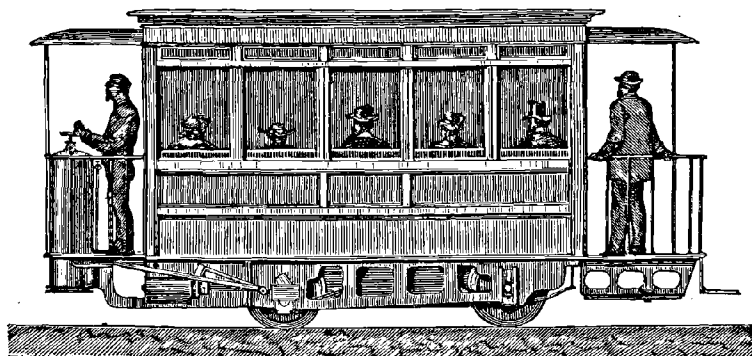


Fig. 159. — TRAMWAY A AIR COMPRIMÉ.

ces moteurs inanimés, et qui peuvent se ramener à trois types, les locomotives à vapeur, les locomotives sans foyer à eau surchauffée, les locomotives à air comprimé, ce sont ces dernières qui ont le plus vivement frappé l'attention publique.

Déjà, en 1850, M. l'ingénieur Audrand essaya sur la ligne de Versailles (rive gauche) une locomotive à air comprimé, mais sans succès. Dans le tunnel du mont Saint-Gothard, pour le transport des matériaux, on se sert depuis plusieurs années de locomotives à air comprimé, perfectionnées par M. Ribour, ingénieur du tunnel ; mais ces locomotives ne peuvent parcourir une longue route. La solution du problème cherché appartiendra peut-être à M. Mekarski, dont nous avons vu la voiture automobile fonctionner, il y a quelque temps, entre l'Arc-de-Triomphe et Neuilly.

Dans cette voiture (*fig. 159*), on emmagasine, à la station de départ, de l'air comprimé dans des réservoirs cylindriques en tôle d'acier d'un diamètre variant entre 0<sup>m</sup>,30 et 0<sup>m</sup>,40, au moyen d'un petit locomobile de six chevaux, actionnant une double pompe qui refoule l'air dans deux récipients verticaux. Le premier corps de pompe porte la pression à 12

atmosphères ; cet air est repris et comprimé jusqu'à 25 atmosphères par le second corps de pompe.

Ces réservoirs sont fixés côte à côte sous le châssis de la voiture ; ils communiquent ensemble, et ils sont divisés en deux séries : l'une, d'une contenance de 1,500 litres, constitue la batterie principale ; l'autre de 500 litres, constitue la réserve. A droite et à gauche du châssis sont les cylindres moteurs qui actionnent les roues d'avant.

L'air comprimé ne se rend pas directement des réservoirs sur les pistons. Un appareil régulateur le fait pénétrer d'abord dans un petit réservoir intermédiaire et en quantité limitée pour que sa pression descende de 25 atmosphères à la pression de 5 à 8 atmosphères, utilisables sur les pistons. De plus, l'air comprimé traverse une bouillotte pleine de 100 litres d'eau chauffée à 5 atmosphères, surmontée d'un petit dôme de vapeur ; l'air barbote dans le liquide, se sature de vapeur et ne se rend aux cylindres moteurs qu'après avoir été saturé d'humidité et échauffé ; cet échauffement a pour but d'empêcher le refroidissement qu'éprouve l'air en se détendant, et ainsi, avec son refroidissement, de diminuer sa force d'expansion. Ce réservoir d'eau chaude est posé verticalement sur la plate-forme d'avant de la voiture et surmonté d'un régulateur, qui permet au mécanicien de proportionner la tension de l'air sous le piston à l'effort qu'il faut vaincre.

L'air, en se rendant dans les cylindres sur les pistons, agit comme la vapeur et communique finalement le mouvement aux roues. Il se décomprime, se détend et travaille jusqu'à ce qu'il soit revenu à son état primitif.

Il nous resterait à parler encore d'une des plus remarquables applications de l'air comprimé, le *forage des tunnels*, et particulièrement le percement du mont Cenis et du mont Saint-Gothard. Nous nous réservons de décrire ces machines perforatrices lorsque nous traiterons avec détail des gigantesques travaux relatifs aux chemins de fer, exécutés à notre époque ou projetés, par suite du besoin, de jour en jour plus grand, de nombreuses communications entre les peuples.

## CHAPITRE XIV

## ÉCOULEMENT DES LIQUIDES

**THÉORÈME DE TORRICELLI.** — Comme conséquence des lois de la chute des corps que nous avons démontrées (pages 108 et suiv.), et d'après lesquelles, quel que soit le chemin suivi par un corps, la vitesse de ce

corps dépend de la hauteur du point de départ au-dessus du point d'arrivée, Torricelli établit, en 1643, après de nombreuses expériences sur *l'écoulement des liquides*, le théorème suivant :

*La vitesse d'écoulement d'un liquide, à sa sortie d'un orifice, est égale à celle qu'aurait acquise un corps en tombant librement de la hauteur comprise entre le niveau du liquide dans le réservoir et le centre de l'orifice.*

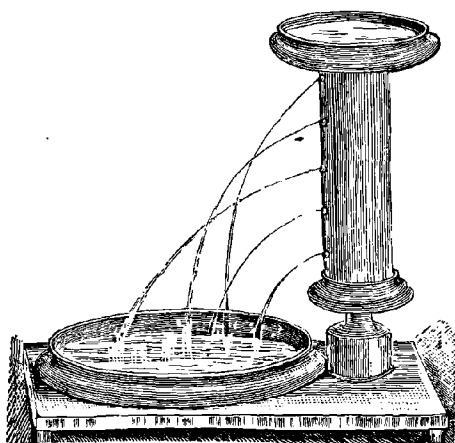


Fig. 160. — ÉCOULEMENT DES LIQUIDES

Appelant  $h$  cette hauteur (désignée généralement sous le nom de *charge*),  $v$  la vitesse et  $g$  l'intensité de la pesanteur (page 112), la règle de Torricelli s'exprime par la formule :

$$v = \sqrt{2gh}.$$

On démontre expérimentalement cette loi au moyen d'un appareil dû à S'Gravesande, et qui se compose (*fig. 160*) d'un réservoir cylindrique métallique, communiquant avec un second réservoir plus large, sur lequel est marqué le niveau qu'atteint l'eau dans les deux réservoirs réunis. Le cylindre inférieur est percé d'ouvertures équidistantes, d'où l'eau s'échappe



lorsqu'on retire les bouchons, dans une vasque disposée à cet effet. Or, on remarque que l'amplitude du jet fourni par l'ouverture médiane est la plus grande, et que les autres sont égales deux par deux, d'après leur



Emploi des divers systèmes de pompes dans un incendie (pages 338 et suivantes).

distance de cette ouverture, ce qui, en vertu des lois de la *balistique*, (science particulière qui calcule les mouvements, à travers l'espace, des corps pesants), indique que les vitesses ont, au sortir de l'orifice, la vitesse donnée par la loi de Torricelli.

Cependant, il n'est pas évident que les molécules d'un liquide qui s'écoule soient soumises à la seule action de la pesanteur. Les premières portions qui s'écoulent ne viennent pas de la surface et leur vitesse est due sans contredit à la pression exercée par la colonne liquide (page 170). La loi de Torricelli, en vertu de ce que le phénomène paraît avoir de complexe, ne peut donc être rigoureusement démontrée par l'expérience. De plus le jet liquide, sortant par l'orifice, n'est pas d'abord en réalité cylindrique comme l'orifice, il se contracte d'environ les 0,6 de la section de l'orifice en vertu de la capillarité; puis il s'amincit de nouveau, par l'effet de la pesanteur, s'il descend. La loi de Torricelli n'est donc absolument exacte que dans le cas des orifices plus grands que l'épaisseur des parois du réservoir. Toutefois, il reste la loi suivante : *Les bouches de sortie étant identiques, les vitesses sont toujours entre elles proportionnelles aux racines carrées des charges (hauteurs de la surface libre).*

L'étude de cette loi est indispensable dans certaines applications journalières. Par exemple, quelle est la forme qui convient le mieux à l'orifice de la lance de pompe pour produire le jet d'eau le plus uniforme, le plus semblable à la baguette de cristal des tonneaux de porteurs d'eau et ayant le plus de portée? Cela a donné lieu à de nombreuses études. Le trou percé dans une mince paroi a été regardé longtemps comme le meilleur orifice. Puis M. Flaud a découvert, qu'à impulsion égale, la tuyère plus ou moins conique, était préférable; mais M. Jobard apporte encore un progrès sur M. Flaud. Il a constaté que le tube exactement cylindrique est encore le meilleur, pourvu qu'il soit terminé par un rebord net, tranchant, comme celui d'un emporte-pièce, et, par là même, qu'il représente en dehors un tronc de cône. « La portée, dit-il, est beaucoup plus grande que dans les lances en formé de canule. J'ai la certitude que la meilleure lance à manier est celle qui ressemble le mieux à un bâton de maréchal. »

**ÉCOULEMENT D'UN LIQUIDE EN COMMUNICATION AVEC UNE MASSE D'AIR LIMITÉE DONT LA PRESSION PEUT VARIER.** — Si la surface d'un liquide est en communication avec une masse d'air limitée, comme cela arrive, par exemple, dans un tonneau en vidange, l'écoulement a lieu tant que la colonne liquide pressée par l'air atmosphérique contenu dans l'intérieur du vase est plus forte que la pression atmosphérique venant de l'extérieur; mais il arrive un moment où l'air intérieur se raréfiant de plus en plus, la pression atmosphérique extérieure fait équilibre à celui-ci et à la colonne liquide; l'écoulement s'arrête alors.

**PIPETTE.** — Cette loi, constatant le rôle que joue la pression atmo-

sphérique dans l'écoulement des liquides, a donné lieu à de nombreuses expériences utiles ou amusantes.

La *pipette*, petit instrument destiné à puiser dans un vase une portion de liquide que l'on ne veut pas agiter, se compose (*fig. 161*) d'un tube de verre, ouvert des deux bouts. L'extrémité inférieure, très effilée, étant plongée dans le liquide, l'instrument se remplit, soit par communication, soit par aspiration. On met alors le doigt sur l'extrémité supérieure, l'écoulement du liquide s'arrête bientôt, puisque la pression atmosphérique extérieure contrebalance la pression atmosphérique intérieure et le poids du liquide. On transporte le liquide où l'on veut, et, en retirant le doigt, l'écoulement recommence.

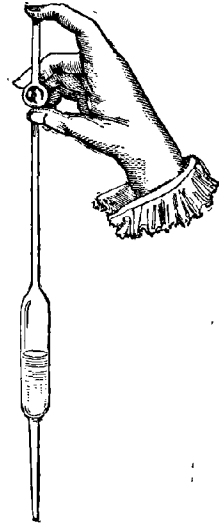


Fig. 161. — PIPETTE.

**ENTONNOIR MAGIQUE. — BOUTEILLE INÉPUISABLE.** — Les faiseurs de tours de *physique amusante* ont établi quelques-uns de leurs jeux sur ces principes. L'*entonnoir magique* est un entonnoir à doubles parois (*fig. 162*). La partie comprise entre les deux entonnoirs est remplie de vin, par exemple, et communique avec l'air extérieur par une petite ouverture placée près de l'anse. Si l'on met le doigt sur cette ouverture, le vin ne s'écoule pas, et l'eau versée dans l'entonnoir coule seule ; si l'on retire le doigt, le vin se mêle à l'eau, et le spectateur assiste à une reproduction en petit du miracle des *Noces de Cana*.

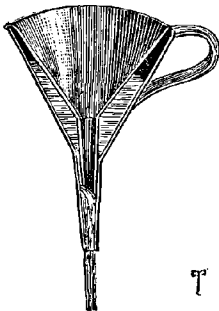


Fig. 162.

ENTONNOIR MAGIQUE.

La *bouteille inépuisable* (*fig. 163*) est une bouteille en tôle ou en gutta-percha, à compartiments multiples, dont chacun est rempli d'une liqueur différente. Chaque compartiment communique avec l'extérieur par un petit trou pratiqué dans la paroi de la bouteille, et que l'opérateur, ouvre ou ferme avec les doigts, selon la liqueur qu'il veut verser. Il produit également des mélanges en ouvrant ou fermant plusieurs trous simultanément.

C'est à M. Robert Houdin, habile prestidigitateur de notre temps, que sont dus ces deux appareils amusants.

**FONTAINE INTERMITTENTE.** — Cet appareil (*fig. 164*), imaginé par

Sturm (1), se compose d'un globe en verre, fermé par un bouchon à sa partie supérieure, et portant à sa partie inférieure deux ou trois petits orifices par lesquels l'eau peut couler. Ce ballon est maintenu sur un gros tube de verre qui pénètre dans son intérieur, et qui est fixé au milieu d'une vasque, sur un support percé de petits trous. Par ces trous l'air atmosphérique pénètre dans le gros tube, et de là dans le globe; à mesure que l'eau s'écoule de celui-ci, l'air y rentre donc, et la pression atmosphérique agissant toujours, l'écoulement continue.

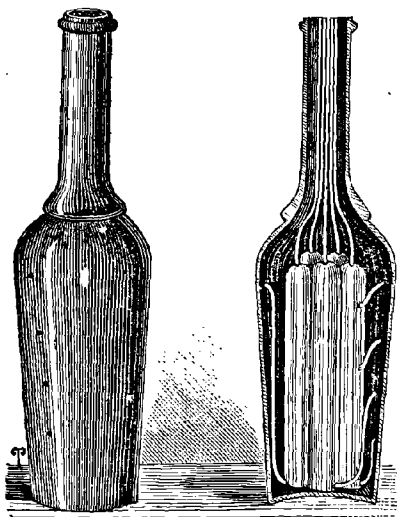


Fig. 163. — BOUTEILLE INÉPUISABLE.

Mais, quand l'eau de la vasque remplie surpasse les petits trous, l'air ne se renouvelle plus dans le globe, celui qui y est déjà se raréfie, bientôt la pression intérieure équilibre la pression atmosphérique extérieure, l'écoulement s'arrête et ne reprend que quand l'eau de la vasque s'est suffisamment échappée par un petit orifice placé au-dessous, et qui doit être moindre que ceux qui sont au globe supérieur.

**FONTAINE DE HÉRON.** — Héron, dont nous avons parlé ci-dessus (page 13), a donné son nom à cet appareil. Ce sont deux globes de verre superposés

(fig. 165) et réunis par deux tubes de verre ou de cuivre, et surmontés d'une cuvette. On remplit d'eau le globe supérieur par un trou percé au fond de la cuvette, on place dans ce trou un troisième petit tube plongeant dans l'eau du globe, puis on remplit la cuvette de liquide. Par le tube allant de la cuvette au globe inférieur l'eau s'écoule dans celui-ci, en chasse l'air qui y est renfermé, en le refoulant par l'autre tube, dans le globe supérieur. Cet air, réagit sur l'eau de ce dernier globe, de toute la force produite par la colonne d'eau descendante, et la fait jallir, sous forme de jet d'eau, dans la cuvette, par le petit tube central.

**SIPHON.** — On nomme *siphon* un grand tube en verre recourbé, (fig. 166) à branches inégales, destiné à transvaser un liquide d'un vase dans un autre. Pour s'en servir, on *amorce* d'abord le siphon, c'est-à-dire

(1) STURM (J.-Christophe), connu sous le nom de *Sturmius* (1633-1703), pasteur protestant et professeur de physique à Altdorf (Bavière), est regardé comme le restaurateur des sciences physiques en Allemagne, quoiqu'il n'ait fait que vulgariser les découvertes des autres savants.

on le remplit du liquide, puis on plonge la petite branche dans le liquide à transvaser, l'autre s'ouvrant directement dans l'air. Aussitôt l'écoulement s'établit, parce que la pression atmosphérique s'exerçant sur la surface du liquide en A force celui-ci à passer dans le tube, et elle se continuera tant que la petite branche restera plongée dans le liquide.

En effet, la force qui presse le liquide en A et le force à prendre la direction ADB est égale à la pression atmosphérique  $p$  moins le poids d'une colonne d'eau dont la hauteur est AC, tandis que la force opposée qui presse le liquide en B et le pousse à prendre la direction BDA est égale à la pression atmosphérique  $p$  moins le poids d'une colonne d'eau dont la hauteur est BE. Or BE est plus grand que AC; il en résulte que la force  $p - AC$  est plus grande que la force  $p - BE$ . Le liquide s'écoulera donc dans le sens de la force  $p - AC$ , et d'autant plus vite que la différence entre AC et BE sera plus grande.

La force qui produit l'écoulement est ainsi la pression représentée par une colonne liquide  $h' - h$ ; la vitesse d'écoulement, en vertu du théorème de Torricelli, sera donc représentée par la formule :

$$v = \sqrt{2g(h' - h)},$$

abstraction faite du frottement.

Il va sans dire que cette vitesse d'écoulement diminue à mesure que le niveau du liquide baisse dans le vase. Pour obtenir un *écoulement constant*, on suspend le fil à un tube s'enroulant sur une poulie et soutenant un petit poids qui monte à mesure que le siphon descend, ou bien on en-

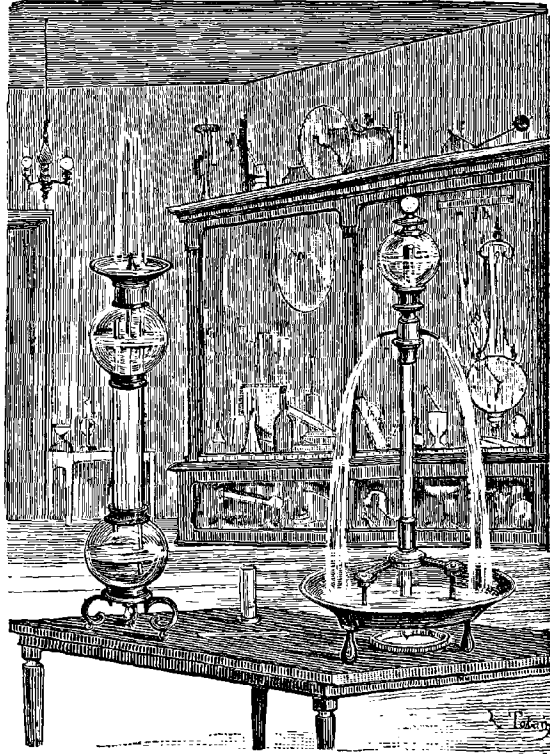


Fig. 164 et 165.

FONTAINE INTERMITTENTE ET FONTAINE DE HÉRON.

gage la petite branche dans un flotteur en liège, de façon qu'elle enfonce toujours de la même quantité dans le liquide, et que l'orifice de la grande branche et le niveau du liquide présentent toujours la même différence de hauteur.

L'amorçement du siphon se fait généralement en aspirant le liquide par un tube latéral soudé à la longue branche, jusqu'à ce que celui-ci ait dépassé la courbure du tube. Mais, pour les liquides avec lesquels il serait désagréable ou dangereux d'agir ainsi, on emploie d'autres moyens. Ainsi, pour l'acide sulfurique, on se sert d'un siphon en platine, disposé comme

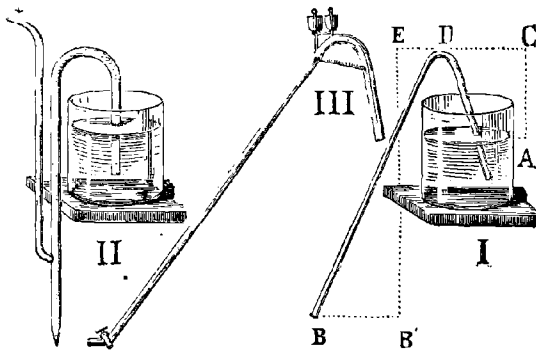


Fig. 166. — SIPHONS.

le représente la figure III, et qui est muni de deux robinets à entonnoir, placés à la courbure de l'appareil et d'un troisième robinet placé à l'extrémité de la grande branche. La petite branche plongeant dans l'acide à transvaser, on ferme le robinet d'en bas, on ouvre les deux d'en haut. Par un de ceux-ci on verse de l'acide

sulfurique qui coule dans la grande branche chassant ainsi l'air qui s'échappe par l'autre robinet. On ferme ensuite le deux robinets supérieurs et l'on ouvre le robinet inférieur. Le liquide s'écoule, l'air se raréfie alors dans la petite branche, l'acide du vase monte, et, quand il a dépassé la courbure, l'amorçement est fait.

**CAPTATION DES SOURCES.** — Bien souvent un puits ou une source se tarit pendant l'été, ou donne un débit de liquide insuffisant. En 1867, un inventeur ingénieux, M. Donet, de Lyon, et plus récemment encore, un agronome distingué d'Amélie-les-Bains, M. Chefdebien, ont mis en pratique un procédé basé sur les principes ci-dessus, qui permet d'augmenter notablement le débit de la source ou du puits, et presque toujours d'arrêter le tarissement.

Pour les puits, il suffit de les fermer hermétiquement par un couvercle. En effet la pression atmosphérique qui s'exerce sur la nappe souterraine à son point de départ, à l'origine même des eaux, s'exerce également à son point d'arrivée, par le trou béant du puits. Ces deux pressions égales et inverses se font équilibre. Mais le puits fermé, la pompe in-

stallée, si l'on aspire, l'air contenu entre le couvercle et la nappe d'eau sera rejeté au dehors, un vide relatif existera, la pression exercée, au point de départ sera plus forte, l'eau franchira plus vivement la canalisation souterraine, et par suite, le débit augmentera.

Pour les sources, on ne peut installer une pompe, puisque la qualité essentielle d'une source est précisément de déverser l'eau sans appareil élévatoire. Mais, après avoir fermé l'orifice hermétiquement, on fait passer à travers le couvercle un tuyau que l'on prolonge extérieurement à volonté, de façon à le faire descendre en contrebas à 3, 4 ou 5 mètres, à une différence de niveau aussi grande que possible. Ce tube fait siphon ; l'air aspiré dans le tube s'écoule par l'extrémité ; on a ainsi diminué la pression qui agit sur l'orifice de sortie d'une valeur correspondante à une colonne d'eau égale à la différence des niveaux, et le débit s'accroît en conséquence.

Dans la lettre qu'il écrivit récemment à M. Dumas, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, M. Chefdubien cite une source, à Amélie-les-Bains, qui, après qu'il y eut exécuté les opérations ci-dessus, donne aujourd'hui, et depuis six ans, sans intermittence ni interruption, dix-huit fois le débit qu'elle donnait précédemment.

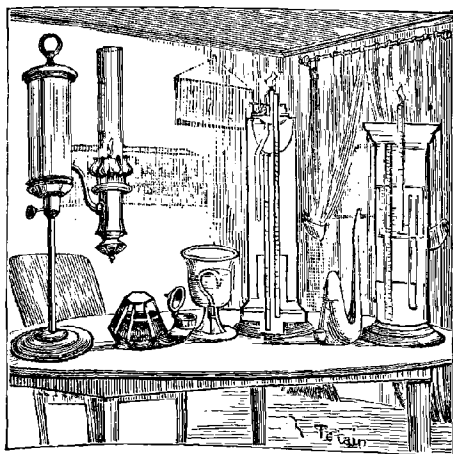


Fig. 167.

**APPLICATIONS DIVERSES** (*fig. 167*). — Les *encriers siphoides*, certains vases pour faire boire les oiseaux, la *lampe d'Argand* (1), la *lampe hydrostatique* des frères Girard, la *lampe hydraulique* de Troyot, reposent sur les mêmes principes que le siphon. Pour filtrer et transvaser certains liquides, l'encre de Chine, par exemple, après qu'elle a été broyée, on dispose des mèches de coton ou d'amiante, ou des chiffons sur les bords du vase. En vertu de la capillarité (page 234), le liquide monte entre les fils, puis redescend le long de la mèche ; c'est un siphon qui s'amorce de lui-

(1) ARGAND (Aimé), physicien suisse (1726-1803), fils d'un horloger de Genève, est l'inventeur des lampes auxquelles M. Quinquet donna son nom, c'est-à-dire que, en 1780, il inventa la cheminée, de verre et les mèches circulaires de coton. Eu raison de la circulation de l'air autour de la flamme, cette disposition rendait parfaite la combustion de l'huile.

même. Si le liquide contient des poussières en suspension, il se trouve ainsi filtré. Le *vase de Tantale*, petit instrument de physique amusante, consiste en un siphon ayant la forme d'un tube recourbé, et dissimulé dans l'épaisseur des parois d'une coupe en métal. La grande branche du siphon traverse le pied. Quand on porte à la bouche, du côté de la courbure du siphon, le vase plein de liquide, l'amorcement a lieu et le liquide fuit les lèvres du buveur.

**FONTAINES INTERMITTENTES NATURELLES.** — Le jet de certaines sources variant d'une manière périodique est dû à la présence, dans les entrailles de la terre, d'un siphon naturel servant de canal d'écoulement à un réservoir, alimenté par un filet d'eau d'un débit inférieur à celui du siphon lui-même. Lorsque le niveau de l'eau atteint la courbure du siphon, celui-ci s'amorce, l'eau s'écoule, le réservoir se vide; alors l'écoulement s'arrête jusqu'à ce que le niveau ait de nouveau atteint la courbure.

Ces fontaines se produisent surtout dans les sols calcaires. Citons, en France, celle de *Fouent-Levant*, près de Colmars (Basses-Alpes) qui coule et tarit de 7 minutes en 7 minutes; celle de la *Fontaine-Ronde* à Loutelet (Doubs); le *puits de la Brême*, près d'Ornans (Doubs), gouffre qui, dans certains moments, se remplit d'une eau limoneuse qui s'élançe en bouillonnant et inonde le vallon; la *fontaine du Pont de l'Oleron*, celle de *Genet*, près de Baune (Côte-d'Or); celle de *Frais-Puits*, à 5 kilomètres de Vesoul (Haute-Saône).

M. Malte-Brun rapporte, au sujet de cette dernière fontaine intermittente, une anecdote intéressante.

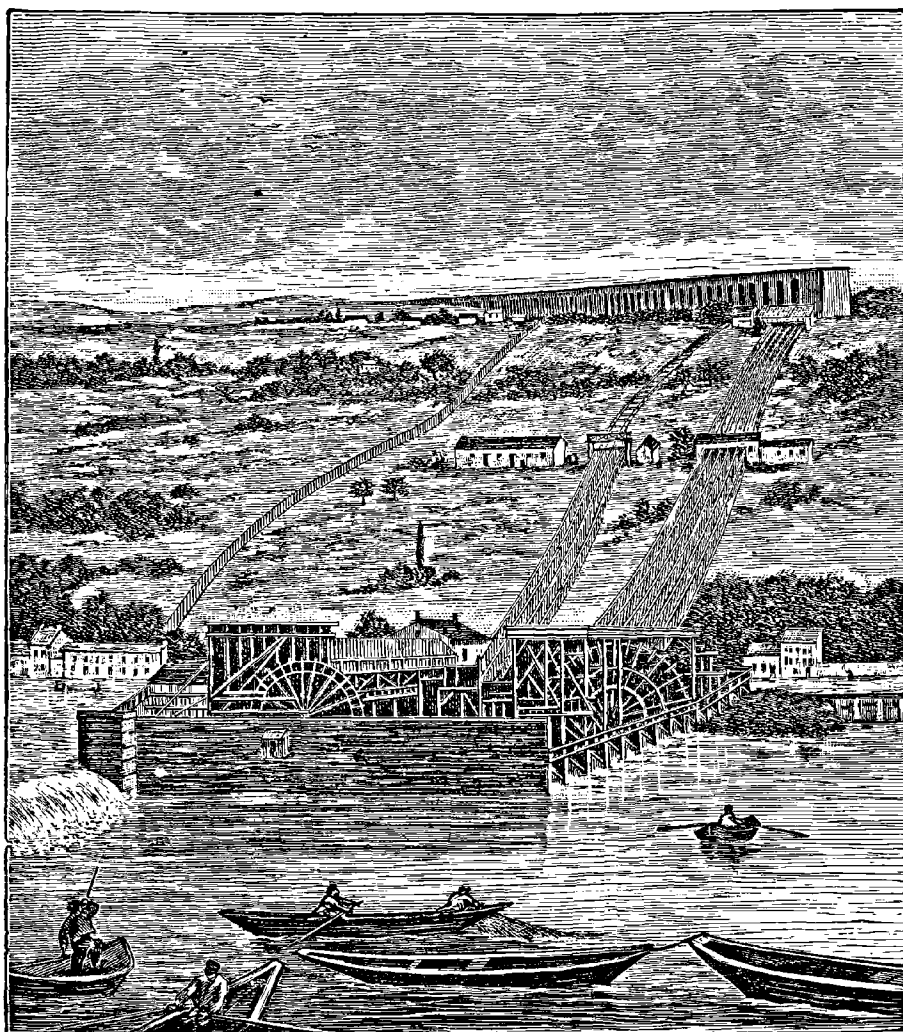
« Près de Vesoul existe un torrent ordinairement à sec: le ravin qu'il forme aboutit à un gouffre de 16 mètres de profondeur sur 20 mètres de diamètre. Dans les temps ordinaires, il est également à sec; mais, après des pluies abondantes, il vomit tout à coup une masse d'eau qui inonde les prairies d'alentour jusqu'à la partie basse de la ville, et transforme en un grand lac les terrains inclinés vers la Saône. Ce phénomène dure trois jours, après lesquels les eaux se retirent, le gouffre se vide, et le torrent cesse de couler.

» Or, vers le milieu du xvi<sup>e</sup> siècle, une armée allemande, au retour d'une expédition sur la Bresse, dépourvue de munitions et d'argent, prend la résolution de mettre Vesoul au pillage; elle se prépare à escalader les murailles; mais il avait plu pendant vingt-quatre heures; la plaine se couvre d'eau, et les Allemands effrayés, attribuant cette inondation subite à des écluses que les habitants avaient ouvertes pour leur défense, fuient en abandonnant leur artillerie et leurs bagages.



» Une cause toute naturelle avait sauvé Vesoul, et la source du *Frais-Puits* en avait tout l'honneur. »

Les anciens et les chrétiens du moyen âge avaient attribué à des



Vue de l'ancienne machine de Marly (page 343).

causes sacrées ces intermittences dans l'écoulement de certaines sources, et Pline nous parle de la fontaine de Jupiter, à Dodone, qui rallumait les torches éteintes et qui tarissait et débordait tour à tour à heures fixes. On rapportait au caprice d'un dieu un phénomène dû simplement à l'existence d'un siphon naturel.

## CHAPITRE XV

## POMPES

**HISTORIQUE.** — Nous avons dit que l'invention des pompes était due à Ctésibius (page 12), et nous avons remarqué que le christianisme, « *en moralisant le monde* », avait négligé tout progrès des sciences physiques, avait même poussé l'humanité à perdre les conquêtes déjà faites ; aussi fut-ce seulement à l'époque de Galilée que l'on s'expliqua la théorie de l'aspiration de l'eau dans les pompes :

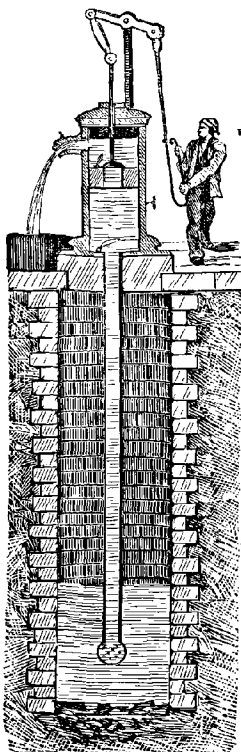


Fig. 168.

POMPE ASPIRANTE.

Nous avons raconté (page 244) le petit événement qui dirigea l'esprit de Galilée vers cet objet, et qui fut la cause de la découverte de la pesanteur de l'air. Jusqu'alors, quand on demandait à un savant la raison d'un phénomène quelconque, il vous répondait, avec un sourire de savant : « C'est la nature ! » Si l'on s'adressait à un prêtre, ou à un seigneur, ou à un roi, ou à n'importe qui de haut placé, il vous disait : « C'est Dieu ! » Et malheur à celui que cette réponse ne satisfaisait pas complètement.

Il nous est permis aujourd'hui d'expliquer, sans intervention miraculeuse, le principe de l'ascension de l'eau dans les pompes.

**POMPE ASPIRANTE.** — Quelle que soit la forme qu'elles affectent, les *pompes* se divisent en trois espèces : la pompe *aspirante*, la pompe *foulante* et la pompe *aspirante et foulante*.

La pompe *aspirante* (fig. 168), qui n'est pas autre chose qu'une machine pneumatique, se compose d'un tuyau d'aspiration TT', surmonté d'un corps de pompe dans lequel se meut un piston P,

formé d'un disque épais de métal ou de bois, garni sur son pourtour de cuir ou d'étoupes, pour qu'il ferme hermétiquement. Ce piston est percé d'une ou de plusieurs soupapes, S, qui s'ouvrent de bas en haut. Le tuyau d'aspiration est également fermé par un clapet ou soupape conique C, appelée *soupape dormante*, s'ouvrant de bas en haut. Dans le haut du corps de pompe est un tuyau latéral E par lequel l'eau doit s'échapper dans l'air du dehors.

Or, qu'au moyen d'un long levier L, appelé *brimbale*, s'articulant à deux branches dites *bielles*, qui elles-mêmes s'articulent avec la tige du piston, on élève ce piston, le vide se produit au-dessous de lui, la soupape S reste fermée puisqu'elle est soumise à la pression atmosphérique, la soupape C s'ouvre, et l'eau du réservoir, n'ayant plus de pression à supporter, envahit le tuyau d'aspiration, et, après deux ou trois aspirations, le corps de pompe. Le piston redescendant alors, la soupape C se referme par son propre poids, la soupape S s'ouvre sous l'effort de l'air comprimé par le piston, lequel s'échappe par le tuyau E, et aussi l'eau, quand, après quelques coups de piston, la pompe a été *amorcée*.

Théoriquement, nous l'avons vu (page 250), l'eau devrait s'élever dans le tuyau d'aspiration à  $10^m,33$  quand la pression barométrique est de  $0^m,76$  ; mais, dans la pratique, on donne aux tuyaux d'aspiration verticaux seulement 8 à 9 mètres, à cause des fuites qui se trouvent dans les joints des pompes les mieux construites, à cause des frottement de l'eau sur les parois qui déterminent une perte de force, etc.

Pour les puits profonds, on se sert d'une pompe aspirante modifiée, qui porte le nom de pompe *aspirante et élévatoire*. Dans cette pompe, l'eau ne s'écoule pas dès qu'elle est au-dessus du piston, elle s'élève dans un canal latéral, où elle est refoulée quand le piston s'élève. Ordinairement un robinet placé sur ce canal latéral permet de faire fonctionner la pompe comme une simple pompe foulante.

**POMPE FOULANTE.** — Dans la *pompe foulante* (fig. 169), le piston P est plein, et le corps de pompe plonge dans l'eau du réservoir R. Un tuyau TT' est établi entre l'air du dehors et ce corps de pompe au moyen d'une soupape S s'ouvrant de haut en bas, c'est-à-dire du corps de pompe

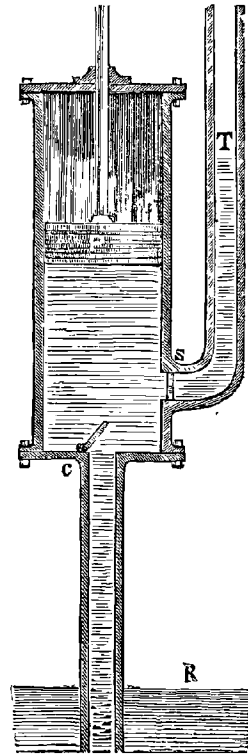


Fig. 169.

POMPE FOULANTE.

dans le tuyau. Une autre soupape C, s'ouvrant de bas en haut, sert à établir ou à interrompre la communication entre le corps de pompe et le réservoir. Or, quand on abaisse le piston P, la soupape C se ferme, la soupape S s'ouvre et laisse passage à l'eau qui est projetée au dehors par le tuyau TT'. Quand on relève le piston, la soupape S se ferme sous le poids de la colonne d'eau qui est déjà dans le tuyau TT'; en même temps la soupape C s'ouvre, et, soulevée par la pression atmosphérique, l'eau s'introduit de nouveau dans le corps de pompe, et ainsi de suite.

**POMPE ASPIRANTE ET FOULANTE.** — Celle-ci participe des deux pompes ci-dessus. Elle est construite comme elles ; c'est, en réalité, une pompe foulante à laquelle il a été ajouté un tuyau d'aspiration ; seulement, au lieu de sortir par le piston, qui, dans cette pompe, reste plein, l'eau sort par le canal latéral dans l'aspiration, comme dans le refoulement. C'est de cette pompe que l'on fait usage lorsqu'il s'agit d'élever l'eau à une grande hauteur. Il faut alors que les pièces composant la machine présentent une grande solidité pour résister à l'énorme pression produite par la colonne d'eau. Le piston, appelé *piston plongeur*, est entièrement métallique ; le corps de pompe n'est pas *alésé*, c'est-à-dire poli intérieurement ; il porte à sa partie supérieure une boîte à étoupes dans laquelle glisse le piston.

Dans les mines, pour les travaux d'épuisement, on se sert de pompes aspirantes et foulantes ; mais la hauteur du déversoir étant très grande, une première pompe élève l'eau jusqu'à un réservoir dans lequel plonge le tuyau d'aspiration d'une seconde pompe, et ainsi de suite. Les tiges des diverses pompes sont unies à une tige unique, nommée *maîtresse tige*.

**POMPES A DOUBLE EFFET.** — D'après le mécanisme ci-dessus décrit, on voit que l'eau ne peut s'écouler que d'une façon intermittente. Pour éviter cet inconvénient, on a dû construire des pompes disposées de façon que l'aspiration et le refoulement du liquide se fassent à la fois et pendant la montée et pendant la descente du piston. On a atteint ce but en accouplant deux pompes, refoulant dans le même tuyau d'ascension et disposées de manière que, quand le piston de l'une monte, celui de l'autre descend. Dans les lampes Carcel, c'est par ce système que l'huile s'élève jusqu'à la mèche, grâce à deux petites pompes foulantes, mues par un mouvement d'horlogerie que l'on monte avec une clef, comme une pendule, et qui sont placées dans le pied de la lampe.

L'invention des *pompes foulantes à double effet* est due à de Lahire (1). Cette sorte de pompe se compose (*fig. 170*) d'un corps de pompe muni de quatre soupapes, A, B, C, D, s'ouvrant de droite à gauche, c'est-à-dire les soupapes B et D communiquant avec le tuyau d'aspiration T, tandis que A, C communiquent avec le tuyau de refoulement R. En conséquence, quel que soit le mouvement du piston, il y a aspiration et refoulement en même temps.

**POMPES A INCENDIE.** — Pendant toute l'antiquité et tout le moyen âge, il appartenait à chacun de veiller aux incendies, et les moyens employés pour les éteindre étaient tellement primitifs que les ravages du feu étaient effrayants. Ce fut seulement au XVII<sup>e</sup> siècle que la pompe à incendie, telle à peu près que nous allons la décrire, fut inventée en Allemagne et se répandit en Europe. En 1699, un gentilhomme provençal, revenant de Hollande, Dumourier - Duperrier, obtint le privilège du roi d'en faire confectionner et d'en vendre en France. Louis XIV en acheta douze dont il fit cadeau à la ville de Paris; elles étaient desservies par les ouvriers des fabricants, et comme il n'y avait pas de fonds pour leur entretien, les incendiés payaient les secours qu'ils recevaient. Quelques années plus tard, on organisa la compagnie des *garde-pompes*, et une inscription fut placée sur la porte du directeur : *Pompes publiques du roi pour remédier aux incendies sans qu'il soit nécessaire de payer*. Ce ne fut

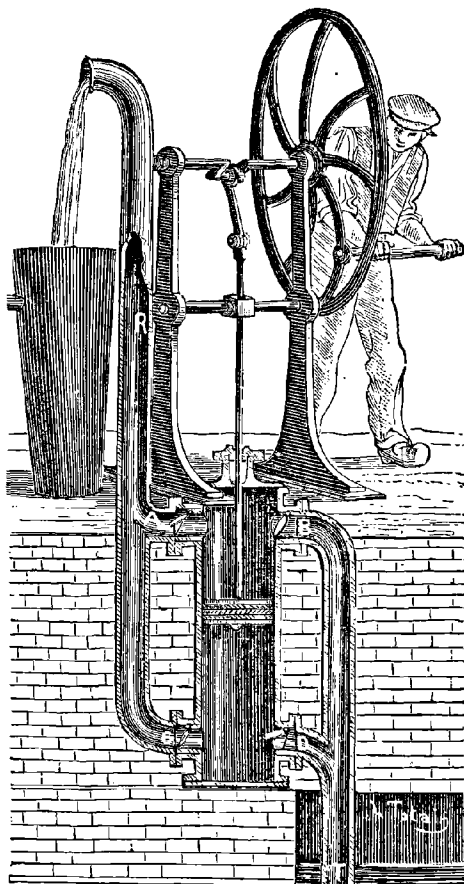


Fig. 170. — POMPE A DOUBLE EFFET.

(1) LAHIRE (Philippe DE), géomètre, mécanicien, astronome, hydrographe (1640-1719), professeur d'astronomie et de mathématiques au Collège de France, membre de l'Académie des sciences. Ses principaux travaux sont relatifs à la carte de France, qu'il dressa en 1678, et à des nivellements intéressants exécutés pour amener les eaux à Versailles.

qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle que Perronet (1) inventa la double pompe à jet continu, application et perfectionnement de celle de Lahire.

Les  *pompes à incendie ordinaires* (fig. 171) consistent en deux pompes foulantes accouplées dont les tuyaux latéraux débouchent dans un réservoir R plein d'air, dans lequel plonge un tube T qui porte à son extrémité extérieure un long boyau terminé par un tube conique en cuivre, appelé  *lance* et qui n'a que 0<sup>m</sup>,015 de diamètre intérieur. C'est ce boyau de cuir

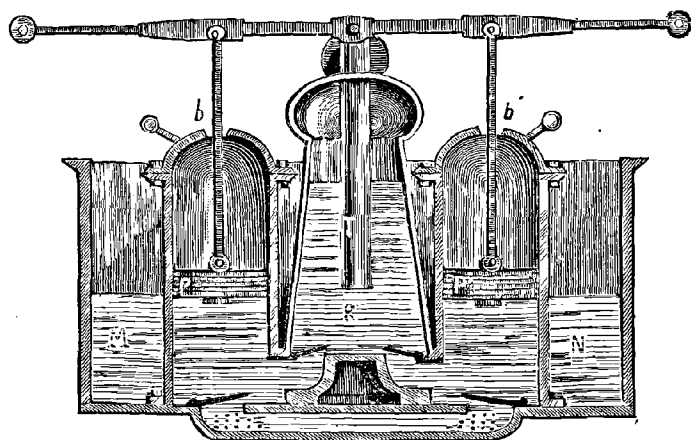


Fig. 171. — POMPE A INCENDIE.

qui sert à amener l'eau sur les endroits enflammés. Les deux corps de pompe, en cuivre rouge, sont placés dans une cuve MN, nommée  *bûche*, et dans laquelle on apporte constamment de l'eau, en faisant la  *chaîne* sur le lieu de l'incendie. Dans ces corps de pompe se meuvent des pistons PP', manœuvrant au moyen de deux bielles bb', fixées à un balancier AB que font manœuvrer huit hommes. Quoique le jeu des pistons soit alternatif, il pourrait y avoir une certaine intermittence dans le jet, mais il faut remarquer que l'eau refoulée par les pompes, au lieu d'aller directement dans le tuyau T, se rend d'abord dans le réservoir, et s'y accumule, la résistance de l'air la forçant à s'écouler plus lentement qu'elle n'arrive ; l'air comprimé répartit par son ressort les variations de vitesse du liquide, en sorte que le jet est continu et régulier.

On se sert beaucoup aujourd'hui, et l'usage certainement s'étendra de

(1) PERRONET (Jules-Rodolphe), savant ingénieur (1708-1794), fondateur de l'École des ponts et chaussées, construisit de nombreux ponts, entre autres celui de Neuilly, premier exemple d'un pont horizontal, et le pont Royal à Paris; dirigea les travaux du canal de Bourgogne, présenta un plan pour amener à Paris les eaux de l'Yvette, etc.

plus en plus, des pompes à incendie à vapeur. Nous donnons un dessin d'une des plus connues, nous réservant de parler longuement d'elle quand nous traiterons des machines à vapeur : la construction de ces pompes n'étant point basée sur le principe de la pression atmosphérique.

**MOTEURS DES POMPES.** — Pour obtenir le mouvement de va-et-vient des pistons dans les corps de pompe, on s'est servi de moteurs de toutes sortes. Les pompes ordinaires sont munies d'un balancier mû à bras d'homme ; quand on a besoin d'une force plus grande, on emploie une roue qu'on tourne, ou un cheval qui fait aller un manège, comme on les voit chez les maraîchers, ou la vapeur, comme à la pompe à feu de Chaillot, comme aux usines hydrauliques dont nous avons parlé (page 205) et qui élèvent l'eau jusqu'aux réservoirs de Paris ; ou le vent, comme autrefois pour les immenses travaux de dessèchement exécutés à Harlem et dans toute la Hollande ; ou bien encore la force développée par un courant.

C'était par ce dernier procédé que l'ancienne machine de Marly élevait les eaux de la Seine jusqu'aux châteaux royaux de Marly et de Versailles, à l'aide de 14 roues hydrauliques communiquant le mouvement à 221 pompes qui donnaient 5,000 mètres cubes d'eau par jour. Aujourd'hui, grâce à la vapeur, 4 roues seulement, faisant mouvoir 16 pompes, fournissent une quantité d'eau beaucoup plus grande que celle de l'ancienne machine, 8,000 mètres cubes.

Nous retrouvons une bien spirituelle et bien claire histoire de cette machine de Marly ; nous la transcrivons, afin de permettre de comparer les moyens employés aujourd'hui pour la distribution des eaux dans les villes avec les moyens dont on se servait autrefois.

« En 1676, Mansart, sur les dessins duquel on bâtissait Marly, manifesta à Louis XIV le besoin d'une machine quelconque pour faire monter l'eau dans les jardins de ce château. C'était simple à concevoir, difficile à exécuter. Louis XIV ne s'émut pas plus qu'il ne fallait ; il avertit tout simplement les savants de l'Europe qu'ils eussent à le pourvoir et à ne pas le faire attendre longtemps. Aussitôt on vit affluer les projets : les têtes les plus lourdes de calculs se penchèrent opiniâtrément pour trouver une solution glorieuse. Le baron de Ville, originaire de Liège, déjà connu en France par plusieurs ouvrages hydrauliques, s'offrit pour entreprendre la machine en question. Son projet fut accueilli ; il se mit alors à l'œuvre, puissamment aidé par un sien compatriote, mécanicien habile, nommé Rennequin Swalem. Quelques-uns prétendent même

que Rennequin fut l'inventeur, et que le baron de Ville ne fut qu'un de ces collaborateurs dangereux qui prêtent leur nom, mais prennent la gloire. Quoi qu'il en soit, Rennequin dirigea les travaux et les ouvriers, et, la machine achevée, le baron de Ville en fut nommé gouverneur avec des appointements proportionnés. Il habita le pavillon de Louveciennes ; quant à Rennequin, il resta toujours conducteur avec 1,800 francs d'appointements. Il est mort, à la machine, en 1708, âgé de soixante-quatre ans, sans avoir protesté jamais contre la prétendue usurpation du baron de Ville. Au reste, voici ce qu'on lit sur une carte représentant l'ancienne machine de Marly, dessinée en 1688 :

*Cette machine sert à embellir les maisons royales de Versailles, de Trianon et de Marly, et peut servir à Saint-Germain-en-Laye. Elle a été construite par ordre du Roi sur les projets et par la direction de M. le baron de Ville.*

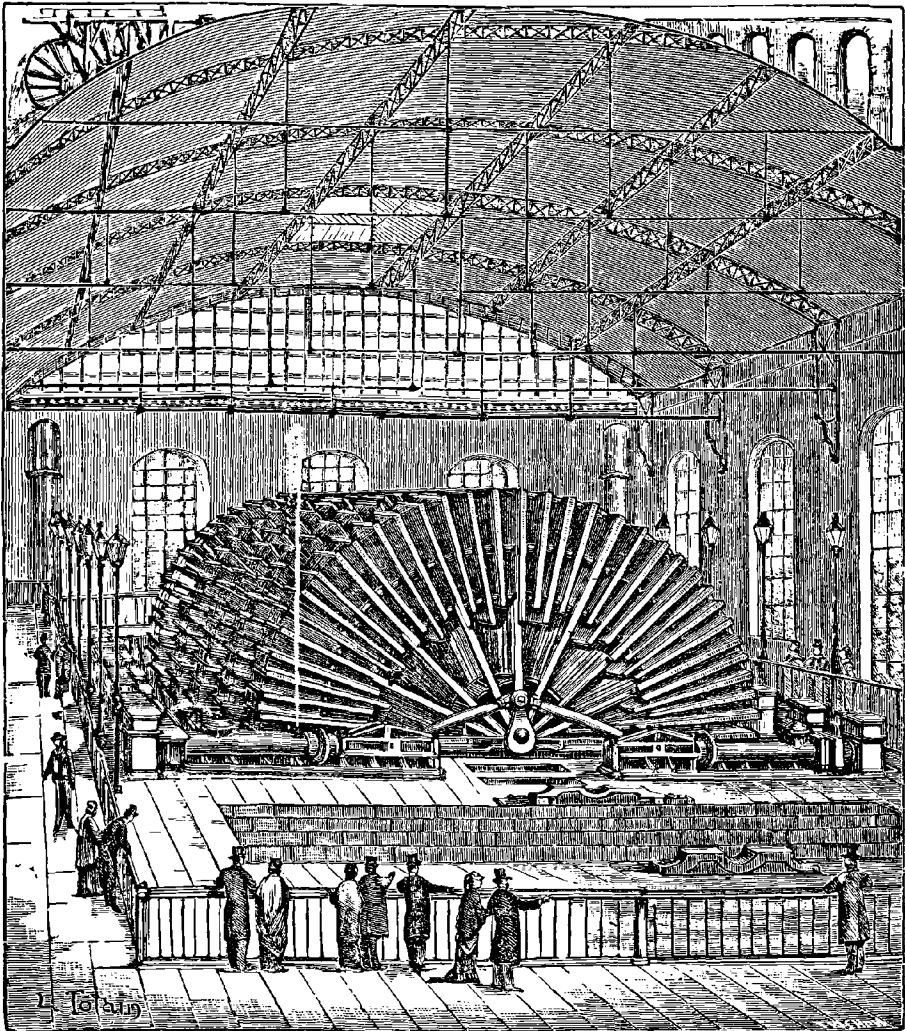
» On commença les travaux en juin 1681, et l'eau monta en 1685. Ce fut un beau jour que celui-là, mais rudement acheté par des efforts, des recherches, des tâtonnements sans nombre. Quant à la dépense, personne ne s'en étonna. Elle fut de six à sept millions d'alors, ce qui en ferait bien quatorze ou quinze aujourd'hui ; encore dit-on qu'on n'écrivit pas tout. L'entretien de la naïade s'élevait à soixante-onze mille seize livres, mais on dit de même que les journées n'y étaient pas. Rien ne parut exagéré ; d'ailleurs, qui se serait plaint ? Le peuple ? Cela ne le regardait pas. Si cet argent ne lui donnait pas de pain, il lui donnait au moins des spectacles ; c'était assez. Quant à Louis XIV, de si infimes considérations ne montaient pas jusqu'à lui ! Il était roi, il était dieu, il était tout !

» Marly avait seul d'abord profité de la machine. Ce ne fut que vingt ans après son entière exécution, que, la population augmentant considérablement dans Versailles, et les eaux des sources tarissant dans les temps de sécheresse, on en amena des réservoirs de Marly. Toute l'eau remuée, prise et avalée par la machine, était montée à l'aide de 221 pompes, espacées en trois fois, et de deux puisards, sur une plateforme qui se trouve à 500 pieds ou 162 mètres au-dessus de la rivière. De cette tour les eaux tombaient dans une cuvette qui leur servait de jauge ; de là elles coulaient dans l'aqueduc qui a 310 toises de longueur, est soutenu sur 36 arcades construites en pierres meulières, et dont les angles et toutes les saillies sont en pierres de taille. Au haut de cet aqueduc était une tour d'environ 44 pieds de hauteur, construite comme la grande tour et les aqueducs. L'eau était reçue dans une bêche au fond de laquelle étaient des soupapes, qui distribuaient l'eau à Marly et à Versailles. Voilà



sommairement l'appareil digestif avec lequel le monstre buvait dans la Seine ce qu'il soufflait ensuite sur les jardins.

» Si tous les hommes (ou du moins presque tous les hommes, comme



Vue de la nouvelle machine de Marly (page 346).

le disait en se reprenant un prédicateur courtisan à Louis XIV) sont sujets à la mort, les ouvrages construits par les hommes sont tributaires des mêmes destinées. A force de tordre des flots dans son gosier, au bout d'un siècle, la vieille machine sentit en elle des lésions profondes; son estomac

se délabra, ses dents branlèrent, des fêlures visibles se firent à son crâne ; elle commença à branler et à secouer la tête. Elle était devenue asthmatique au dernier point, sans compter que, tout incurable qu'elle était, la maladie de la centenaire coûtait cher à l'État. On assembla donc un conseil d'ingénieurs-mécaniciens. Mais la Révolution française arriva ; et tout fut abandonné.

» Alors commença pour la pauvre invalide une série d'infortunes, d'alternatives douloureuses ; tantôt on y mettait la pioche du démolisseur, tantôt les échafaudages. Elle fut vendue à l'encan, abandonnée, trahie, crucifiée. Un de ses adorateurs, désespéré, commença en style quelque peu irrévérencieux l'histoire de son martyr...

» La machine cependant ressuscita avant d'avoir entièrement succombé.

» En 1807, les projets, les travaux recommencèrent ; mais des sommes énormes furent vainement dépensées.

» En 1811, M. Cécile vint prendre la direction, et trancha la difficulté. Ce fut lui qui, conjointement avec M. Martin, remit une âme dans les poumons disloqués, ou plutôt refit d'autres poumons. Ce fut lui qui appliqua la vapeur, et fit construire cet édifice, à fronton grec, dans lequel la pauvre nymphe se noircit

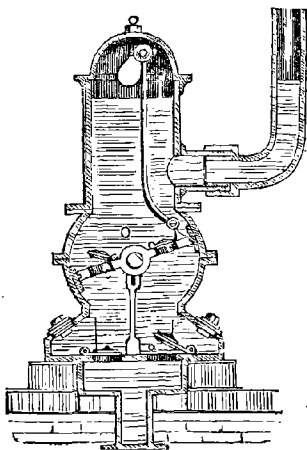


Fig. 172.

POMPE DE BRAMAH.

et se meurtrit dans les engrenages en poussant des soupirs affreux. On dirait un temple, sans le panache noir qui se balance presque toujours sur sa tête, et qui atteste l'alimentation d'un foyer plus ardent qu'un trépied ou qu'un encensoir de nos jours. »

Elle fut détruite de nouveau en 1818, rétablie en 1826, et enfin remplacée définitivement en 1864 par celle qui existe aujourd'hui.

**POMPES OSCILLANTES.** — Ce n'est pas toujours au moyen d'un piston se mouvant alternativement de bas en haut et de haut en bas que l'on obtient le vide dans un tuyau cylindrique, et ainsi l'ascension de l'eau. Dans les pompes dites *oscillantes*, inventées par Bramah, le piston est remplacé (*fig. 172*) par une pièce fixe rectangulaire *oscillant* autour d'un axe O, en s'appuyant sur les parois du corps de pompe qui est cylindrique. Cette pièce est percée de deux soupapes A et B, agissant chacune dans une des parties du corps de pompe, lequel est divisé en deux par une cloison. L'effet produit par le mouvement oscillatoire de la pièce AOB

sur les soupapes se comprend immédiatement, à la vue seule de la figure.

**POMPES ROTATIVES.** — Les pompes *rotatives*, comme leur nom l'indique, produisent l'élevation de l'eau par la rotation de l'appareil. Dans le système de Stoltz, que nous prenons pour type (*fig. 173*), les tuyaux de refoulement A et d'aspiration B aboutissent à un tambour *abcd*, concentrique au corps de pompe, par deux ouvertures *x, z*, séparées entre elles par une cloison de fer. Ce tambour n'est pas parfaitement circulaire; une cloison de fer *hi*, percée de trous, courbe également, le déforme en face des points *x, z*, où débouchent les tuyaux A et B. Un autre anneau, ayant même centre O que le tambour et le corps de pompe, supporte quatre palettes *p*, mobiles dans des fentes, et qui s'appuient d'un côté sur la paroi intérieure du tambour *abcd*, de l'autre sur une lame courbe de fer *lmst*, nommée un *excentrique*, parce que ce genre de courbes solides tourne autour d'un point qui n'est pas son centre. Cet excentrique a pour objet de transformer le mouvement de rotation des palettes en un mouvement de va-et-vient de l'intérieur à l'extérieur de l'anneau.

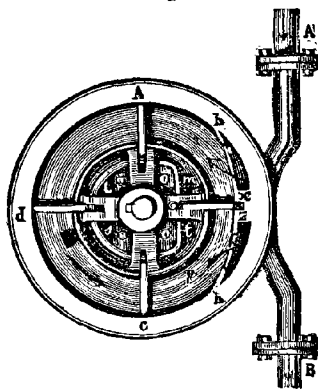


Fig. 173.  
POMPE ROTATIVE DE STOLTZ.

Or, quand on donne à l'anneau O un mouvement de rotation, une palette, arrivée en face de *z*, est tout à fait rentrée à l'intérieur de A; en continuant à avancer de *a* en *b*, en *c*, en *d*, cette palette laisse derrière elle un vide que l'eau du tuyau B vient remplir en passant par les trous de la cloison *hi*; la palette suivante refoule cette eau, et, au bout de quelques tours, l'eau refoulée de plus en plus dans l'espace compris entre les deux palettes tend à s'échapper par le canal A et s'écoule.

**POMPES A FORCE CENTRIFUGE.** — On désigne sous ce nom des pompes puissantes d'un usage encore peu répandu en Europe, très communes déjà en Amérique, mais qui sont appelées à un grand avenir par suite de la simplicité de leur mécanisme, et l'absence de pièces pouvant se détériorer par l'usage. On les appelle *centrifuges* parce qu'elles aspirent l'air par le centre et le rejettent par la circonférence en chassant l'eau dans le tuyau de refoulement.

Nous décrirons deux des principaux types de ces pompes.

La pompe de Behrens, dont nous reparlerons ci-après, aux *Machines*

à vapeur, est très employée en Amérique, dans les brasseries et les raffineries, comme pompe élévatoire des liquides dans les réservoirs. Elle se compose (*fig. 174*) de deux arbres A et B, mis en mouvement en sens contraire par un moteur quelconque, soit la vapeur. Chaque arbre est l'axe d'une portion de couronne massive C et D, sorte de pistons qui se meuvent à l'intérieur d'un corps de pompe, communiquant avec le tuyau d'aspiration T et le tuyau de refoulement R. En tournant, le piston C fait le vide derrière lui lorsqu'il arrive en face du tuyau T d'aspiration; une certaine quantité d'eau remplit ce vide. L'autre piston D, arrivant, foule dans le tuyau R l'eau qu'il rencontre, et à son tour, en face du tuyau T, aspire de l'eau, que le piston C va ensuite refouler, et ainsi de suite.

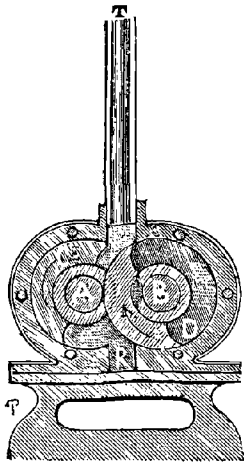


Fig. 174.

POMPE DE BEHRENS.

La pompe d'Appold (*fig. 175*) consiste en une roue R montée sur un axe horizontal A, mis en mouvement par un moteur quelconque. Cette roue est à aubes courtes et est divisée en deux parties par une cloison verticale. Les couronnes dans lesquelles ces aubes sont emboîtées ont un orifice communiquant avec un des tuyaux d'aspiration T. En tournant, l'eau entraînée tend à continuer son mouvement en ligne droite (page 75), et fuit l'axe de rotation vers lequel se produit un vide immédiatement rempli par l'eau du tuyau d'aspiration T. L'eau se trouve alors comprimée dans l'espace E concentrique à la roue et s'élanche dans le tuyau S de refoulement.

**POMPES SPIRALES.** — Ce genre de pompes est connu depuis la plus haute antiquité. La *vis d'Archimède* en est une: c'est d'ailleurs une des plus avantageuses lorsqu'il s'agit d'élever l'eau seulement de quelques mètres. Sa simplicité, le peu d'espace qu'elle occupe, la facilité avec laquelle on l'établit la font employer très souvent, particulièrement en Hollande pour les épaissements de marais.

Elle se compose (*fig. 176*) d'un bâti sur lequel repose un axe incliné, placé à sa partie inférieure sur une crapaudine et à sa partie supérieure sur un coussinet supportant un cylindre dans lequel se trouvent

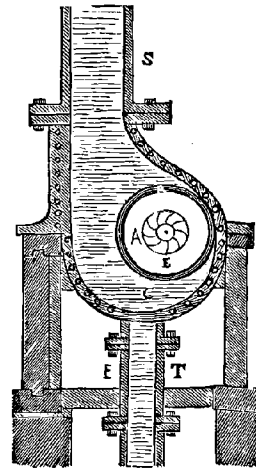


Fig. 175.

POMPE D'APPOLD.

des conduits hélicoïdaux qui sont les parties principales de la machine.

L'axe et le cylindre creux forment ce que l'on appelle le *canon* de la vis ; lorsque cette dernière est destinée à être mise en mouvement par un bras d'homme, l'axe se termine à sa partie supérieure par une manivelle coudée ; quand elle doit être mue par un moteur quelconque, il est terminé par un engrenage qui lui transmet le mouvement de rotation de l'arbre principal de la machine motrice.

Le canon plonge par sa partie inférieure un peu au-dessous du ni-

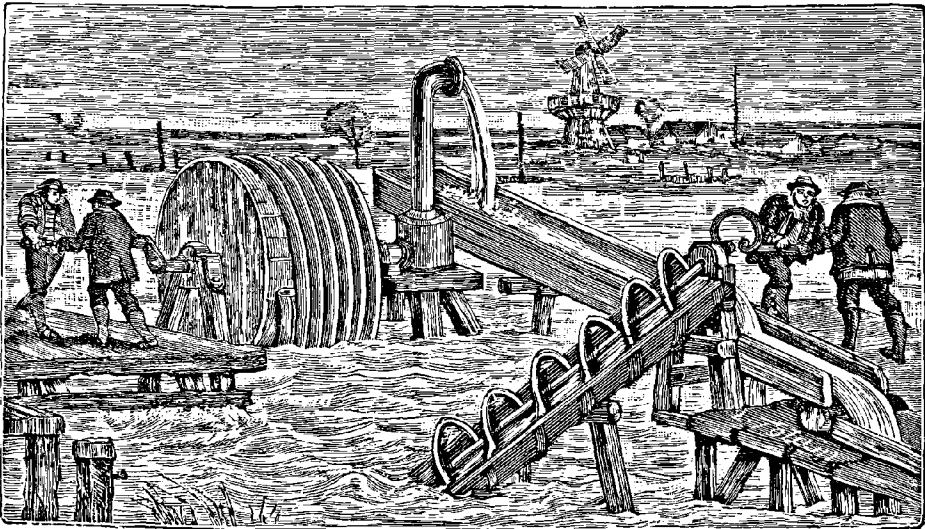


Fig. 176. — POMPES SPIRALES. (Dessèchement d'un canal en Hollande.)

veau de l'eau qu'il s'agit d'élever : lorsqu'on lui imprime un mouvement de rotation dans le sens contraire à celui des hélices qui forment les conduits, l'orifice de ces derniers, en passant dans l'eau, en puise une certaine quantité qui s'élève de spire en spire, vient sortir par l'orifice supérieur, où elle trouve, au moyen d'un tuyau, l'issue qui lui est destinée.

Cette machine varie en diamètre, comme la quantité d'eau qu'on veut lui faire élever. L'angle que les hélices font avec l'axe du noyau doit être d'environ 50 degrés ; il n'y a rien cependant d'absolu à cet égard. L'expérience démontre qu'un ouvrier, de force ordinaire, peut élever en une heure de temps 15 mètres cubes d'eau à un mètre de hauteur avec une vis d'Archimède bien disposée.

La *pompe spirale* proprement dite n'est point autre chose, comme le montre la figure, qu'une vis d'Archimède construite d'une manière plus commode.

## CHAPITRE XVI

## POUSSÉE DE L'AIR — AÉROSTATS

**CORPS FLOTTANTS DANS L'ATMOSPÈRE.** — Le principe d'Archimède est aussi vrai pour les gaz que pour les corps liquides, et les lois qui découlent du principe s'appliquent à l'un ou à l'autre de ces corps.

C'est, en effet, par suite de leur fluidité, c'est-à-dire de la grande mobilité de leurs molécules que les liquides exercent une poussée verticale de bas en haut sur les corps qui y sont plongés (page 210) ; il est donc évident que les corps gazeux, et en particulier l'air atmosphérique, jouissant d'une fluidité beaucoup plus grande, doivent également exercer sur tout ce qui s'y trouve plongé une poussée verticale de bas en haut. Cette poussée, à cause du faible poids de l'air, a certainement moins de valeur que celle de l'eau ; mais elle est encore assez forte, puisqu'elle est égale au poids de l'air dont ces corps occupent la place. L'air atmosphérique

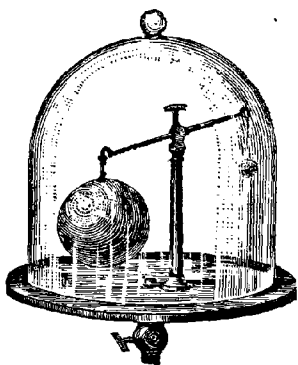


Fig. 177. — BAROSCOPE.

pesant, par exemple, 1 gramme par décimètre cube, un corps d'un décimètre de volume, ne pesant que  $0^{\text{sr}},25$  subira ainsi une poussée de  $1^{\text{sr}},00 - 0^{\text{sr}},25 = 0^{\text{sr}},75$ .

**BAROSCOPE.** — Quand on pèse un corps dans l'air on n'a donc pas son poids réel, mais seulement l'excès du poids de ce corps sur le poids du volume d'air qu'il déplace. Ce principe se démontre expérimentalement à l'aide du *baroscope*.

Le baroscope (du grec *baros*, pesanteur, et *scopeo*, j'observe) n'est autre chose qu'une balance (fig. 177) supportant à chaque extrémité du fléau deux boules de cuivre, de diamètres très différents, mais dont la plus petite, qui est pleine, fait exactement équilibre dans l'air à la plus

grosse qui est creuse. Si l'on place l'appareil sous la cloche d'une machine pneumatique, on voit, dès que le vide est fait, que l'équilibre est rompu et que la plus grosse l'emporte sur la plus petite. C'était donc auparavant la poussée de l'air qui maintenait l'équilibre, c'est-à-dire que la grosse sphère perdait la plus grande partie de son poids. Que l'on ajoute à la petite sphère, le poids d'un volume d'air égal au volume de la grosse sphère, l'équilibre se rétablira aussitôt. Que l'on introduise sous la cloche de l'acide carbonique, qui est plus dense que l'air, la poussée supportée par la grosse sphère sera plus grande que celle supportée par la petite sphère, et cette dernière emportera la grosse sphère.

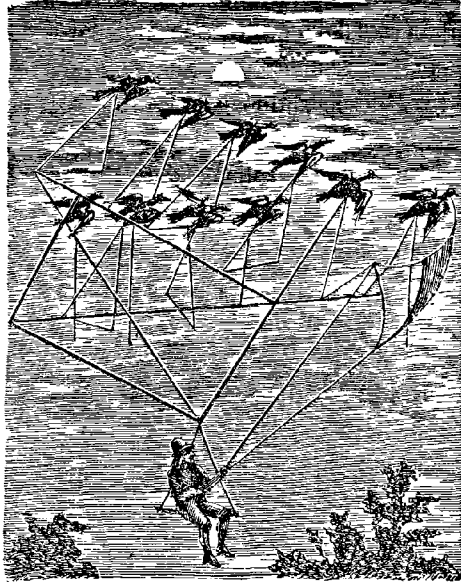


Fig. 178. — GODWIN.

Tout ce que nous avons dit (page 211) des corps plongés dans les liquides est applicable aux corps plongés dans l'air atmosphérique.



Fig. 179. — CYRANO DE BERGERAC.

Ainsi s'explique l'ascension dans l'atmosphère de la fumée, de la vapeur d'eau, des nuages, et aussi des aérostats.

#### AÉROSTATS. — HISTORIQUE. —

Nous avons dit (pages 14 et 15) tout ce que l'antiquité nous a laissé relativement à l'aérostatique; le manque absolu de documents ne nous permet pas de juger de la valeur de ces essais de navigation aérienne. Il est permis de croire cependant que l'attention des philosophes et des savants dut se porter, dès les temps les plus anciens, sur ce moyen de loco-

motion, et que, la vue du cygne ayant donné, dit-on, l'idée de la construction des vaisseaux, la vue de l'aigle et des autres oiseaux a probablement

inspiré le désir de les imiter. Mercure aux pieds ailés n'est-il pas un mythe qui représente les rêves et les espérances des physiciens de ces temps-là ?

Le christianisme convertit le monde. Deux tentatives seulement apparaissent alors, nous signalant les préoccupations de l'esprit humain sur cet objet. Leur insuccès est attribué à la volonté divine, châtiant l'orgueil insensé de l'homme. Rappelons, en effet, qu'en 1783, après les expériences de Montgolfier, les pamphlets pieux déclaraient la découverte



Fig. 180. — L'HOMME VOLANT  
(dans le livre de Rétif de La Bretonne).

des aérostats *immorale*, surtout « parce que Dieu n'ayant pas donné d'ailes à l'homme, il est impie de prétendre mieux faire que lui et d'empiéter sur ses droits. »

La première de ces deux tentatives est celle de Simon le Magicien (66 après J.-C.). C'était un Juif qui, après de longs voyages en Égypte et dans tout l'Orient, était revenu dans sa patrie, à Samarie, où sa science le fit bientôt connaître, admirer et aimer de ses concitoyens qui l'appelaient « *la vertu de Dieu*. » Croyant trouver dans le christianisme naissant quelque chose à apprendre, il fit comme il avait fait auparavant pour arracher quelques secrets aux prêtres de l'Égypte et

de l'Inde, il offrit de l'argent en échange de révélations utiles. Déçu dans ses espérances, il abandonna la secte nouvelle, et poursuivit seul ses travaux. Étant allé à Rome, où Néron, avide de tout prodige, entretenait dans le palais impérial un homme qui avait promis d'inventer une machine capable de le soutenir dans les airs, Simon s'éprit de l'idée, et tenta à son tour de la mettre à exécution, quand le premier inventeur eut échoué. Il ne réussit pas; saint Pierre et saint Paul empêchèrent, dit-on, par leurs prières, que Simon découvrit dès lors l'aérostation. S'étant en effet, lancé du haut d'une tour, soutenu par l'appareil qu'il avait imaginé, il s'éleva et se maintint quelque temps; mais bientôt il tomba, et, s'étant brisé la cuisse dans sa chute, il ne put supporter ses douleurs et sa honte : il se précipita du haut d'un comble et se tua.



L'autre essai fut tenté par un Sarrasin, à Constantinople, au temps de l'empereur Emmanuel Comnène. Les expériences de celui-ci étaient basées sur le principe du plan incliné : il descendait suivant une route



LES FRÈRES MONTGOLFIER.

oblique, se servant, au moyen d'une longue robe, aux pans fort larges et retroussés avec de l'osier, de la résistance de l'air comme point d'appui. Il échoua comme Simon le Magicien, et, comme lui, se tua en tombant.

Jusqu'au XIII<sup>e</sup> siècle, l'histoire de l'aérostatique ne renferme plus

aucun fait. A cette époque, le moine Roger Bacon (1), dans son *Traité de l'admirable puissance de l'art et de la nature*, émet l'idée « qu'il ne serait pas difficile de construire une machine dans laquelle un homme, étant assis ou suspendu au centre, tournerait quelque manivelle qui mettrait en mouvement les ailes faites pour battre l'air à l'instar de celles des oiseaux. » Et il décrit une machine qui a quelques rapports avec

celle que présentait au XVIII<sup>e</sup> siècle le fameux Blanchard.

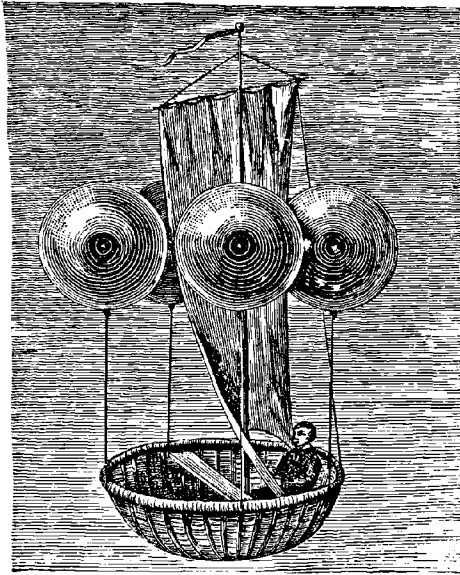


Fig. 181. — BALLON DE LANA.

Depuis lors, excepté un mathématicien de Pérouse, nommé Jean-Baptiste Dante, qui, à la fin du XV<sup>e</sup> siècle, construisit des ailes artificielles avec lesquelles il s'élevait très haut, et qui tomba et se brisa la cuisse, lors du mariage du général vénitien Barthélemy Alviano; excepté encore le savant bénédictin Ollivier, de l'abbaye de Malesbury, qui, ayant fabriqué des ailes, d'après la description qu'Ovide nous a laissée de celles d'Icare, s'élança du haut d'une tour, se soutint quelque peu en l'air, puis tomba et se cassa les jambes; excepté encore peut-être

des travaux qui ne nous sont pas parvenus du célèbre peintre Léonard de Vinci, il n'existe, en fait d'aérostatique, que des rêveries de romanciers et de poètes. Ce sont les enchantements de l'Armide du Tasse (1544-1595), les œuvres magiques des sorcières de Brooken (1706-1783); les *Voyages dans la lune* de Godwin (1638), au moyen d'oies sauvages

(1) BACON (Roger), surnommé le *Docteur admirable* (1214-1294). Cet illustre savant anglais avait acquis des connaissances extraordinaires pour son siècle, particulièrement en physique. Étant entré dans l'ordre des franciscains, les moines, ses confrères, irrités d'avoir parmi eux un savant, l'accusèrent de connivence avec le diable, et le firent condamner à la prison. Il y passa la plus grande partie de sa vie. Le pape Clément IV l'ayant gracié, il eut quelques années de liberté; mais, à la mort de ce pape, il fut remis dans un cachot du couvent des franciscains, à Paris. Malgré cela, il découvrit, ou du moins décrivit exactement la poudre à canon, les verres grossissants, le télescope, le phosphore, etc., proposa la réforme du calendrier, et indiqua l'expérience comme seule méthode capable d'arriver à la vérité. Ses ouvrages, dont le principal est l'*Opus majus*, le Grand Œuvre, sont très nombreux. Néanmoins, il mourut absous. Cet homme célèbre est le digne précurseur de son illustre homonyme le chancelier Bacon, qui devait, au XVI<sup>e</sup> siècle, annoncer l'ère de la philosophie expérimentale.

qui enlevaient le voyageur à cheval sur un bâton (*fig. 178*); ceux de Cyrano de Bergerac (1620-1655), au moyen de fioles remplies de rosée que le soleil aspire et fait monter (*fig. 179*) ou par un grand oiseau de bois mécanique, ou par un solide à huit faces, creux, chauffé par le soleil et dont la partie inférieure laisse pénétrer l'air froid plus dense qui enlève la machine, ou encoré par un char de fer et un boulet d'aimant que le voyageur lance successivement en l'air et qui attire constamment le char. Il y a encore l'*Ile flottante de Gulliver*, imaginée par Swift (1667-1745); la *Découverte australe*, par Rétif de La Bretonne (1734-1806), qui renferme une gravure très artistement dessinée de l'homme partant à travers les airs (*fig. 180*); le *Philosophe sans prétention*, par M. de La Folie de Rouen (1775); les *Hommes volants*, de Wilkins (1680), etc.

Au xvii<sup>e</sup> siècle seulement, les progrès de l'astronomie et le réveil des sciences physiques appellent l'attention des savants sur la navigation

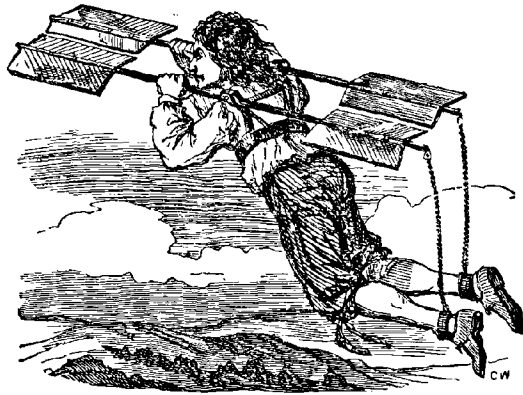


Fig. 182. — ESSAIS DE BESNIER.

aérienne. En 1670, le Père Lana, jésuite de Brescia, propose dans son livre intitulé : *Prodrome dell' arte maestra*, la construction d'un navire à voiles et à rames (*fig. 181*), qui devait voyager dans l'air, soutenu par quatre ballons en cuivre d'un dixième de millimètre d'épaisseur, et dans lesquels le vide eût été fait en les remplissant d'abord d'eau, puis en fermant vivement le robinet après l'écoulement. Quelque puéril que nous semble aujourd'hui ce procédé, l'invention du Père Lana fut regardée comme assez sérieuse pour que des physiciens comme Leibniz, Hooke et Borelli la critiquassent, montrant que la ténuité excessive des parois les empêcherait de résister à la pression atmosphérique et qu'elles seraient immédiatement écrasées; et, de plus, qu'il était impossible d'y produire le vide par les moyens indiqués. D'ailleurs, le principe théorique est parfaitement saisi par l'auteur, qui calcule exactement la force ascensionnelle de l'instrument.

Les critiques n'arrêtèrent pas l'élan donné; comme on l'a dit spirituellement, *l'idée était dans l'air*.

En 1678, un mécanicien de Sablé, nommé Besnier, inventa une

*machine à voler* (fig. 182). Le *Journal des savants* (12 septembre 1678) décrit ainsi cet appareil digne d'attention :

« Les ailes ont chacune un châssis oblong de taffetas attaché à chaque bout de deux bâtons, que l'on ajustait sur les épaules. Ces châssis se pliaient du haut en bas comme des battants de volets brisés. Ceux de devant étaient remués par les mains, et ceux de derrière par les pieds, en tirant chacun une ficelle qui leur était attachée.

» L'ordre du mouvement était tel que, quand la main droite faisait baisser l'aile droite de devant, le pied gauche faisait remuer l'aile gauche de derrière, ensuite, la main gauche et le pied droit faisaient baisser l'aile gauche de devant et la droite de derrière.

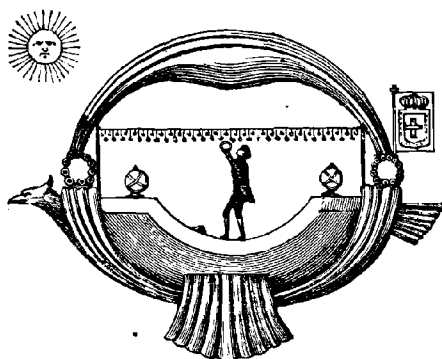


Fig. 183.

BALLON DE LAURENT DE GUZMAN.

» Ce mouvement en diagonale paraissait très bien imaginé, parce que c'est celui qui est naturel aux quadrupèdes et aux hommes quand ils marchent ou quand ils nagent. On trouvait néanmoins qu'il manquait deux choses à cette machine pour la rendre d'un plus grand usage; la première, qu'il faudrait y ajouter une grande

pièce très légère, qui, étant appliquée à quelque partie choisie du corps, pût contre-balancer dans l'air le poids de l'homme; la seconde, que l'on ajustât une queue qui servit à soutenir et à conduire celui qui volerait; mais on trouvait bien de la difficulté à donner le mouvement et la direction à cette espèce de gouvernail, après les expériences qui avaient été inutilement faites autrefois par plusieurs personnes. »

Cette tentative, quelque ingénieuse que fût la combinaison de son auteur, avorta.

La tradition signale encore, en suivant l'ordre chronologique, un certain moine, Laurent de Guzman, qui, en 1736, s'éleva à Lisbonne, devant le roi Jean V, jusqu'au faite du palais au moyen d'une espèce de ballon, sorte d'oiseau de bois, dont la gravure existe à la Bibliothèque nationale (fig. 183); puis un danseur de corde, nommé Allard, qui, en présence de Louis XIV, partit, armé d'ailes, du haut de la terrasse de Saint-Germain, pour traverser la Seine, et qui tomba, dès les premiers instants, au pied même de la terrasse.

En 1755, un moine dominicain, le P. Galien (Joseph) publie un petit livre intitulé : *L'art de naviguer dans les airs, amusement physique et géométrique*. Le projet du P. Galien était absolument chimérique ; mais les détails dans lesquels il entre, les calculs auxquels il se livre, les prétendues vérités scientifiques sur lesquelles il appuie ses raisonne-

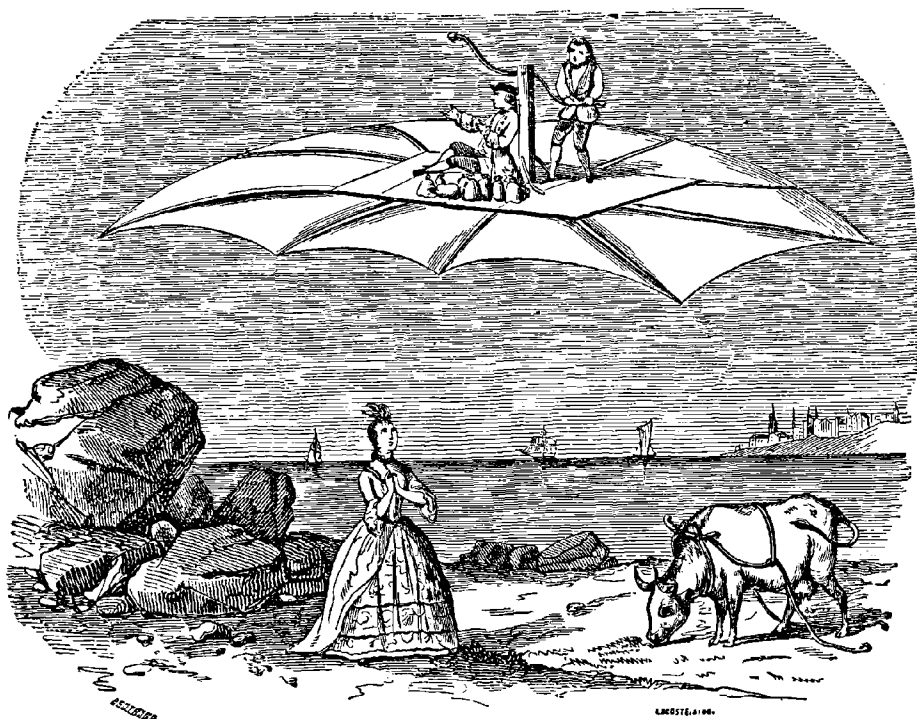


Fig. 184. — MACHINE DU DOCTEUR MUSGRAVE DE PLYMOUTH.

ments, montrent que déjà la possibilité de naviguer dans les airs était admise.

Nous ne citerons pas les essais infructueux des inventeurs malheureux de l'époque : la machine du docteur Musgrave de Plymouth (1769) (fig. 184) ; la *voiture volante* de l'abbé Desforges, chanoine de Sainte-Croix, à Étampes, espèce de gondole munie d'ailes, qui devait faire trente lieues à l'heure ; le jour de l'expérience, *plus le chanoine agitait ses ailes*, rapporte un témoin, *plus la machine semblait presser la terre et vouloir s'identifier avec elle*.

Nous ne parlerons pas non plus de M. le marquis de Bacqueville, qui, en 1780, s'élança tout ailé d'une fenêtre de son hôtel, sur le quai, et alla se casser la jambe dans un bateau de blanchis-

seuses, ni du fameux *vaisseau volant*, imaginé par Blanchard, et qui fut exposé, en 1782, à l'hôtel de l'abbé Viennoy, rue Taranne (fig. 185).

C'est alors que les frères Montgolfier (1) inventèrent les aérostats. Est-ce la vue des nuages suspendus au-dessus des Alpes qui donna

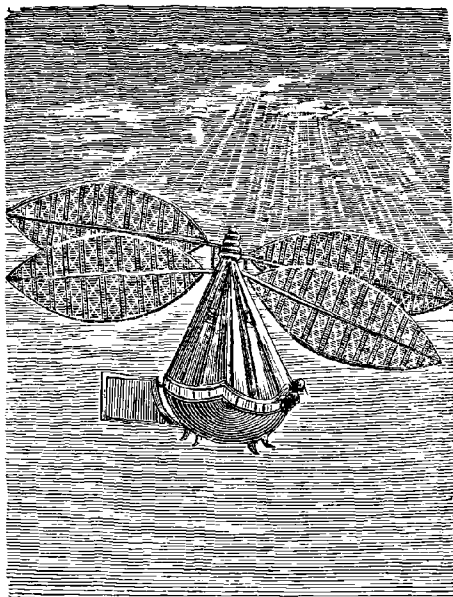


Fig. 185.

VAISSEAU VOLANT DE BLANCHARD.

l'idée aux deux savants de leur découverte? Est-ce le hasard : le jupon de la femme de l'un d'eux, placé sur un réchaud pour sécher, et qui s'éleva tout à coup devant eux? Ne faut-il pas croire plutôt que leurs études leur avaient fait remarquer qu'une chaleur de 100 degrés, raréfiant l'air dans un vaisseau, lui fait occuper un espace double, ou, en d'autres termes, diminue sa pesanteur de moitié? Quoi qu'il en soit, au mois de novembre 1782, étant à Avignon, ils avaient fabriqué un ballon, affectant la forme d'un parallépipède creux, en taffetas, contenant deux mètres cubes d'air environ. Chauffant l'air contenu dans ce parallépipède, ils le virent monter au plafond de la chambre où ils se trouvaient. Rentrés à Annonay, ils répétèrent l'expérience en plein air, après avoir modifié la forme de leur aérostat (fig. 186). Ils désirèrent alors une expérience publique pour faire constater leur découverte.

(1) MONTGOLFIER (Joseph-Michel (1740-1810) et Jacques-Étienne) (1745-1799), nés à Vidalon-lès-Annonay (Ardèche), étaient l'un et l'autre fils d'un riche marchand de papier. Placés à la tête de la fabrique de leur père, ils y introduisirent de nombreux perfectionnements que leurs études scientifiques leur permirent de trouver. Ils s'occupaient tout particulièrement de physique et de mécanique, et inventèrent, entre autres choses, le *Bélier hydraulique*. Leur esprit de recherche les avait amenés à simplifier la fabrication du papier ordinaire dans leur usine, à améliorer celle des papiers peints de diverses couleurs, à imaginer une sorte de machine pneumatique pour raréfier l'air dans les moules dont ils se servaient. Ils inventèrent encore une presse hydraulique particulière à leur industrie, un calorimètre pour déterminer la qualité des diverses tourbes du Dauphiné, un ventilateur pour distiller à froid par le contact de l'air en mouvement, un appareil pour la dessiccation à froid des légumes et des fruits, etc. On a voulu attribuer à l'un ou à l'autre de ces deux frères l'honneur de l'invention des aérostats; mais la postérité n'a jamais séparé les noms des deux frères, comme eux-mêmes avaient toujours présenté leurs travaux en commun. Le succès de leur découverte fut immense. Leur famille fut anoblie, Joseph fut nommé administrateur du Conservatoire des Arts-et-Métiers et membre de l'Institut en 1807.

Il y a loin, sans doute, entre une expérience de cabinet, quelque délicate et quelque ingénieuse qu'elle puisse être, et celle où il faut que l'homme combine des moyens pour imiter la nature dans une opération qui n'avait encore été tentée par personne. L'idée seule de ce projet suppose nécessairement du génie, son exécution du courage et un merveilleux sang-froid.

L'assemblée des états particuliers du Vivarais se trouvant réunie à Annonay, les frères Montgolfier la prièrent d'assister à l'expérience qu'ils voulaient tenter. Le 5 juin 1783, cette expérience eut lieu en présence des états.

Étienne Montgolfier nous a laissé le récit de cette opération :

« La machine aérostatique dont l'expérience fut faite devant MM. des États particuliers du Vivarais, le jeudi 5 juin 1783, était construite en toile doublée de papier, cousue sur un réseau de ficelles fixé aux toiles. Elle était à peu près de forme sphérique et sa circonférence était de 110 pieds ; un châssis en bois de 16 pieds en carré la tenait fixée par le bas. Sa capacité était d'environ 22,000 pieds cubes ; elle déplaçait donc, en supposant la pesanteur moyenne de l'air comme  $\frac{1}{300}$  de la pesanteur de l'eau, une

masse d'air de 1,980 livres. La pesanteur du gaz était à peu près moitié de celle de l'air, car il pesait 990 livres, et la machine pesait avec le châssis 500 livres. Il restait donc 490 livres de rupture d'équilibre, ce qui s'est trouvé conforme à l'expérience. Les différentes pièces de la machine étaient assemblées par de simples boutonnières arrêtées par des boutons ; deux hommes suffirent pour la monter et pour la remplir de gaz, mais il en fallut huit pour la retenir, et qui ne l'abandonnèrent qu'au signal donné : elle s'éleva par un mouvement accéléré, mais moins rapide sur la fin de son ascension, jusqu'à la hauteur de 1,000 toises. Un vent à peine sensible vers la surface de la terre, la porta à 1,200 toises de distance du point de son départ. Elle resta dix minutes en l'air ; la déperdition du gaz par les boutonnières, par les trous d'aiguille et autres imperfections de la machine ne lui permit pas d'y rester davantage. Le vent, au moment de l'expérience, était au midi et il pleuvait ; la machine descendit si légèrement qu'elle, ne brisa ni les épis, ni les échelas des vignes sur lesquels elle se reposa. »

Il ne nous appartient pas de décrire l'une après l'autre les expériences

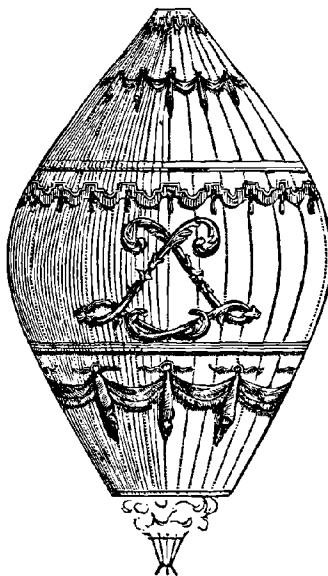


Fig. 186. — PREMIER BALLON DES FRÈRES MONTGOLFIER.

aérostatiques qui, aussitôt après celle des frères Montgolfier, se répétèrent en France et dans le monde entier; il nous suffira d'indiquer celles qui se signalent à l'attention par quelque perfectionnement nouveau ou qu'une

cause particulière rend intéressantes (1).

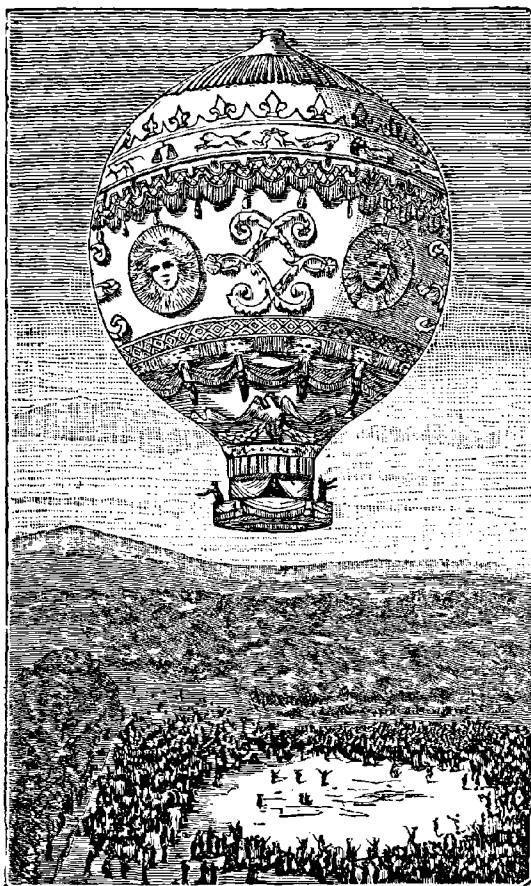


Fig. 187. — PREMIER VOYAGE AÉRIEN  
PAR PILATRE DE ROZIER.

Le 27 août 1783, au Champ-de-Mars, à Paris, eut lieu la seconde ascension d'un ballon, construit par un jeune professeur nommé Charles (2), secondé par les frères Robert, mécaniciens, et déjà un immense progrès s'accomplit. L'air chaud du ballon des frères Montgolfier est remplacé par le gaz hydrogène. Ceux-ci, dans leur première expérience, s'étaient déjà servi de ce gaz, trouvé quelques années auparavant par Cavendish; mais ce gaz traversant très facilement le papier, ils l'avaient abandonné. Charles para à cet inconvénient en employant le taffetas enduit de gomme élastique pour la confection des ballons. Cependant les frères Montgolfier continuèrent à se servir d'air réchauffé avec de la paille sèche

et de la laine hachée, variant seulement la forme de leur aréostat, qui, de leur nom, s'appelait une *montgolfière*.

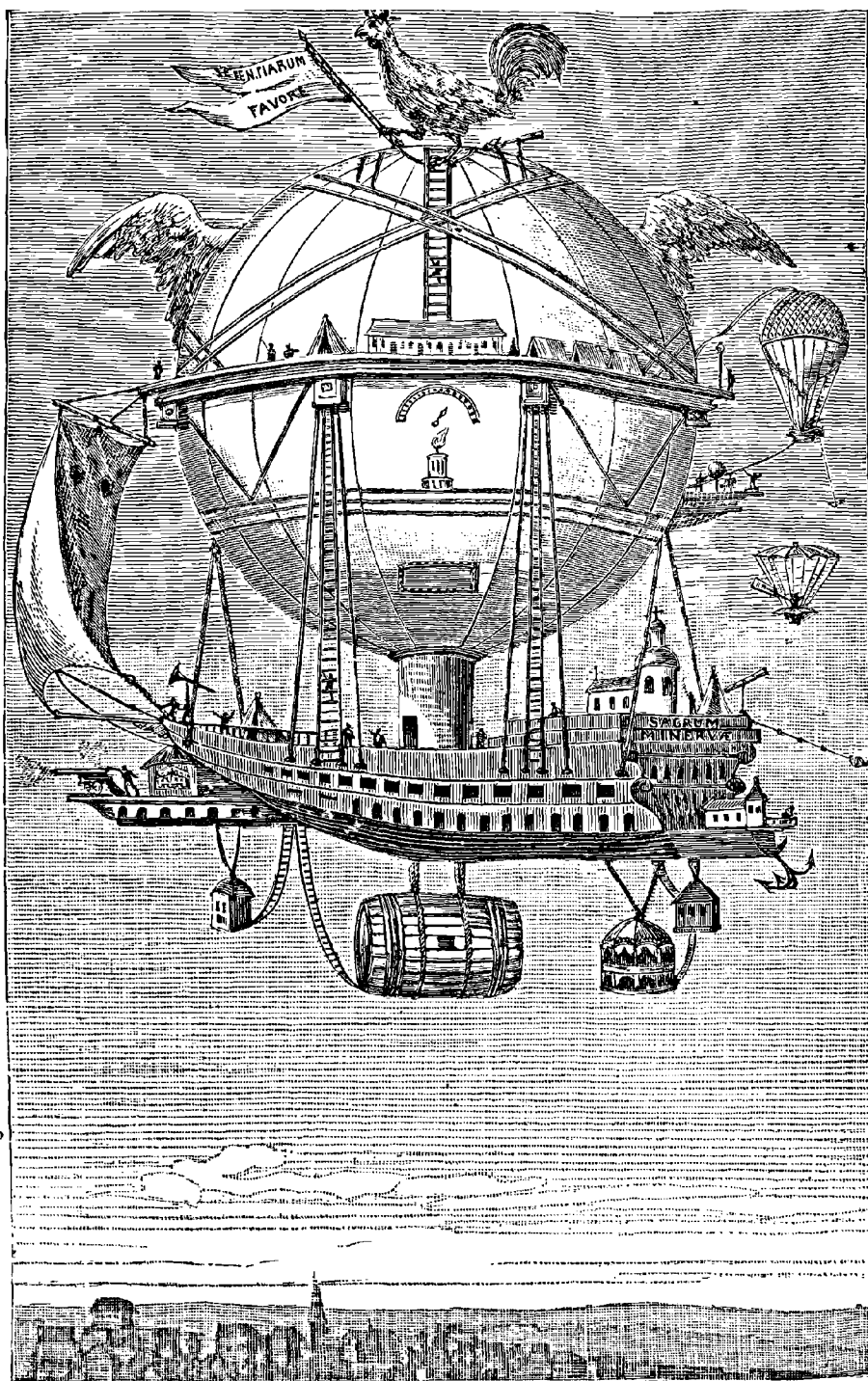
Ce fut seulement le 24 octobre 1783, qu'au moyen d'une *montgolfière*

(1) Pour ceux qui voudraient avoir des détails nombreux sur l'aérostatique, rappelons le titre des ouvrages suivants, quoique le succès les ait fait connaître depuis longtemps : *Les BALLONS*, par F. Marion (*Bibl. des Merveilles*); les *VOYAGES AÉRIENS*, par Glaisher, Tissandier, Flammarion, etc.; *La NATURE*, par M. Tissandier.

(2) CHARLES (Jules-Alexandre-César), né à Nancy (1746-1823), professeur de physique. Ses cours au Louvre, son cabinet, le rendaient célèbre alors. Il s'occupa spécialement d'aérostation et d'électricité. Professeur au Conservatoire des Arts-et-Métiers, membre de l'Académie des sciences en 1785.



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



LA MINERVE

d'après la gravure originale publiée par ROY (page 361).

Liv. 46.



(fig. 187) s'accomplit le premier voyage aérien. Après mille efforts pour vaincre l'opiniâtreté du roi qui ne voulait point permettre ces ascensions, l'intrépide Pilâtre de Rozier et son ami, le marquis d'Arlandes, eurent l'honneur d'ouvrir aux hommes la route des airs.

On dressa le procès-verbal de cette expérience; parmi les signatures, on remarque celle de Franklin, déjà illustre. Comme on le consultait sur l'utilité que pouvaient avoir les machines aérostatiques, il répondit simplement : « C'est l'enfant qui vient de naître. »

Quelques jours après, le 1<sup>er</sup> décembre 1783, Charles et les frères

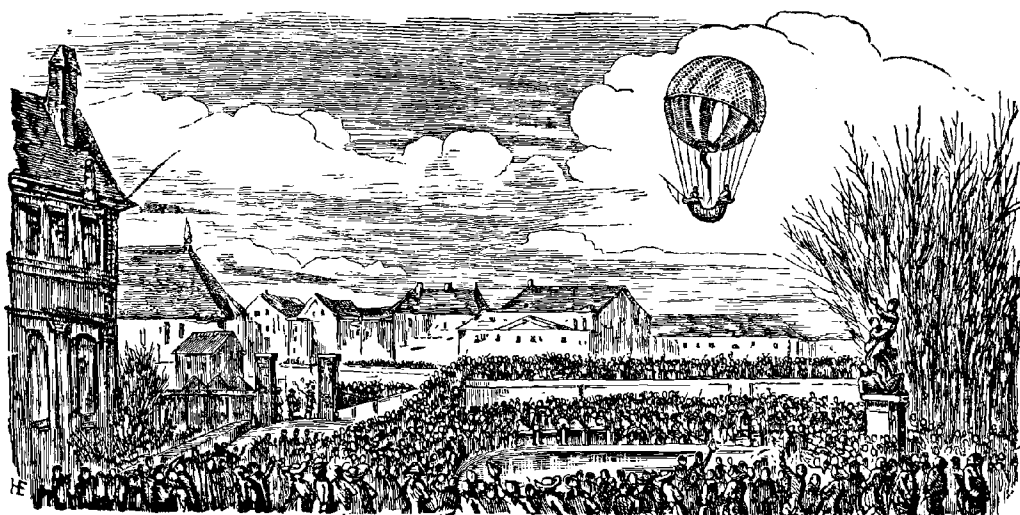


Fig. 188. — ASCENSION DE CHARLES ET DES FRÈRES ROBERT.

Robert, partis du Jardin des Tuileries, dans un ballon gonflé par le gaz hydrogène (fig. 188), répètent l'ascension de Pilâtre de Rozier.

Depuis ce moment, les excursions aériennes se multiplient avec une incroyable ardeur; mille essais de perfectionnement sont tentés, et surtout mille efforts sont faits pour diriger l'aérostat dans les airs.

Blanchard (1) part en 1784 dans son *vaisseau volant* (fig. 189), en 1785, avec Jefferies dans son ballon à voiles et à rames (fig. 190); l'Académie de Dijon organise des expériences aérostatiques (1784), et le physicien Guyton de Morveau s'enlève avec un ballon à gouvernail et à

(1) BLANCHARD (Nicolas), mécanicien, né aux Andelys (1753-1809), s'est occupé toute sa vie d'aérostation, et, parmi ses innombrables ascensions, en fit quelques-unes de remarquables, entre autres celle de 1785, pendant laquelle il réussit à traverser la Manche de Douvres à Calais. Sa femme, aéronaute aussi, se tua en 1819, dans une ascension exécutée dans le Jardin de Tivoli : le feu avait pris à son ballon, du haut duquel elle devait allumer un feu d'artifice.

ailes (*fig. 191*); les frères Robert (1784) exécutent une ascension avec un ballon à gaz hydrogène de forme oblongue, muni d'un système imaginé

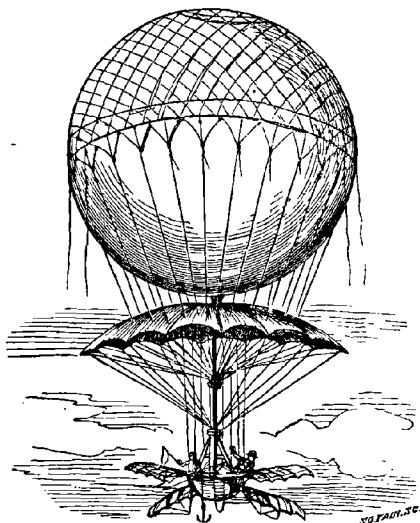


Fig. 189. — BALLON DE BLANCHARD.

par Meunier, c'est-à-dire renfermant un second ballon plein d'air (*fig. 192*); dans toutes les villes de France et de l'étranger, de hardis explorateurs s'élancent dans les airs, avec les appareils de toutes les formes, de tous les calibres, de toutes les dimensions. Les idées les plus fantastiques éclosent : entre autres celle du vaisseau « *la Minerve*, vaisseau aérien, destiné aux découvertes et proposé à toutes les académies d'Europe, par Robertson, physicien, » machine immense qui devait rester en l'air plusieurs mois, contenir soixante personnes et renfermer tout

ce qui est nécessaire à rendre un voyage agréable et utile (page 361); celle de Testu-Brissy (*fig. 193*), celle de Deghen (*fig. 194*), celle enfin de M. Petin (page 369), etc.

En 1786, Blanchard inventa le *parachute* (1). L'origine de cet appareil est certainement très ancienne, puisque l'on trouve la description d'une sorte de parachute dans un recueil publié à Venise en 1617, et que, dans la relation de l'ambassade de Louis XIV à Siam, on lit qu'un saltimbanque de ce pays se laissait tomber du haut d'un bambou élevé, sans autre secours que deux parasols dont

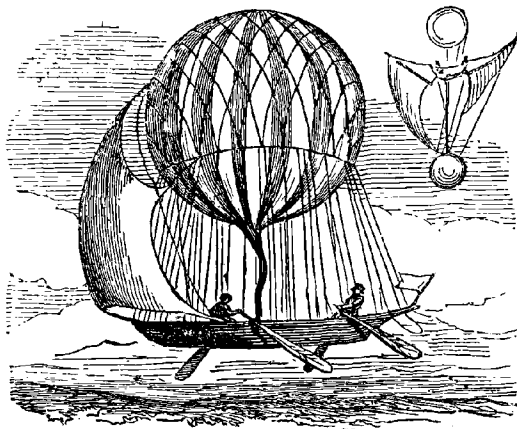


Fig. 190. — BALLON A VOILES ET A RAMES.

les manches étaient attachés à sa ceinture. Blanchard lui donna la forme qu'il a aujourd'hui, c'est-à-dire celle d'un grand parapluie, dont les

(1) Beaucoup d'historiens donnent comme le véritable inventeur du *parachute* un professeur de physique de Montpellier, nommé Sébastien Lenormand, qui en fit l'expérience publique en se jetant, le 26 novembre 1783, muni d'un énorme parasol, du haut de la tour de l'observatoire de

fuseaux de taffetas sont cousus et réunis au sommet à une rondelle de bois, formant une ouverture qui permet à l'air comprimé par la descente, de s'échapper sans imprimer à l'appareil des secousses dangereuses (*fig. 195*).

Il n'osa tenter des expériences que sur des animaux; ce fut Garnerin qui, le premier, en 1802, eut l'audace de se laisser tomber du haut des airs au moyen d'un parachute. Plus tard, en 1836, un aéronaute, nommé Cocking, ayant voulu modifier la forme du parachute (*fig. 196*), se tua à Londres dans une expérience publique. L'habileté des aéronautes a rendu les manœuvres de descente de l'aérostat lui-même plus sûres que celles du parachute; aussi a-t-on à peu près renoncé à son emploi.

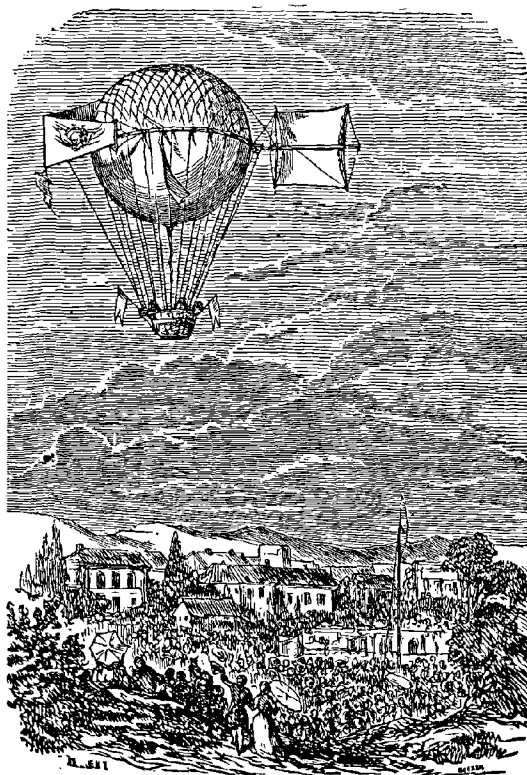


Fig. 191. — BALLON DE L'ACADÉMIE DE DIJON.

**DIRECTION DES BALLONS.** — La navigation aérienne est évidemment de nos jours bien plus une affaire de construction qu'une œuvre d'invention. Le principe existe; la pratique seule reste à créer. « Nous sommes persuadés, écrivent deux aéronautes des plus distingués de notre époque, MM. Tissandier et W. de Fonvielle, nous sommes persuadés qu'il arrivera aux ballons ce qui est arrivé aux chemins de fer, aux bateaux à vapeur

Montpellier. Peut-être, raconte M. Louis Figuier, Sébastien Lenormand avait-il été enhardi à faire ce périlleux essai à la suite d'une petite aventure arrivée à Nîmes. La fille d'un pâtissier, âgée de dix-huit ans, avait eu l'imprudence d'attacher des rideaux à une fenêtre qu'elle avait laissée ouverte. L'échelle sur laquelle elle était montée glissa, et la pauvre fille tomba du second étage dans la cour. Par bonheur pour elle, un vent du nord très violent se faisait sentir et s'engouffrait par la porte de la maison. Le vent gonfla les vêtements de la jeune fille en forme de parasol, de sorte qu'elle en fut quitte pour quelques contusions; mais, ce qu'il y a de plus extraordinaire dans cette aventure, c'est que la demoiselle était sourde et que l'usage de l'ouïe lui fut rendu par l'émotion qu'elle éprouva dans sa chute.

et même aux navires ordinaires. Le chemin de fer était trouvé en principe dès le jour où un ouvrier inconnu a fait rouler des wagons dans une mine, sur un bandage de fer. Le *Great-Eastern* était virtuellement découvert le jour où le premier sauvage a eu l'audace de se lancer sur un fleuve ou sur les flots de la mer, en se cramponnant à un morceau de bois que la nature avait creusé par hasard !...

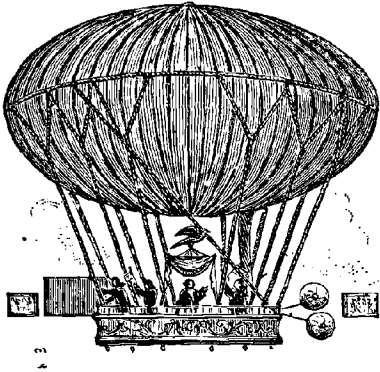


Fig. 192.

BALLON DES FRÈRES ROBERT  
ET MEUNIER.

» Les ballons ne sont pas loin de cet état d'enfance. Pourquoi? Est-ce parce qu'il faut des efforts inouïs d'intelligence pour les en tirer? Est-ce parce qu'il est nécessaire d'avoir recours à des principes nouveaux? En aucune façon. Non que l'intervention d'une mécanique plus savante que celle de notre époque ne puisse leur permettre de réaliser des effets inconnus, nouveaux, inespérés. Mais il s'en faut encore qu'ils aient été conduits par nos ingénieurs aussi loin que le permet l'état actuel de nos connaissances mécaniques. La construction d'un ballon dirigeable n'est que le résultat d'une longue patience, de tâtonnements, de détails pour la combinaison d'organes nouveaux... Nous ne saurions trop le dire, il est à désirer que les ballons deviennent la source de véritables spéculations industrielles, et qu'après avoir trouvé les moyens d'exploiter la terre et l'eau, on trouve également le moyen d'exploiter l'air. »

L'expérience a déjà démontré, dès 1852, que l'on pouvait fort bien progresser dans l'air et se diriger, par conséquent, dans des limites dépendantes de la violence du vent et de la force motrice dont pouvait disposer l'aérostat. Pourquoi, dit fort bien M. de Parville, dans un milieu fluide donné immobile, un corps rigide porteur d'un propulseur quelconque, si faible qu'il soit, ne progresserait-il pas? On sait qu'un ballon

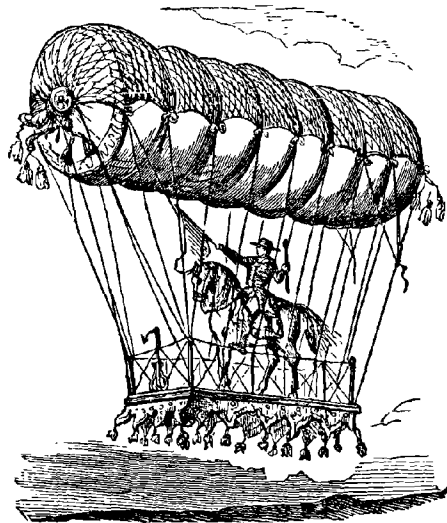


Fig. 193. — BALLON DE TESTU-BRISSEY.

et l'air qui le porte font si bien corps l'un avec l'autre qu'on ne sent pas dans la nacelle la plus petite brise; une bougie allumée n'oscille pas alors même que le ballon emporté par le vent parcourrait ses trente lieues à l'heure; par suite, toute hélice mise en mouvement, ne peut pas ne pas faire sentir son action, et si l'aérostat est construit avec des formes allongées convenables et avec gouvernail, il est de toute évidence qu'il se déplacera au milieu de la masse aérienne en raison de la force motrice et du rendement du propulseur. L'essai fait par M. Giffard, en



Fig. 194. — EXPÉRIENCE DE DEGEN.

1852, ne permettait pas d'en douter. Son appareil, garni d'une hélice mue par la vapeur, progressait, sinon absolument contre le vent, au moins en louvoyant avec une vitesse assez grande, variant entre deux à trois mètres par seconde.

Reprise en 1872 par M. Dupuy de Lôme, l'expérience de M. Giffard donna des résultats plus satisfaisants encore. Parti le 2 février de la cour du Fort-Neuf, à Vincennes, par un vent assez violent, l'aérostat a parfaitement obéi à l'influence du gouvernail, sa vitesse a dépassé celle que l'on avait annoncée, et les aéronautes sont descendus dans le département de l'Aisne, à Mondécourt, en suivant à peu près, l'itinéraire précisé d'avance.

Ce ballon (*fig.* 197), de forme ovoïde, a 36<sup>m</sup>,12 de pointe en pointe; son diamètre à la maîtresse section est de 14<sup>m</sup>,84; son volume est de 3,454 mètres cubes. La nacelle a 6 mètres de long sur 3 mètres de large, et supporte à son extrémité une hélice à deux ailes seulement, d'un dia-

mètre de 9 mètres. Cette hélice fait en moyenne 21 tours à la minute, mue par quatre hommes; à cette vitesse, la marche propre du ballon est

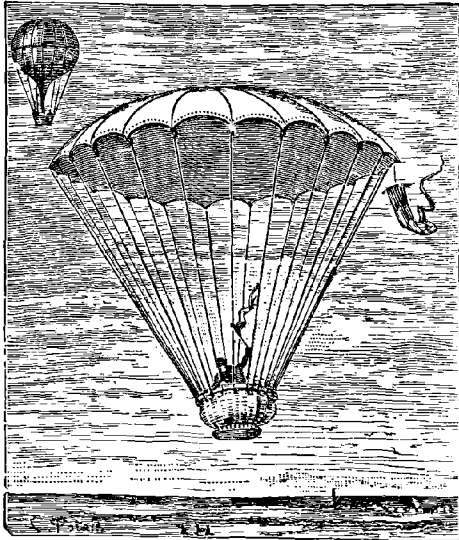


Fig. 195. — PARACHUTE.

de 2<sup>m</sup>,22 à la seconde, ou 8 kilomètres à l'heure. En faisant agir sur le treuil de l'hélice huit hommes à la fois, on atteint 28 tours et même 33 tours à la seconde, ce qui imprime à l'aérostat une vitesse de 3<sup>m</sup>,50 à la seconde ou de 12 kilomètres 600 mètres à l'heure. Le gouvernail se compose d'une voile triangulaire, placée sous le ballon, près de la pointe arrière et maintenue à sa partie basse par une vergue horizontale de 6 mètres de long pouvant pivoter sur son extrémité avant. La hauteur de cette voile est de 5 mètres, sa surface de 15 mètres carrés. Deux

drosses en filin pour manœuvrer le gouvernail descendent jusqu'à l'avant de la nacelle sous la main du timonier, qui a devant lui la boussole fixée à la nacelle avec sa ligne de foi parallèle au grand axe du ballon. Pour obtenir la permanence du gonflement, condition nécessaire pour que le ballon soit dirigeable, M. Dupuy de Lôme place dans la nacelle un ventilateur mis en communication par un tuyau d'étoffe avec un ballonnet disposé à la partie inférieure du ballon. Si l'enveloppe se ride par suite de l'échappement de l'hydrogène, on injecte de l'air dans le ballonnet et la tension de l'enveloppe est de nouveau assurée.

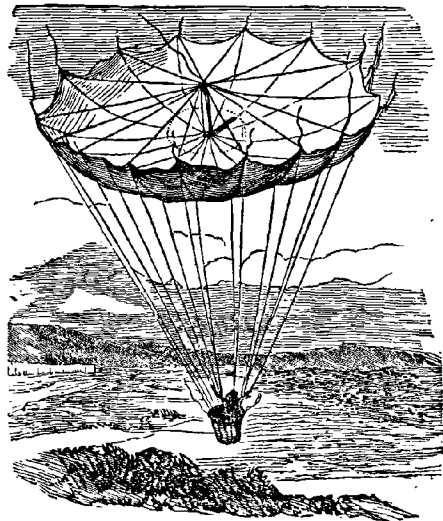


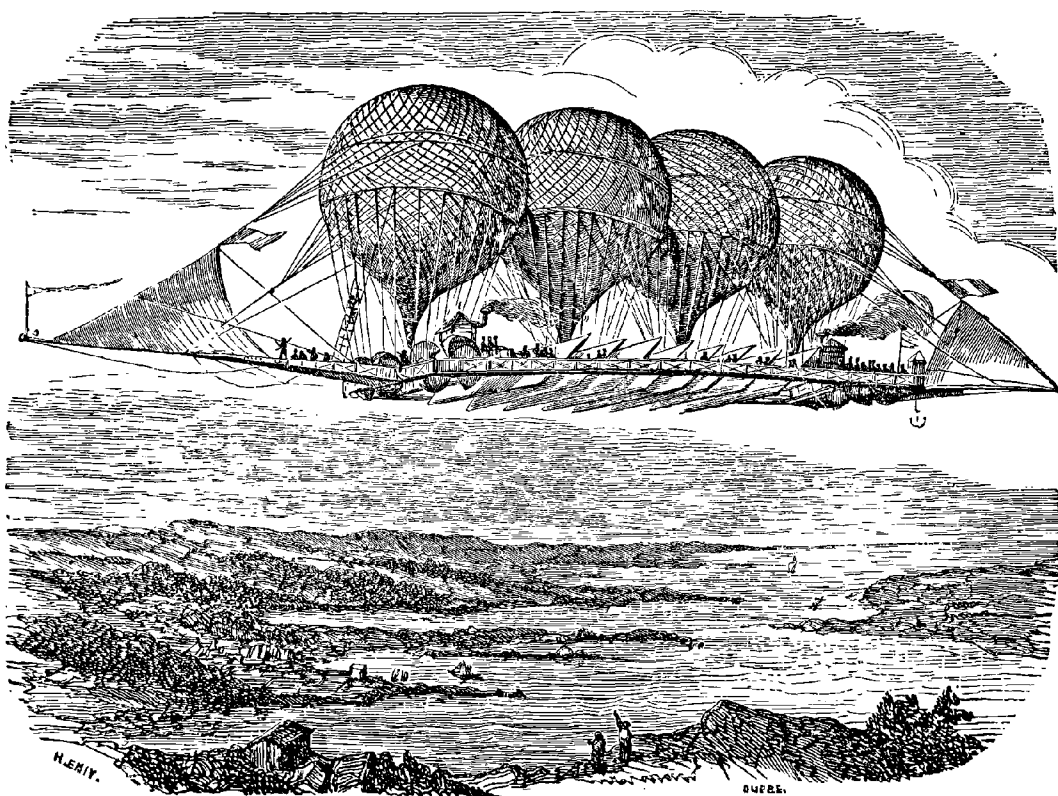
Fig. 196. — PARACHUTE DE COCKING.

Il est donc de toute évidence que la navigation aérienne triomphera de tous les obstacles. En attendant ce moment, les aéronautes s'occupent de perfectionner les détails de la construction, de transformer



de toutes pièces le matériel, de trouver une étoffe absolument imperméable au gaz, de résoudre le problème de la préparation économique du gaz hydrogène. Les ballons captifs de M. Giffard sont construits dans ce but.

Nous ne parlerons pas du ballon captif de 1867 ni de celui de Londres de 1869; le savant ingénieur a dépassé tout cela, avec le fameux ballon



Ballon Petin (page 364).

captif que, pendant l'Exposition universelle de 1878, le monde entier a admiré. Nous en résumons la description d'après celle qu'en ont donnée M. de Parville, dans ses *Causeries scientifiques de 1878* et M. Gaston Tissandier dans son intéressante brochure : *Le Ballon captif à vapeur*.

Ce ballon, d'un volume de 25,000 mètres cubes, constituait une sphère immense de 36 mètres de diamètre, et de 55 mètres de hauteur; il pouvait élever 50 personnes à une hauteur de 600 mètres. L'étoffe, combinée par M. Giffard, imperméable et en même temps assez légère pour résister aux intempéries de l'atmosphère, était formée de : 1° une

mousseline intérieure; 2° une couche de caoutchouc; 3° un tissu de toile de lin; 4° une couche de caoutchouc; 5° une seconde toile de lin; 6° une couche de caoutchouc vulcanisé; 7° une mousseline extérieure recouverte d'un vernis formé d'huile de lin cuite avec une petite quantité

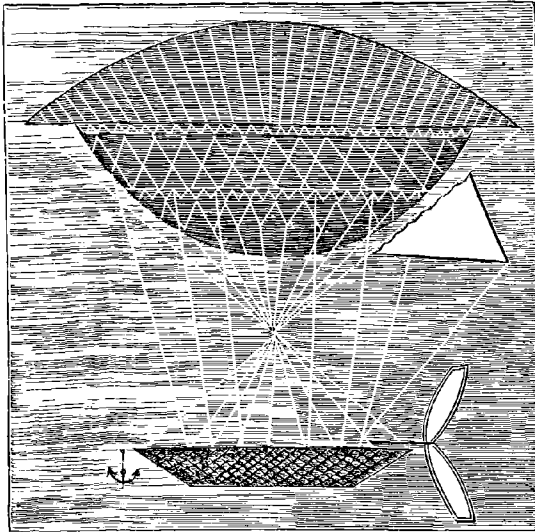


Fig. 197. — BALLON DE M. DUPUY DE LÔME.

de litharge. Toute l'étoffe était revêtue d'une couche de peinture au zinc. La couleur blanche est, comme on sait, celle qui absorbe le moins de chaleur, et il importait de réduire au minimum l'effet de l'insolation sur cette surface énorme. Le filet qui protège le ballon était fabriqué avec des cordes de 11 millimètres de diamètre. On ne pouvait, avec des cordes aussi grosses, confectionner le filet à l'aide de nœuds; on a simplement entre-croisé les cordes en reliant les joints au moyen de morceaux de peau munis d'œillets par lesquels passent les cordes de la ligature (fig. 198). Le filet a 52,000 mailles. Après avoir enveloppé le ballon, il se terminait en bas par une série d'attaches solides qui permettaient de le fixer à un cercle métallique capable de résister dans tous les sens à des efforts de 100,000 kilogrammes. Ce premier cercle en acier est relié à un second cercle placé à un niveau inférieur et autour duquel s'attachaient les cordes de la nacelle.

La nacelle, d'une circonférence de 18 mètres, avait 6 mètres de diamètre. On l'avait munie d'un double fond dans lequel était placé, en cas d'accident, tout le matériel des ascensions libres; un vide placé au centre laissait passer le câble qui retenait l'aérostat captif. Ce câble de traction, légèrement conique, avait 65 millimètres de diamètre à l'un de ses bouts et 85 à l'autre; il avait 600 mètres de longueur; mais, sous l'influence de la traction qu'on lui avait fait subir pour l'essayer, il avait atteint

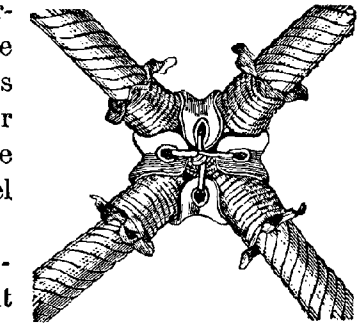


Fig. 198. — MAILLES  
DU FILET DU BALLON CAPTIF  
DE M. GIFFARD.

660 mètres. Il pouvait résister à une traction de 50,000 kilogrammes. Il était relié à l'anneau volumineux encastré dans le cercle d'acier du filet au moyen d'un peson formé de ressorts de fer (*fig. 199*). Le câble, en tirant sur ces ressorts, fait tourner des aiguilles sur des cadrans; d'après la position de l'aiguille, on apprécie la tension du câble.

L'aérostat avait été gonflé en quelques jours avec de l'hydrogène produit par la réaction de l'acide sulfurique sur de la tournure de fer, dans un appareil combiné par M. Giffard.

Le ballon captif immobilisé par huit câbles puissants au milieu de la cour des Tuileries, la nacelle restait au niveau du sol, suspendue au-dessus d'une grande cuvette au fond de laquelle on parvenait par des gradins. Au milieu de la cuvette était une large poulie qui pouvait s'incliner dans toutes les directions. Le câble s'enroulait sur cette poulie, passait sous terre dans un tunnel de 60 mètres, au bout duquel il s'enroulait sur des rainures creusées dans un treuil volumineux. Ce treuil, de 10 mètres de longueur et de 1<sup>m</sup>,70 à 2 mètres de diamètre, reposait sur de solides coussins et portait à chacune de ses extrémités une roue d'engrenage de 3<sup>m</sup>,50 de diamètre.

En arrière du treuil, deux énormes chaudières à vapeur; en avant deux puissantes machines à deux cylindres et faisant mouvoir, par l'intermédiaire de pignons, les grandes roues du treuil. La manœuvre se comprend d'elle-même; selon la direction donnée au cylindre, le câble s'enroulait ou se déroulait, le ballon montait ou descendait.

Nous passons sous silence un grand nombre d'ingénieuses dispositions dues à l'initiative de M. Giffard, grâce auxquelles aucun danger ne fut jamais à craindre.

**UTILITÉ DES AÉROSTATS. — 1<sup>o</sup> AÉROSTATION MILITAIRE.** — Depuis le siège de Paris, il n'est plus permis à un Français de parler légèrement de l'art de l'aérostation. Nos ballons, mais c'est là notre victoire à nous, vaincus de Paris; malgré l'ennemi, malgré ses colères, sa rage, ils ont traversé l'espace et ont été leur porter notre défi par-dessus ses lignes jusqu'au cœur de la France, jusqu'au cœur de l'Europe! Les ballons et la poste aux pigeons, il ne faut pas les oublier, car c'est ce que jamais

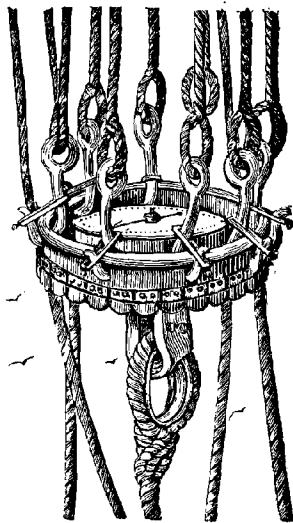


Fig. 199.

PESON DU BALLON CAPTIF  
DE M. GIFFARD.

l'ennemi n'oubliera ; ses efforts ont été vains, ses ordres impuissants , il a été vaincu par une invention française.

Rappelons-le : 64 ballons ont franchi les lignes ennemies, 5 ont été faits prisonniers, 2 se sont perdus en mer. Ils ont enlevé 64 aéronautes, 91 passagers, 365 pigeons et 9,000 kilogrammes de dépêches représentant 3 millions de lettres.

Excepté dans cette circonstance mémorable, l'aérostation militaire n'a pas encore rendu les services qu'on doit attendre d'elle. Le corps des *aérostiers*, fondé en 1794 par le Comité de salut public, fut pourtant, sous le commandement de Coutelle, une des principales causes de la victoire de Fleurus. Napoléon ayant dissous ce corps à son retour d'Égypte, on n'entendit plus guère parler de ballons au service des armées qu'en 1815, au siège d'Anvers, où Carnot les employa ; puis pendant la campagne d'Italie, en 1859, et encore ne s'en servit-on qu'à peine, la veille de la bataille de Solferino.

Aux États-Unis, dans leur dernière grande guerre, quelques essais furent faits par MM. Alland, Love, La Mountain, et les résultats obtenus ont été assez grands pour qu'il faille penser que, dans l'avenir, les aérostats feront partie du matériel des armées.

**2° ASCENSIONS SCIENTIFIQUES.** — La première ascension entreprise dans un but scientifique n'eut lieu qu'en 1803, à Hambourg, par deux physiciens flamands nommés L'Hoest et Robertson, le même savant qui, plus tard, fit la singulière proposition du vaisseau aérien *la Minerve*, dont nous avons parlé. Leurs observations, relatives à la physique et à la météorologie, furent nombreuses, mais furent démenties par celles de Gay-Lussac. En France, ce furent MM. Biot et Gay-Lussac qui, le 24 août 1804, firent la première, afin de savoir si la force magnétique, faisant mouvoir l'aiguille aimantée à la surface terrestre, s'affaiblit à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère. Les résultats constatés n'ayant pas paru concluants, Gay-Lussac partit seul et s'éleva jusqu'à 7,016 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Il reconnut d'abord (ce qui était l'objet principal de l'ascension) que la force magnétique diminue avec la hauteur de l'air. Incidemment, il constata que la température, à un changement de hauteur donné, varie moins près de terre que dans les régions moyennes de l'atmosphère ; que l'humidité de l'air diminue rapidement avec la hauteur ; que l'air lui-même, recueilli à 6,366 mètres de hauteur a la même composition en oxygène et en azote que celui pris à la surface du sol ; que, de plus, cet air ne contient pas un atome d'hydrogène, ce qui renverse la théorie de Berthollet

expliquant les phénomènes de l'éclair et du tonnerre par la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène dans les régions élevées de l'atmosphère.

En 1850, MM. Barral et Bixio, en 1851, M. Green, firent aussi des observations météorologiques très importantes. M. J. Glaisher, directeur de la division magnétique et météorologique de l'observatoire de Greenwich (Angleterre) a, depuis 1862, exécuté avec M. Coxwell, plus de trente ascensions, qu'il a racontées dans un livre devenu populaire : *Les Voyages aériens*, volume qui renferme également les détails des excursions dans l'atmosphère de nos grands aéronautes contemporains, MM. Camille Flammarion, Wilfrid de Fonvielle et Gaston Tissandier. Citons, d'après cet ouvrage, ses observations tendant à prouver que le décroissement de la température avec la hauteur est loin d'être constant; à constater l'existence de courants réguliers d'air chaud qui expliquent pourquoi l'Angleterre possède en été une température plus élevée que celle qui semblerait répondre à sa latitude, température expliquée seulement jusqu'à ce jour par le voisinage du Gulf-Stream; à remarquer les circonstances qui peuvent influer sur la température du point de rosée, et sur le degré d'humidité des couches atmosphériques à des niveaux différents; à démontrer que les baromètres anéroïdes, bien fabriqués, comme le baromètre de Vidi dont nous avons parlé ci-dessus, sont aussi exacts et bien moins embarrassants, et par conséquent de beaucoup préférables aux baromètres à mercure; à mesurer la rapidité des vents au-dessus de la surface de la terre, etc.

Le 22 mars 1874, MM. Crocé-Spinelli et Sivel exécutèrent une très belle ascension scientifique dans laquelle, outre d'importantes observations sur la constitution de l'atmosphère, ils résolvaient un grand problème de physiologie.

Il s'agissait de savoir quelle est la cause des troubles qui se produisent dans l'organisme à de grandes hauteurs (1). Il faut, comme on sait, pour amener le bon fonctionnement de la machine humaine, que la quantité d'oxygène qui pénètre dans les poumons et dans le sang reste sensiblement constante; mais, quand la pression de l'air duquel nous vivons varie, le volume d'oxygène qui tend à passer dans le sang varie lui-même. Pression plus forte, excès d'oxygène; pression plus faible, pénurie d'oxygène. Le mal des montagnes, le mal des aérostats n'a pas d'autre origine que le manque d'oxygène par diminution de pression. Pour maintenir l'économie dans son état normal, il faut respirer de l'air dont la

(1) De Parville. *Causeries scientifiques*.

richesse en oxygène varie avec la pression barométrique et croisse au fur et à mesure que la pression diminue.

M. Paul Bert qui, le premier, formula aussi nettement la solution du problème, le premier aussi l'a soumise au contrôle de l'expérience. Il s'est enfermé à la Sorbonne dans une grande chambre métallique parfaitement étanche ; des pompes enlevaient l'air progressivement. En une demi-heure, la pression de l'air avait baissé de 760 millimètres à 450 millimètres ; pendant une heure environ, l'expérimentateur se maintint entre 450 et 408 millimètres. C'est une pression correspondante à celle que marque le baromètre à des hauteurs de 4,100 mètres à 5,100 mètres.

A 450 millimètres, M. Bert commença à éprouver les symptômes du mal des montagnes ; au moment où il atteignait une dépression correspondante au niveau du mont Blanc, il lui fut impossible, ayant compté ses pulsations, de multiplier par 3 le nombre trouvé. La jambe droite fut prise de tremblements qui s'étendirent bientôt à la jambe gauche ; le malaise augmentait. M. Paul Bert eut recours alors à un ballonnet plein d'oxygène et fit une inspiration, puis une seconde. A chaque inspiration le malaise disparaissait ; mais l'action de l'oxygène pur était trop énergique, et, prolongée, elle accusait des étourdissements.

Il recommença son expérience avec des mélanges d'air oxygéné ; il parvint sans malaise, grâce à des inspirations de ce mélange, à la pression correspondante à la hauteur la plus élevée des pics terrestres, le Gaourichniko.

Malgré ces expériences, il était utile d'entreprendre une expérience directe et d'aller sur place vérifier les résultats du laboratoire.

MM. Crocé-Spinelli et Sivel, avant de faire leur ascension, s'enfermèrent dans l'appareil de M. Paul Bert, et, amenés jusqu'à la pression de 300 millimètres, ils faisaient disparaître momentanément tout malaise par des inspirations d'oxygène. A un moment où M. Spinelli était devenu aveugle, l'oxygène lui rendit soudain la vue. Ainsi préparés, les deux explorateurs tentèrent l'aventure. M. Paul Bert leur donna deux ballonnets l'un à 40 pour 100, l'autre à 75 pour 100 d'oxygène.

Leur aréostat, *l'Étoile polaire*, partit de l'usine à gaz de La Villette, à onze heures trente-cinq minutes. En quelques minutes, il atteignait une hauteur de 1,500 mètres et se perdait dans une couche de nuages d'environ 300 mètres ; il continua à monter jusqu'à 4,800 mètres très régulièrement ; au delà, le rayonnement solaire donna à l'ascension une grande irrégularité. Les voyageurs restèrent une heure quarante-cinq minutes au-dessus de 5,000 mètres, vingt minutes au-dessus de 7,000 mètres et finirent par atteindre 7,400 mètres. Ils descendirent

ensuite avec une rapidité assez grande, mais non excessive de 3 à 4 mètres par seconde, le ballon faisant parachute. Le vent était très violent à terre ; cependant la descente fut exempte d'accidents.

Le point qu'il s'agissait surtout d'éclaircir dans l'ascension de MM. Sivel et Spinelli était élucidé. Les malaises disparaissaient à chaque inspiration de l'oxygène ; ils étaient même gais après une dizaine d'inspirations, et conservaient toute leur présence d'esprit. Ainsi, ils remarquèrent que si quelques physiiciens ont avancé que le ciel se montrait à ces hauteurs d'un bleu noir, cela devait dépendre de l'affaiblissement de leur vue.

M. Glaisher avait bien raison de dire, en 1863 :

« Je ne doute pas qu'on ne parvienne à faire des observations dans ces régions où je n'ai pu arriver sans m'évanouir. Ce n'est pas moi qui terminerai la limite de l'activité humaine ! »

La science a ses martyrs. Le 17 avril 1875, MM. Crocé-Spinelli et Sivel, recommençant avec M. Tissandier leur ascension à de grandes hauteurs, sont morts victimes de leur amour pour la science. Tout le monde se rappelle cette catastrophe du *Zénith*, à laquelle échappa seul M. Tissandier. Une souscription nationale a permis d'élever un tombeau à ces deux nobles et courageux jeunes hommes.

**ASCENSION D'UN BALLON.** — Tous les ballons sont gonflés aujourd'hui avec de l'hydrogène, quoique un célèbre aéronaute français, M. E. Godard, préfère encore les *montgolfières*, et en ait construit une immense appelée l'*Aigle*. Il substitue une éponge imbibée d'alcool au combustible encombrant et dangereux de la paille ou de la laine hachée ; il a, plus tard, adopté au foyer une cheminée surmontée d'une toile métallique qui écarte tout danger d'incendie. On a parlé aussi de se servir de lampes à pétrole, dont on peut à volonté, modérer ou activer la vivacité. N. J. Silbermann a fait sur ce sujet des recherches intéressantes.

Dans les villes, on se sert généralement du gaz d'éclairage, carbure d'hydrogène, dont la densité est assez grande, 0,63 de celle de l'air. Dans ce cas, on fait communiquer l'orifice inférieur du ballon, au moyen d'un tuyau, avec l'usine à gaz. Cependant, un aéronaute anglais, M. Green, décarburait, par un procédé spécial, le gaz d'éclairage et obtenait un gaz plus léger. M. Glaisher recommande le gaz obtenu vers la fin des opérations de distillation.

Quand on emploie de l'hydrogène pur, dont la densité est quatorze fois inférieure à celle de l'air, on peut réduire de beaucoup les dimensions de l'aérostat.

L'hydrogène s'obtient alors en plaçant dans un certain nombre de tonneaux, rangés autour d'un gros tonneau central, défoncé à sa partie inférieure et plongé dans une grande cuve pleine d'eau, de l'eau et de l'acide sulfurique, avec des fragments de zinc et de fer. Tous les tonneaux communiquent avec le tonneau central : le gaz formé dans leur intérieur par la réaction de l'acide sulfurique sur le zinc ou le fer se rend donc au tonneau central, dépose dans l'eau de la cuve l'acide sulfureux qui s'était produit en même temps que l'hydrogène, et qui serait de nature à compromettre la solidité de l'enveloppe ; puis il s'échappe par un long conduit aboutissant au ballon, et gonfle celui-ci.

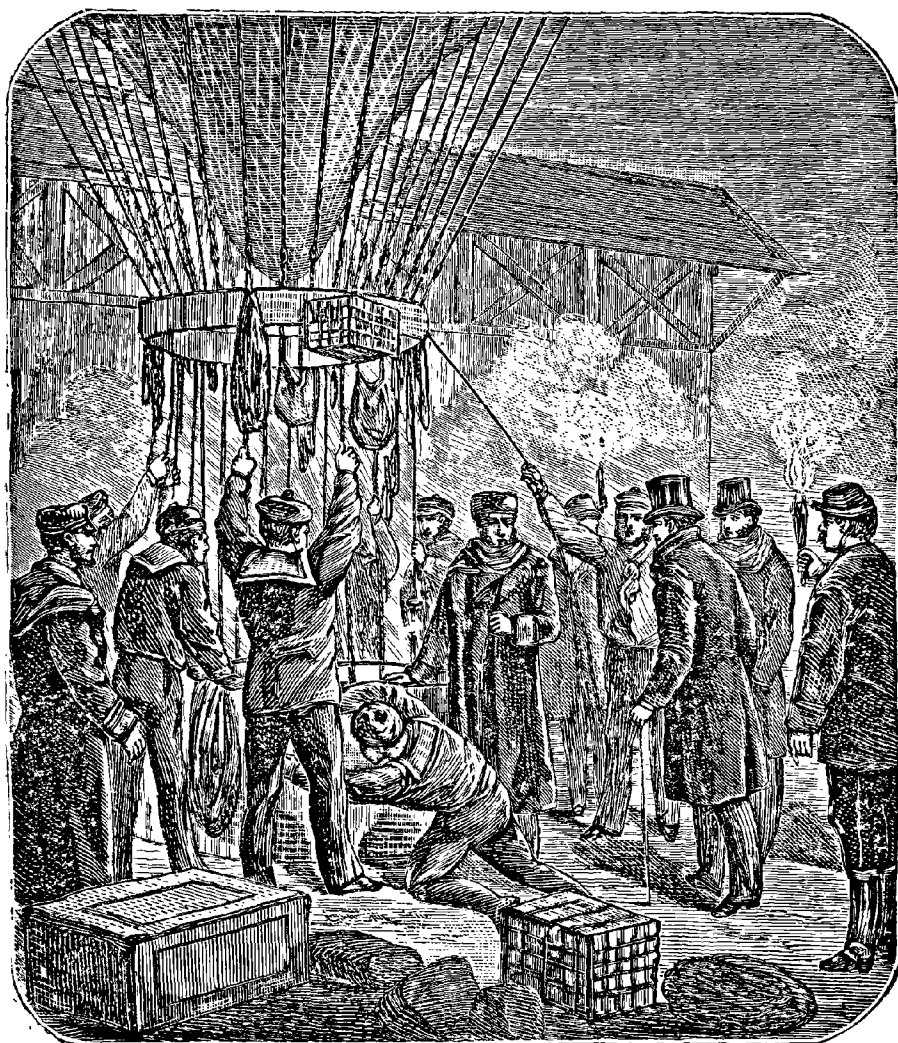
On a soin de ne remplir l'aérostat qu'aux trois quarts environ de sa capacité. Les couches atmosphériques étant de moins en moins denses à mesure que l'on s'élève, la pression sur les parois sera conséquemment moins forte, l'hydrogène se dilatera de plus en plus, et ferait éclater l'enveloppe si, entièrement remplie au départ, elle ne laissait pas de place pour la dilatation du gaz.

Une soupape, inventée dès 1783 par le physicien Charles et placée à la partie supérieure du ballon, permet à l'aéronaute, au moyen d'une longue corde, de laisser échapper du gaz ; un volume d'air égal au volume de gaz remplace celui-ci ; l'appareil devient donc plus lourd et, conséquemment, il descend peu à peu. Pour remonter, le moyen imaginé également par Charles consiste à vider des sacs de sable, *lest* que le voyageur a eu le soin de placer dans la nacelle avant de partir. L'appareil, devenu plus léger, remonte aussitôt. Quand on veut descendre définitivement et prendre terre, on emploie une corde nommée *guide-rope*, munie de nœuds, qui pend au-dessous de la nacelle, et dont la longueur est d'une cinquantaine de mètres. A mesure quelle se déroule et touche le sol, le poids du ballon se trouvant diminué, celui-ci remonte, et la rapidité de la chute est diminuée. Alors une ou deux ancrs accrochent quelque aspérité du sol et arrêtent l'aérostat.

Dans les expéditions scientifiques, les instruments à emporter sont une des plus graves préoccupations du voyageur. Ce n'est qu'après de longs tâtonnements que M. Glaisher a pu parvenir à établir son matériel d'une manière convenable pour des expériences qui, faites dans les hautes régions, présentent des difficultés tout autres que celles qui sont faites dans un observatoire. Le savant aéronaute donne la liste des instruments dont il se chargeait. C'étaient : 1° thermomètre à boule sèche et à boule humide conjugués ; 2° hygromètre de Daniell ; 3° baromètre à mercure ; 4° thermomètre à boule noircie exposée à l'action des rayons solaires ; 5° couple de thermomètre sec et de thermomètre humide en con-



nexion avec un aspirateur ; 6° thermomètre à boule noircie renfermé dans un tube en cristal privé d'air et exposé aux rayons du soleil ; 7° baromètre métallique ; 8° thermomètre excessivement sensible avec une boule



Départ de M. Janssen (page 382).

en forme de gril ; 9° hygromètre de Regnault ; 10° petite bouteille d'eau distillée ; 11° chronomètre ; 12° boussole ; 13° bouteille d'éther pour l'usage de l'hygromètre Regnault ; 14° loupe pour lire les instruments ; 15° aspirateur ou soufflet disposé de manière à pouvoir marcher avec le pied ;

PHYS. ET CHIM. POPUL.

Livr. 48.

16° aimant qui sert à mettre en mouvement l'aiguille de la boussole ; 17° indice thermométrique ; 18° jumelle.

Tous ces instruments sont attachés avec des ficelles que l'on peut couper immédiatement, ou à des écrous, et sont installés sur une table. A mesure que l'on enlève les instruments de la table, on les jette pêle-mêle dans un panier garni de matières d'emballage, et, à moins de circonstances extraordinaires, ils ne sauraient être brisés.

Nous verrons, en poursuivant notre étude, les observations auxquelles sont employés chacun de ces instruments.

**IMPRESSIONS D'UN AÉRONAUTE.** — « Les impressions personnelles, dit M. C. Flammarion, le hardi aéronaute et le spirituel savant que l'on connaît, me paraissent être ici, comme en bien des sujets d'étude, les plus sûres et les plus faciles à analyser. Les sensations que nous éprouvons nous-mêmes vont plus directement d'une âme à une autre que les théories et les considérations générales. »

C'est pourquoi nous croyons devoir présenter au lecteur quelques extraits du récit qu'il a fait dans les *Voyages aériens* de sa première ascension :

« L'instant du départ, dit-il, a quelque chose de solennel. Au milieu des amis qui sont venus assister à votre premier départ, sous les regards qui vous suivent, vous vous élevez lentement, majestueusement dans l'espace. C'est déjà là une première sensation unique, toute nouvelle et très singulière.

» Le mouvement qui nous emporte est complètement *insensible* pour nous ; mais nous *savons* que nous nous élevons, car progressivement Paris s'agrandit au-dessous de nous, et bientôt notre vue l'embrasse dans son entier, encadré des verdoyantes campagnes qui l'entourent. Nous jetons un dernier regard, nous adressons un dernier signe aux yeux qui nous cherchent, et dont quelques-uns, trop sensibles pour une situation aussi simple, ne nous distinguent plus qu'à travers le voile des larmes invisibles, et nous cherchons nous-mêmes à définir les sensations nouvelles qui nous agitent.

» *Que c'est beau ! que c'est beau !* C'est la première exclamation qui s'échappe de nos lèvres.

» Nulle description ne saurait rendre la merveilleuse magnificence d'un tel panorama. La plus ravissante, la plus grandiose scène de la nature, vue du haut d'une montagne, n'approche pas de la beauté de cette même nature vue perpendiculairement de l'espace. Là seulement l'homme s'aperçoit que la terre est belle, que la vie de la nature est grande, que

l'air enveloppe ce monde d'un rayonnement de vie, que la création est une immense harmonie...

» La première impression qui domine est une sensation de bien-être tout nouveau, à laquelle s'ajoute la vaniteuse petite joie de se voir au-dessus du reste des autres hommes, et le plaisir d'admirer un spectacle toujours magnifique. Quant au mouvement, il est *absolument insensible*. Nous nous croyons *immobiles* ; la terre *descend* au-dessous de nous ; le groupe de nos amis diminue, et leurs adieux n'arrivent que plus faiblement ; ils sont bientôt couverts par la voix colossale de Paris, qui domine tout d'un brouhaha gigantesque. La populeuse cité développe sous nos yeux ses mille toits, ses coupes, ses édifices, ses jardins, ses boulevards, sa ceinture extérieure, ses campagnes environnantes ; c'est un spectacle féérique devant lequel s'éclipsent les *Mille et une Nuits*.

» Les œuvres humaines s'effacent vite dans une telle contemplation. Les palais élevés, les basiliques séculaires, les hautes coupes, les clochers de pierre qui perçaient le ciel de leurs délicates broderies, se sont abaissés au niveau du sol ; Notre-Dame, dont le portail nous saisissait d'admiration ; l'Arc-de-Triomphe, colosse de pierre qui veille au couchant de la grande ville ; le Louvre, assis au bord du fleuve ; les dernières tours que le temps a laissées debout ; toutes les splendeurs de l'architecture s'humilient devant le ciel. La première ville de l'Europe, la capitale de la terre, Paris, s'est réduite pour nous aux dimensions des plans en relief que l'on voit au musée des Invalides. Vers le haut, toutes les perspectives sont changées. Les vastes avenues et les grands parcs sont devenus de minces allées et de petits jardins. Nous traversons un modeste filet d'eau qu'on appelle la Seine. Quelques points de vue descendent même au grotesque. Au delà du Louvre, la tour Saint-Germain-l'Auxerrois, flanquée de l'église et de la mairie, ressemblait assez bien à un huilier. Les promeneurs, les omnibus ont revêtu le bizarre effet raccourci si spirituellement dessiné par le caricaturiste Grandville. Au départ, le Napoléon de la colonne Vendôme et le Génie de la Bastille nous ont semblé posés sur un piédestal plus gros en haut qu'en bas. Mais bientôt l'ascension a aplani les statues au niveau du sol et nous a montré que, en effet, la gloire n'est que l'égalité du néant. Comme tout change vu d'en haut !

» Je comprends l'exaltation des inventeurs de l'aérostation et des premiers aéronautes lorsqu'ils se virent transportés au-dessus de la terre, et contemplèrent l'admirable champ de la nature déployé pour la première fois sous l'œil victorieux de l'humanité.

» Ainsi, la première impression qui domine, c'est en quelque sorte la *sensation de l'immobilité*, par opposition à l'idée qu'on se fait d'avance

de sentir un grand mouvement à travers l'air. La seconde, c'est le ravissement du spectacle inattendu et sans précédent que l'on a tout à coup déployé sous le regard. Une troisième impression qui vient bientôt succéder aux deux premières, c'est un doute sur la solidité absolue du navire aérien... Réflexion dont on reconnaît vite l'invraisemblance. Physiquement parlant, l'aérostat est aussi solide dans l'air que la pierre sur le sol...

» Dépassant Paris et sortant du bruit immense, l'aérostat s'enfonce dans les profondeurs de l'atmosphère. Notre esprit se souvient du chant du poète adressé à l'aéroscape du siècle futur.

Superbe, il plane avec un hymne en ses agrès ;  
 Et l'on croit voir passer la strophe du progrès.  
 Il est la nef, il est le phare !  
 L'homme enfin prend son sceptre et jette son bâton,  
 Et l'on voit s'envoler le calcul de Newton  
 Monté sur l'ode de Pindare.  
 Il invente une route obscure dans les nuits ;  
 Le silence hideux de ces lieux inouïs  
 N'arrête point ce globe en marche ;  
 Il passe, portant l'homme et l'univers en lui !...

» Paris s'est éloigné. Nous planons maintenant au-dessus de plaines verdoyantes, délicatement nuancées. Les moindres objets se dessinent avec une netteté remarquable. Mais, à cette heure, une brume très légère s'étend comme un voile transparent sur la campagne ; ce voile est plus épais vers l'ouest. Sous cette gaze légère, la nature chante. Quelques oiseaux, parmi lesquels nous distinguons l'alouette, murmurent leurs notes du soir. Le bruissement des cri-cri forme le fond de la mélodie. Les grenouilles jettent au loin leur aigre coassement...

» Nous traversons l'air silencieux avec une grande lenteur : 220 mètres par minute ou 3 mètres et demi par seconde. Au sein de l'immense paix qui nous environne, l'aérostat, avec ses cordages tendus, semblé, porté par le souffle aérien, une vaste lyre que des sylphes invisibles transportent au sein des cieux étonnés. On voit l'ombre du navire aérien flotter sur les prés, les champs et les bois. Plus tard notre ombre s'éloigne à mesure que le soleil descend, jusqu'au moment où le soleil et l'aérostat, se trouvant sur une ligne horizontale, ne permettent plus d'ombre, et où même le soleil descendant au-dessous de nous projettera *notre ombre en haut*. Il faut être en ballon pour ne plus voir son ombre à ses pieds, mais à sa tête...

» Le bonheur du voyage aérien ressemble à celui qu'on éprouve en rêve lorsqu'on se sent emporté dans les airs. Cette coïncidence m'a frappé. Seulement, *on ne sent pas assez qu'on vole*; on voudrait aller plus vite ou du moins sentir que l'on va vite. Il y a enfin une légère inquiétude qui trouble la tranquillité, et sans laquelle le bonheur serait complet. La petite nacelle d'osier crie au moindre mouvement que nous faisons, et nous nous demandons involontairement si elle va défoncer ou si les cordes qui la soutiennent ne pourraient nous causer la surprise de casser un peu. En outre, elle oscille quand on remue et produit un balancement quelquefois désagréable quand on se rappelle que l'on est suspendu à plusieurs centaines de mètres au-dessus de la terre ferme. Le simple raisonnement suffit pour faire comprendre que le danger est réellement apparent; mais il n'en est pas moins vrai que la première ascension produit toujours une certaine émotion inséparable d'un premier début. Sans cette préoccupation, il n'y aurait pas au monde de locomotion comparable à celle de l'air.

» En terminant cette première relation d'un premier voyage aérien, je ne puis m'empêcher, tant est profonde cette impression soudaine d'un aussi singulier spectacle, de me souvenir encore de l'aéroscaphe de la *Légende des Siècles* :

Char merveilleux ! Son nom est délivrance ! Il court,  
Près de lui le ramier est lent, le flocon lourd ;  
Le daim, l'épervier, la panthère  
Sont encor là, qu'au loin son ombre a déjà fui ;  
Et la locomotive est reptile, et sous lui  
L'hydre de flamme est ver de terre.  
Nef magique et suprême ! Elle a, rien qu'en marchant,  
Changé le cri terrestre en pur et joyeux chant,  
Rajeuni les races flétries...  
Oh ! chacun de ses pas conquiert l'illimité !  
Elle est la joie, elle est la paix ! — L'humanité  
A trouvé son organe immense ! »

**VOYAGE DE M. JANSSEN.** — En terminant le chapitre consacré à l'*aérostation*, nous devons rappeler que les aérostats, invention française, ont encore reçu de nous, en 1870, leur première et glorieuse application, en dépit des infâmes rigueurs et des menaces d'un ennemi impitoyable. Il est bon de conserver les paroles avec lesquelles, à l'Académie des sciences, M. Dumas annonçait le départ d'un de nos astronomes, allant, malgré les Prussiens, observer un fait scientifique.

« Une éclipse de soleil, totale pour une partie de l'Algérie, dit

M. Dumas, aura lieu le 22 décembre (1870). M. Janssen, si célèbre par les belles découvertes qu'il a effectuées dans l'Inde à l'occasion de l'éclipse de 1868 a réclamé de nouveau pour compléter ses observations, le patronage et le concours du Bureau des longitudes et de l'Académie, qui, avec l'autorisation de M. le ministre de l'instruction publique, se sont empressés de les lui accorder.

» M. Janssen est parti de Paris vendredi à cinq heures du matin, par un ballon spécial, le *Volta*. L'administration avait bien voulu le mettre entièrement à sa disposition; cet appareil n'emportait que le savant, les instruments de la science, et le marin chargé de la manœuvre.

» Notre confrère, M. Charles Deville, et moi, nous assistions au départ de M. Janssen, soit pour l'aider dans ses derniers apprêts, soit pour lui donner une preuve de plus de l'intérêt que l'Académie porte à ses travaux. L'ascension, grâce aux précautions minutieuses de M. Godard aîné, s'est accomplie dans les meilleures conditions, et la direction excellente prise par l'aérostat doit faire espérer le succès d'une expédition que menacent, il est vrai, des périls de plus d'un genre.

» Les secrétaires perpétuels de l'Académie, il est utile de le déclarer publiquement, se portant garants du caractère absolument scientifique de l'expédition et de la parfaite loyauté de M. Janssen, l'ont recommandé officiellement à la protection et à la bienveillance des autorités et des amis de la science, en quelque lieu que les chances du voyage l'aient dirigé. Il fut un temps où ce témoignage aurait suffi pour lui assurer un accueil chevaleresque dans les lignes ennemies. On nous a appris le doute sur ce point; aussi chacun a-t-il compris que des rigueurs et des menaces, non justifiées par les lois de la guerre, aient fait à M. Janssen comme un devoir de compter sur son propre courage et non sur la générosité d'autrui. Je suis cependant au milieu de témoins qui peuvent attester qu'en pleine guerre, en 1813, Davy, un Anglais, reçut dans ce palais même l'hospitalité de la France, comme un hommage rendu au génie et aux droits supérieurs de la civilisation.

» En suivant du regard notre digne missionnaire dans l'espace où il se perdait peu à peu, j'ai senti ce souvenir se réveiller, et se renouveler en moi le besoin de protester, soit au nom de la science, soit au nom des principes eux-mêmes, contre tout empêchement qui pourrait être mis à son expédition.

» La décision prise par le comte de Bismarck de renvoyer devant un conseil de guerre les personnes qui, montées dans les ballons, essayent, sans autorisation préalable, de franchir les lignes ennemies, intéresse donc l'Académie. Elle ne saurait accepter que des opérations de guerre

soient punissables parce qu'elles reposent sur des principes scientifiques nouveaux; que l'homme dévoué qui, dans l'intérêt de la science, passe au-dessus des lignes prussiennes, soit coupable de manœuvre illicite, et qu'en donnant nos soins à l'aéronautique, nous ayons contribué nous-mêmes à fabriquer des engins de guerre prohibés.

» Comment! les voies de terre, de fer et d'eau sont interdites, la voie de l'air nous restait seule, inconstante et douteuse; elle n'avait jamais été pratiquée; quoi de plus légitime que son emploi? Nous l'avons conquise par des procédés méthodiques, et si elle fonctionne régulièrement, où est le délit?

» Que l'ennemi détruise, s'il le peut, nos ballons au passage; qu'il s'empare de nos aéronautes au moment où ils touchent la terre, soit; c'est son intérêt, c'est la loi de la guerre. Mais que les personnes tombant ainsi entre ses mains soient livrées à une cour martiale, au loin, en pays ennemi, comme des criminels, c'est un abus de la force...

» Le développement de cette question du droit des gens n'est pas de la compétence de cette Académie; il appartient à l'Académie des sciences morales et politiques, et je n'ajoute qu'un dernier mot.

» Dans Syracuse assiégée, Archimède opposait aussi aux efforts de l'ennemi toutes les ressources de la science de son temps; il rendait pour les Romains l'attaque de plus en plus meurtrière. Marcellus, loin de lui faire un crime d'avoir prolongé la défense par ses inventions, ordonna au contraire que la vie de ce grand homme fût respectée, et, plein de regret pour sa mort fortuite, il entoura sa famille des plus grands égards.

» Deux mille ans se sont écoulés, et cependant, si nous possédions un nouvel Archimède aujourd'hui, pour avoir créé de nouvelles combinaisons de guerre, peut-être se verrait-il soumis sans pitié aux rigueurs d'une cour martiale arbitraire, si son pays était trahi par la fortune.

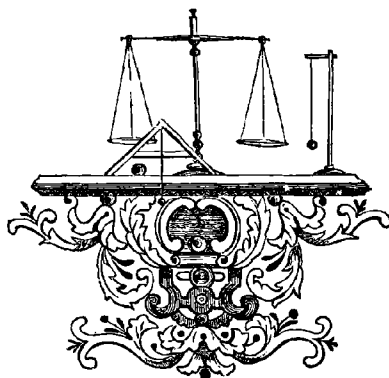
» N'hésitons pas à le dire: en face de telles menaces, ceux d'entre nous que la construction des ballons occupe, ceux que l'Académie envoie en mission dans l'intérêt de la science, n'en sont point ébranlés; et si la défense de Paris manquait d'aéronautes, elle trouverait toujours dans cette enceinte même, autour d'elle, des mains exercées et des âmes fermes pour diriger ces patriotiques expéditions. » (*Nombreux applaudissements.*)

Malgré M. de Bismarck, le savant et courageux M. Janssen traversa les lignes prussiennes et put se rendre à Oran, où il avait l'intention de se livrer à ses observations. Malheureusement, un temps exceptionnellement mauvais ne lui permit pas de retirer de son périlleux voyage les fruits qu'il devait en attendre.

**LES BALLONS DU SIÈGE DE PARIS.** — Nous voulons citer quelques-uns des hardis aéronautes qui, en 1870, ont rendu de si glorieux services au pays. Le premier d'entre eux fut M. Durnof, qui partit le 23 septembre 1870; MM. Eugène Godard, G. Tissandier le suivirent quelques jours après, emportant tous d'innombrables dépêches. Le 7 octobre, M. Gambetta sortit de Paris, puis M. de Kératry, malgré les projectiles prussiens. Le 24 octobre, M. Rollier et un voyageur s'enlèvent de la gare du Nord, et, après plusieurs jours passés au-dessus de l'Océan, vont enfin atterrir en Norvège. De nombreux sinistres eurent lieu en novembre; le marin Prince s'élève seul le 30 de ce mois : on ne le revit jamais ! Le même jour, MM. Martin et Ducauroy atterrissent, par un hasard providentiel, à Belle-Ile-en-Mer. Le 27 janvier 1871, l'aéronaute Lacaze part; on l'aperçoit à La Rochelle, puis il disparaît dans les profondeurs de l'Océan!...

C'était le soixante-troisième aéronaute sorti de Paris. Le soixante-quatrième ballon, *le Général Cambronne*, s'élevait le lendemain, le dernier de tous, allant annoncer à la France la signature de l'armistice.

Sur ces soixante-quatre ballons, cinq avaient été faits prisonniers par l'ennemi; les deux que nous avons cités s'étaient perdus; plus de trois millions de lettres avaient été emportées par eux.

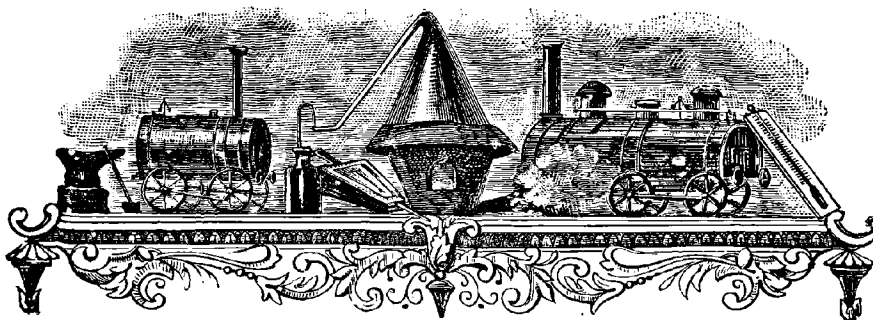




PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES







## LIVRE III

### CHALEUR

#### CHAPITRE PREMIER

##### PRINCIPES GÉNÉRAUX

**HYPOTHÈSES SUR LA NATURE DE LA CHALEUR.** — Le *feu*, ce développement simultané de *chaleur* et de *lumière* produit par la combustion de certains corps, et qui n'est autre chose qu'un degré plus élevé de température que celui de la chaleur sans lumière, a, de tout temps, provoqué une sorte de vénération de la part du genre humain. Tous les peuples primitifs l'ont divinisé. Les Perses regardaient le culte du feu comme la partie fondamentale de leur religion ; et, de nos jours encore, une partie de leurs descendants, les *Guèbres* ou *Parsis*, adorent le soleil comme l'image de la divinité et le type du feu le plus pur, selon les prescriptions retracées avec détail dans le *Zend-Avesta*, évangile écrit par Zoroastre, le fondateur de leur religion. Les annales chinoises nous ont conservé le nom de Soui-Gin-Chi, qui apprit aux premiers hommes l'art de créer le feu par le frottement de deux branches. En Amérique, lors de la conquête, tous les peuples sauvages adoraient le soleil : au Mexique, ce culte était sanguinaire ; mais au Pérou, les Incas, rois descendants de Manco-Capac, le législateur des Péruviens, prétendaient être comme lui les fils et petits-fils du Soleil, gouverner les hommes au nom de ce dieu, et, comme cet astre, leur gouvernement, plein de douceur, se manifestait surtout par des bienfaits. Dans l'antiquité grecque et romaine, le grand tragique Eschyle

célèbre, dans ses chants sublimes, Prométhée, qui déroba au ciel le secret de faire du feu et le communiqua aux hommes, et le feu sacré qu'entretenaient sans cesse, à Rome, les Vestales, et les Grecs dans le temple de Delphes, ainsi que le culte de Vulcain, rappelaient cette universelle déification du feu.

Les hommes graves, qui n'ajoutaient guère foi aux fables religieuses, conservaient néanmoins pour cet *élément* une admiration profonde. Pline qui, dans son immense compilation, a résumé toutes les opinions des savants de son siècle, dit qu' « il faut considérer avec admiration qu'il n'est presque rien où le feu n'intervienne. Le feu, dit-il, reçoit des sables, et il rend ici du verre, là de l'argent, ailleurs du minium, ailleurs le plomb et ses variétés, ailleurs des substances colorantes, ailleurs des médicaments. Par le feu, les pierres se résolvent en cuivre; par le feu, le fer est produit et dompté; par le feu, l'or est purifié; par le feu est calcinée la pierre qui va, en ciment, assurer la solidité de nos demeures... Les feux ont aussi une vertu médicinale. Dans les maladies pestilentielles qui proviennent de l'obscurcissement du soleil, il est certain que les feux allumés sont d'un secours très varié : Empédocle et Hippocrate l'ont prouvé dans divers lieux. Le feu soulage dans les convulsions ou les contusions des viscères... »

« Il n'est pas étonnant, dit-il dans un autre passage, que des formes monstrueuses d'hommes et d'animaux se produisent vers l'extrémité de l'Éthiopie; car ce pays est le pays du feu, et le feu, élément mobile, est l'artisan de la configuration du corps et de la ciselure des formes. C'est pourquoi, au fond de la partie orientale de cette région sont des peuples sans nez, dont toute la face est plane; d'autres sans lèvre supérieure; d'autres sans langue; quelques-uns, ayant la bouche close et privés de narines, ne respirent que par un pertuis qui sert aussi de passage à la boisson, aspirée à l'aide d'un tuyau d'avoine, et à la nourriture, consistant en grains de la même plante qui croît spontanément... »

De cette admiration de tous les hommes pour le feu découla nécessairement, dès les premiers âges, le désir de connaître l'origine de cet élément, la cause de cette *chaleur*. Par une propension inhérente à sa nature, l'intelligence humaine, en présence des phénomènes du monde extérieur, se demande : Qu'est-ce que cela? Et peu à peu, comme l'a fait remarquer M. John Tyndall, il est devenu manifeste que ce besoin de savoir n'est pas une vaine et impuissante curiosité : après de nombreux essais, on est arrivé à la conviction que de telles questions ne sont pas absolument au-dessus de l'intelligence humaine; que l'homme peut, dans une certaine mesure, pénétrer le secret de l'univers; que ses fonctions

mentales ne sont pas bornées aux perceptions des cinq sens; que les choses visibles du monde matériel sont commandées, dans leurs actions, par des choses invisibles; qu'en un mot, au delà des phénomènes qui frappent les sens, il y a des lois, des principes et des faits qui s'adressent uniquement à l'esprit et que l'esprit peut seul discerner.

Mais, comme nous l'avons fait observer déjà (page 10), pour trouver ces lois, ces principes et ces faits, il est nécessaire de bien connaître les phénomènes dont on recherche les causes; et les philosophes, s'appuyant exclusivement sur des considérations métaphysiques, sur certaines idées générales, posaient une suite de principes rationnels et voulaient prévoir, d'après ces principes, les phénomènes, en passant de la cause à l'effet. Avant de chercher les lois de la chaleur, ils voulaient savoir ce qu'est la chaleur. Aussi toutes leurs hypothèses ont été successivement rejetées.

Il faut avouer que, de nos jours encore, quant à la nature intime de la chaleur, nous en sommes réduits à de simples conjectures. Mais comme, depuis Galilée, nous observons d'abord les phénomènes avec le plus grand soin, nous mesurons, nous comptons, nous pesons ce que nous voyons afin de bien connaître les rapports numériques des choses; que nous imaginons des expériences, que nous inventons des instruments pour obtenir des résultats exacts, les lois que nous établissons aujourd'hui, quoiqu'elles puissent être renversées par une expérience future, sont fondées sur des bases assez solides pour que l'on puisse espérer d'être arrivé à la vérité et de ne point voir surgir cette expérience qui anéantirait nos théories.

Ainsi en est-il de l'hypothèse sur la cause de la *chaleur*, cause appelée *calorique*.

Aristote et les péripatéticiens définissaient la chaleur une qualité ou un accident qui réunit ou rassemble des matières homogènes, et qui dissocie ou sépare des matières hétérogènes. Les épicuriens la croyaient être une substance volatile du feu, émanée des corps ignés par un écoulement continu et réduite en atomes ronds très mobiles. Seul Héraclite et son école, se rapprochant des idées modernes, considéraient la chaleur ou le feu (*to pur*) comme une force.

Le moyen âge se bornait à répéter les opinions d'Aristote, c'est-à-dire à regarder la chaleur comme une qualité rigoureusement inhérente à un corps particulier, soit le feu lui-même, soit la partie invisible et volatile du feu. C'était, en un mot, quelque chose de *matériel*, que l'on ne pouvait ni créer ni détruire.

Au xvii<sup>e</sup> siècle, cette opinion prévalait encore chez un grand nom-

bre de physiciens. Boerhaave (1), Musschenbrœck, Homberg, Lémery (2), 'S Gravesande pensaient que le feu est une *matière* créée dès l'origine du monde, inaltérable dans sa nature, uniformément répandue dans toutes les parties de l'espace et formée d'une multitude de petits ballons comprimés qui cherchent à s'étendre de toutes parts. Ils cherchèrent à déterminer cette matérialité de la chaleur au moyen de la balance; mais, malgré des expériences nombreuses, entre autres celles de l'Académie *del Cimento* de Florence, jamais l'on n'est parvenu à la peser, et tout ce que l'on a écrit sur ce point est loin de pouvoir établir le poids de cet agent.

A la même époque, abandonnant l'hypothèse de la *chaleur-matière* pour revenir à la doctrine d'Héraclite de la *chaleur-mouvement*, d'autres physiciens, à la tête desquels il faut placer Bacon, Rumfort, Macquer (3), Scherer, prétendirent que la chaleur n'est autre chose qu'une modification des corps, une de leurs manières d'être, un simple mouvement excité dans leurs parties constituantes par une impulsion quelconque, que Rumfort attribue à un éther particulier. Montgolfier, Davy, Séguin aîné partageaient cette opinion.

Ce fut en 1842 seulement qu'un savant allemand, le docteur Mayer (4), fit paraître un mémoire, qu'il développa en 1845, en 1848 et en 1851, dans lequel il donnait la *théorie de la chaleur*, telle que nous la concevons aujourd'hui. En 1842 et 1843, M. Grove, reprenant les idées déjà exprimées par Berzélius, cherchait à établir que les quatre fluides incoercibles, « la chaleur, la lumière, l'électricité, le magnétisme, de même que l'affinité chimique et le mouvement, sont corrélatifs et dans une mutuelle dépendance; qu'aucun d'eux, dans un sens absolu, ne peut être

(1) BOERHAAVE (Hermann), célèbre médecin hollandais (1668-1738). Professeur à l'université de Leyde, il y occupait à la fois et avec un égal succès les chaires de médecine théorique, de médecine pratique, de botanique et de chimie, et devint recteur de l'université. C'est un des savants qui ont exercé la plus grande influence sur leur siècle. Comme médecin, ses travaux sont immenses, mais fort discutés. En chimie et en botanique, ses observations et ses découvertes sont précieuses. Il fut comblé d'honneurs pendant sa vie et fut agrégé à l'Académie des sciences de Paris et à la Société royale de Londres.

(2) LÉMERY (Nicolas), chimiste, né à Rouen (1645-1715). Le cours de chimie qu'il faisait lui avait valu une grande réputation, et il compta le grand Condé parmi ses élèves; mais, persécuté comme calviniste, il dut se réfugier en Angleterre, où Charles II l'accueillit fort bien (1683). Rentré en France trois ans plus tard, il abjura le protestantisme, exerça la médecine et devint membre de l'Académie des sciences. On lui doit plusieurs préparations pharmaceutiques.

(3) MACQUER (Pierre-Joseph), chimiste, né à Paris (1718-1784), professeur de pharmacie, membre de l'Académie des sciences. Il rédigea de 1768 à 1776, dans le *Journal des savants*, tout ce qui concerne les sciences naturelles.

(4) MAYER (Jules-Robert), médecin à Heilbronn (Wurtemberg), a pu, sans le secours d'aucun laboratoire, concevoir le premier la théorie moderne de la chaleur, et déduire de ses travaux les considérations les plus élevées sur la force en elle-même et sur la constitution des mondes. Ses travaux sont restés longtemps ignorés. Un dictionnaire biographique allemand avait avancé que le docteur Mayer était mort fou dans une maison de santé. Le fait est inexact.

dit la cause essentielle des autres, mais que chacun d'eux peut produire tous les autres ou se convertir en eux; ainsi la chaleur peut, médiatement ou immédiatement, produire l'électricité; l'électricité peut produire la chaleur, et ainsi des autres, chacun disparaissant à mesure que la force qu'il produit se développe. »

La route était ouverte : un grand nombre de physiiciens ont, depuis, suivi et élargi cette voie; parmi eux il faut citer, avec M. Regnault, le savant M. Tyndall (1) qui a résumé, dans un volume intitulé *la Chaleur considérée comme un mode de mouvement*, les observations et les expériences les plus concluantes sur ce sujet.

L'*hypothèse de l'émission* (c'est le nom donné à l'hypothèse de la chaleur-matière), dans laquelle le *calorique* est une matière invisible, impalpable, un fluide impondérable, incoercible, *émis* par les corps chauds dans toutes les directions, et qui, en abandonnant ces corps, ou en s'y accumulant, produit les phénomènes de chaleur et de froid, cette hypothèse est donc aujourd'hui à peu près abandonnée et remplacée par l'*hypothèse des ondulations*. Dans celle-ci, la chaleur est considérée comme le résultat d'un mouvement vibratoire perpétuel des molécules des corps, mouvement accéléré pendant l'échauffement, ralenti pendant le refroidissement, et transmis à d'autres corps sous forme d'ondulations, comme le son dans l'air, par l'intermédiaire d'un fluide très élastique, appelé *éther*, répandu dans tout l'espace, et même dans le vide.

**SOURCES DE CHALEUR.** — On nomme *source de chaleur* tout système susceptible d'échauffer l'air ambiant et les corps voisins sans que sa propre chaleur diminue, ou, en d'autres termes, un corps est une source de chaleur lorsque de la chaleur s'en dégage et que la perte de cette chaleur est à chaque instant réparée par une production nouvelle.

Cette question des sources de chaleur a toujours beaucoup préoccupé les savants, surtout au point de vue théorique. Il semble qu'il y a une sorte de création de chaleur, de force, ce qui est inadmissible, puisqu'il ne peut y avoir d'effet sans cause. Il fallait trouver quelle est la modification physique à laquelle est due l'apparition de la chaleur, quelle est la force qui se transforme en chaleur. Nous venons de dire que cette force est le mouvement. Ajoutons que cette théorie est arrivée déjà à un degré

(1) TYNDALL (John), savant anglais, membre de la Société royale de Londres, professeur de philosophie naturelle à la Royal Institution de la Grande-Bretagne, etc. Ses travaux relatifs à la chaleur et à l'électricité sont précieux. Il a exécuté aussi de courageuses excursions dans les Alpes, excursions dont il a rapporté de fécondes observations scientifiques. La plupart de ses ouvrages ont été traduits en français par M. l'abbé Moigno.

remarquable de précision et est une des plus belles découvertes de la physique moderne.

**CHALEUR SOLAIRE.** — La plus considérable des sources de chaleur, à la surface de la terre, est le rayonnement du soleil. Les recherches d'Herschel et de M. Pouillet nous ont fait connaître la dépense totale du soleil en ce qui concerne la chaleur qu'il émet, et nous pouvons, par le calcul, évaluer le montant de sa dépense en chaleur qui constitue la part des planètes de notre système. Des 2,300 millions de parties de lumière et de chaleur émises par le soleil, la terre en reçoit une seule. L'instrument, dû à M. Pouillet, avec lequel on peut mesurer la quantité de chaleur envoyée par le soleil sur la terre, s'appelle un *pyrhéliomètre* (du grec *pur*, feu ; *hélios*, soleil ; *métron*, mesure).

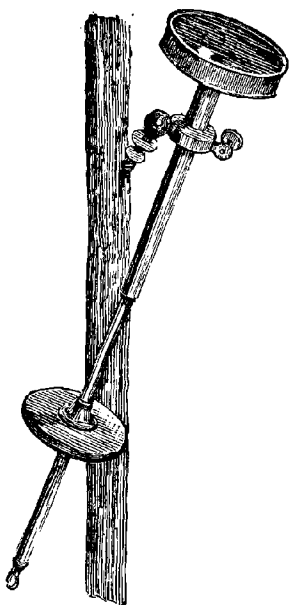


Fig. 200. — PYRHÉLIOMÈTRE.

Cet instrument (*fig. 200*) se compose d'un thermomètre dont le réservoir est enfermé dans une boîte en argent très mince remplie d'eau. Le tube du thermomètre sort de la boîte par une des faces, et il est maintenu dans un autre tube de cuivre qui porte une rainure, afin qu'on puisse voir la graduation. L'autre face de la boîte est noircie à la fumée; cette face doit être bien perpendiculaire à la direction du tube. On place l'instrument au soleil lorsqu'il n'y a pas de nuages, et on fait tourner la boîte de telle sorte que la face noire reçoive les rayons du soleil perpendiculairement. On observe l'élévation de la température pendant cinq minutes, on a alors un certain nombre de degrés pour cette élévation. On a déterminé combien il faut de *calories* (page 405) pour faire monter le thermomètre d'un degré : une simple multiplication donnera donc le nombre de calories gagné par l'instrument pendant les cinq minutes de l'expérience. Pour avoir la chaleur qui est arrivée réellement sur la face noire, il faut encore ajouter au nombre précédent la chaleur que perd l'appareil pendant cinq minutes, par l'effet de son rayonnement propre vers le ciel, car les espaces célestes exercent sur les corps terrestres une action refroidissante. On trouve la quantité à ajouter en faisant à l'ombre une observation analogue à la précédente sur le refroidissement.

On n'a pas encore ainsi toute la chaleur qui vient du soleil sur l'in-



strument; une partie a été absorbée par l'atmosphère. M. Pouillet a déterminé cette proportion en combinant un grand nombre d'observations, et il a pu calculer la quantité de chaleur qui arrive sur la terre en une année.



De nos jours encore, les Guèbres ou Parsis adorent le soleil (page 387).

Elle est tellement grande que l'on est obligé de renoncer aux unités ordinaires pour en donner une idée. Elle est capable de fondre une couche de glace de 30 mètres d'épaisseur qui envelopperait notre globe (1).

(1) A. Cazin. *La Chaleur*.

« Comment cette perte énorme est-elle réparée ? dit M. Tyndall. D'où vient la chaleur du soleil, et par quel moyen est-elle maintenue constante ? Aucune des combustions, aucune des affinités chimiques que nous connaissons ne serait apte à produire la température de la surface du soleil. En outre, si le soleil était simplement un corps en combustion, sa lumière et sa chaleur seraient assurément bientôt épuisées.

» En supposant qu'il fût un globe solide de charbon, sa combustion couvrirait au plus la dépense de 4,600 années. Il se consumerait lui-même dans ce temps relativement court. Quel agencement produit donc cette température si élevée et conserve au soleil son trop-plein de chaleur ?

» Un corps tombant et s'arrêtant brusquement développe, par son choc, une température proportionnelle au carré de la vitesse éteinte. Tombant sur la terre d'une très grande distance, la chaleur engendrée par son choc serait deux fois celle produite par la combustion d'un poids égal de charbon. Combien plus grande doit être la chaleur développée par un corps qui tombe sur le soleil !

» La vitesse maximum avec laquelle un corps peut choquer la terre est au plus de 12 kilomètres ; la vitesse maximum avec laquelle un corps peut choquer le soleil est de plus de 600 kilomètres par seconde. Un *astéroïde* (du grec *aster*, astre, *eidos* ; aspect, *étoiles filantes*), tombant sur le soleil avec cette vitesse maximum, engendrerait une chaleur égale à dix mille fois celle que ferait naître la combustion d'un poids de charbon égal au poids de l'astéroïde. Avons-nous quelque raison de croire que de semblables astéroïdes existent dans l'espace, et qu'ils puissent arriver à tomber sur le soleil en constituant une sorte de pluie de pierres ? Les *météorites* ou *étoiles filantes*, qui éclatent dans l'air, sont de petits corps planétaires déviés par l'attraction de la terre en entrant dans notre atmosphère avec une vitesse planétaire. Par le frottement contre l'air, ils s'échauffent jusqu'à l'incandescence et deviennent une source de lumière et de chaleur. Dans certaines saisons de l'année, ils pleuvent en très grand nombre. A Boston, on en a compté 240,000 en neuf heures. Nous n'avons aucun motif de supposer que le système planétaire est limité à de *grandes masses de poids* énormes ; nous avons, au contraire, toute raison de croire que l'espace est peuplé de petites masses obéissant aux mêmes lois que les grandes.

» Cette enveloppe qui entoure le soleil et que les astronomes désignent sous le nom de *lumière zodiacale* est probablement un amas de météores ; et parce qu'ils se meuvent dans un milieu résistant, ils doivent s'approcher continuellement du soleil. En tombant sur lui, ils contribueraient à produire la chaleur observée, et ils constitueraient une source

suffisante à réparer les pertes de chaleur subies annuellement par le soleil.

» Le soleil, dans cette hypothèse, deviendrait incessamment plus gros ; mais de combien s'augmenterait son diamètre ? Si notre lune venait à tomber sur le soleil, elle développerait une quantité de chaleur suffisante à couvrir les pertes d'une ou deux années ; et si notre terre, à son tour, tombait sur le soleil, elle couvrirait les pertes d'un siècle. Cependant les masses réunies de la lune et de la terre, si elles étaient uniformément réparties à la surface du soleil, disparaîtraient complètement. En réalité, la quantité de matière suffisante à produire l'approvisionnement du soleil en chaleur pendant toute la durée des temps historiques ne produirait pas d'augmentation appréciable du volume du soleil. L'accroissement de sa force attractive serait seul plus appréciable. »

**CHALEUR TERRESTRE, VOLCANS.** — Une autre source permanente de chaleur est notre globe lui-même. Un thermomètre descendu dans un puits de mine va en croissant d'environ un degré par 30 mètres. Si cette loi était exacte à toutes les profondeurs, l'eau serait réduite à l'état de vapeur à 3,000 mètres, si elle n'était pas comprimée ; mais, comme elle est soumise à une certaine pression, elle ne peut entrer en ébullition, quoique sa température soit supérieure à 100°, point d'ébullition de l'eau à la surface de la terre. Nous reviendrons sur ce phénomène. Il a été impossible de pénétrer à de grandes profondeurs, et conséquemment de faire des observations relatives à la température intérieure du globe ; mais il est probable que le noyau terrestre est formé par de la matière fluide excessivement chaude ; c'est elle qui sort par le cratère des volcans à l'état de lave incandescente.

**CHALEUR PRODUITE PAR LES ACTIONS CHIMIQUES.** — Les combinaisons chimiques forment une cause énergique de chaleur. On entend, en chimie, par le mot *combinaison*, l'action de deux corps qui s'unissent entre eux en vertu de leur affinité réciproque ; ainsi l'oxygène de l'air, en se réunissant à celui du fer, forme une *combinaison* appelée *rouille*. Or toute combinaison est accompagnée d'un dégagement de chaleur, inappréciable quand la combinaison se fait lentement, mais très intense, quelquefois même accompagné de lumière quand la combinaison se fait vivement.

Quand la combinaison est accompagnée de lumière et de chaleur, elle prend le nom de *combustion*. Ainsi la combinaison de l'oxygène de l'air ; corps *comburant*, avec le charbon de bois, corps *combustible*, ou avec le gaz de la houille, est une *combustion*. De la chaux vive se combinant avec de l'eau est une simple combinaison, produisant, comme

toutes les combinaisons, de la chaleur, mais ne produisant pas de lumière.

Le corps des animaux étant le siège d'une série de combinaisons chimiques, il s'en dégage, en conséquence, de la chaleur pendant la vie. Ce fut Lavoisier qui, le premier, montra que les animaux peuvent être assimilés à des machines vivantes. Quant l'animal est au repos, il y a équilibre entre la chaleur produite et celle qui se perd par échange avec l'extérieur : le corps reste donc à la même température. Quand il travaille,

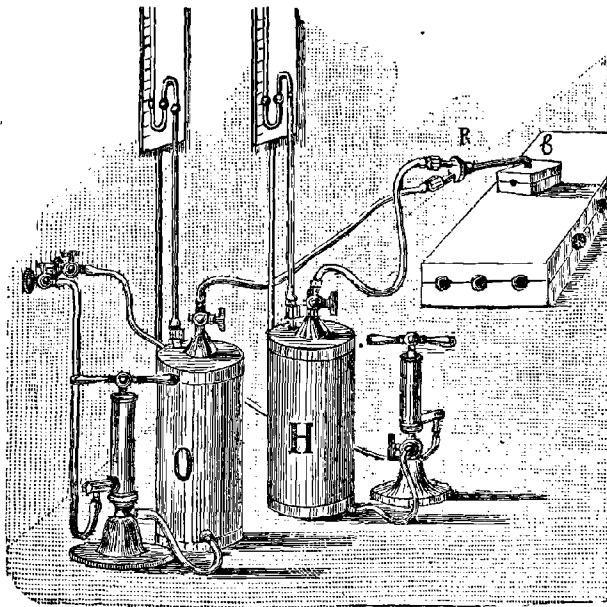


Fig. 201.

CHALUMEAU OXY-HYDROGÈNE DE M. SAINTE-CLAIRE-DEVILLE.

il perd de la chaleur, celle-ci se transforme en travail mécanique. Ceci a été démontré par une expérience de M. Hirn ; mais on peut le constater en plaçant un thermomètre le long du biceps brachial d'un homme. S'il contracte simplement ce muscle, il y a un dégagement de chaleur bien plus grand que s'il le contracte pour soulever un fardeau.

La cause de la chaleur développée dans les combinaisons chi-

miques est encore évidemment le mouvement, le travail effectué par les molécules des corps qui se combinent en obéissant à des forces attractives moléculaires. Dans le cas d'une décomposition, il faut surmonter l'affinité et séparer les molécules soumises à leur attraction ; il faut donc dépenser du travail pour produire une quantité de chaleur équivalente à ce travail. Aussi la fermentation donne naissance à un dégagement de chaleur ; les raisins foulés dans la cuve s'échauffent fortement, les foin

MM. Sainte-Claive-Deville (1) et Debray (2) en ont tiré parti pour obtenir la fusion en masse du platine, notamment pour l'opération métallurgique que nous avons citée (page 34). L'appareil qu'ils avaient imaginé est un chalumeau (*fig. 201*) formé de deux tubes partant, l'un du réservoir O où est renfermé l'oxygène, l'autre de celui H où est l'hydrogène. Ces deux tubes arrivent ensemble à un petit réservoir R où ils commencent à se mélanger. On allume le mélange gazeux quand il arrive au bec *b*, en platine; il brûle avec une flamme pâle excessivement chaude. Le jet est introduit dans un trou cylindrique étroit, percé au travers d'un

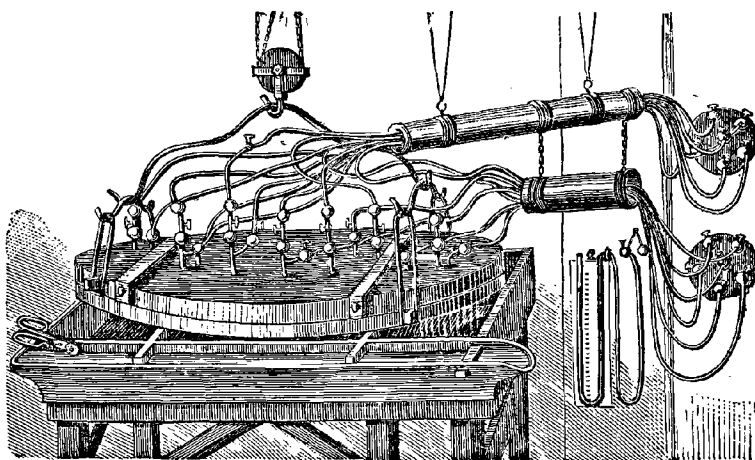


Fig. 202. — APPAREIL DE FUSION D'UN LINGOT DE PLATINE  
DE M. SAINTE-CLAIRE-DEVILLE.

bloc de chaux vive que l'on pose comme un couvercle sur un vase de chaux. Ce vase est percé de trous vers le bas afin de laisser échapper la vapeur d'eau qui provient de la combustion, et il enveloppe un creuset, également en chaux vive, qui contient le métal à fondre. Avec 120 litres d'hydrogène et 60 litres d'oxygène, on peut fondre 1 kilogramme de platine.

Dans l'opération importante de M. Sainte-Claire-Deville que nous citons, et qui avait pour but de fondre ensemble du platine et de l'iridium, ce qui exige une température égale de 2,000° pendant au moins 70 minutes, il y avait sept chalumeaux d'allumés à la fois, assemblés comme la gravure le représente (*fig. 202*). Le creuset de chaux était remplacé par du calcaire poreux de Saint-Waast.

(1) SAINTE-CLAIRE-DEVILLE (Henri), l'un des plus célèbres chimistes de notre époque, né à Saint-Thomas (Antilles) en 1818, membre de l'Académie des sciences, professeur de chimie à l'École normale et à la Faculté des sciences de Paris; mort à Boulogne-sur-Seine en 1881.

(2) DEBRAY (Henri), chimiste distingué, né à Amiens en 1826, examinateur à l'École polytechnique.

**CHALEUR PRODUITE PAR LES ACTIONS MÉCANIQUES. — 1° CHALEUR DÉGAGÉE PAR LE FROTTEMENT.** — Toute action mécanique est une source de chaleur : c'est même la source la plus répandue peut-être dans tout l'univers et de laquelle dérivent les autres. Personne n'ignore que le *frottement* de deux corps l'un contre l'autre développe une grande quantité de chaleur qui varie avec la nature des corps, mais qui est d'autant plus grande que la pression est plus considérable et le mouvement plus

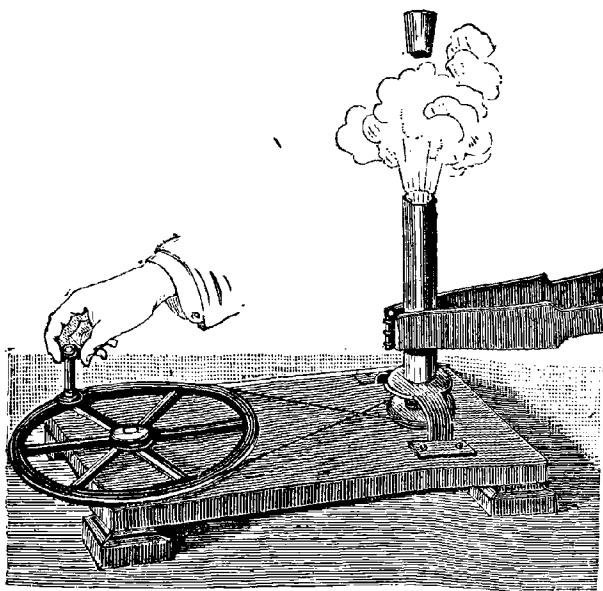


Fig. 203. — CHALEUR DÉGAGÉE PAR LE FROTTEMENT.

rapide. Les sauvages se procurent du feu en frottant deux morceaux de bois secs l'un contre l'autre ; le frottement des allumettes contre un corps dur suffit pour enflammer le phosphore ; le frottement des essieux de voiture ou de wagon contre les roues donne lieu à un échauffement qui pourrait produire les plus graves accidents, si on n'en diminuait l'intensité par l'interposition de corps gras souvent renouvelés. Une roue d'acier, frottant un silex, lance des parcelles de fer incandescentes qu'on a essayé d'employer à l'éclairage des galeries des mines, parce que, tout en produisant des étincelles, elles ne pouvaient mettre le feu aux gaz détonants.

Dans les cabinets de physique, on rend sensible la chaleur développée par le frottement au moyen de cette expérience de M. Tyndall (*fig.* 203) :

Un tube de verre plein d'eau et fermé par un bouchon peut tourner autour de son axe au moyen d'une courroie sans fin, qui passe sur une roue horizontale que l'on met en mouvement. On presse le tube au moyen d'une pince en bois recouverte de cuir. Bientôt le tube s'échauffe, l'eau finit même par bouillir, et le bouchon est projeté par la vapeur.

Deux autres expériences célèbres ont démontré combien était grande la chaleur développée, et ainsi combattu les idées alors admises sur la nature de la chaleur.

Dans la fonderie de canons de Munich, Rumford fit placer sur le tour une pièce de 6 portant encore sa masselotte, masse de bronze que le travail du tour sépare du canon. On pratiqua une cavité dans cette masse, on y ajusta un foret obtus pour développer un frottement intense au fond du trou, et l'on plongea le tout dans une caisse contenant dix litres d'eau. Au bout de deux heures et demie, la chaleur développée par le frottement avait fait bouillir, puis réduire en vapeur, toute l'eau qui entourait le canon.

L'expérience de Davy, qui consiste simplement à frotter l'un contre l'autre deux morceaux de glace dans un espace maintenu à une température inférieure à 0° est plus décisive encore.

M. Pictet, ayant pensé que la force qui produirait le frottement pouvait être le vent ou une chute d'eau et ainsi ne rien coûter, faisait tourner l'une sur l'autre des plaques de métal, essayant d'appliquer industriellement le frottement comme source de chaleur. MM. Beaumont et Mayer ont perfectionné cette idée; mais l'usure des machines rend cette source de chaleur plus dispendieuse que celle produite par la simple combustion du bois ou de la houille.

On a aussi proposé d'utiliser le frottement pour le chauffage des wagons de toutes classes sur les lignes de chemins de fer.

Le problème du chauffage des voitures à voyageurs, qui semble de prime abord très facile à résoudre, est au contraire excessivement compliqué, et des essais et des études sont encore aujourd'hui poursuivis dans toute l'Europe, afin d'obtenir un résultat. Dès 1873, le syndicat des six grandes compagnies françaises avait accepté la proposition faite par la compagnie de l'Est de faire des expériences pendant plusieurs hivers consécutifs. Le résultat de ces expériences a été consigné dans une étude extrêmement remarquable, formant un volume in-8° de 500 pages, sous la signature de M. l'ingénieur en chef Regray. Tous les systèmes y sont examinés et discutés : chauffage par des poêles, chauffage au moyen de l'air chaud fourni par un calorifère spécial à chaque véhicule et réparti par des tuyaux; chauffage avec de la vapeur d'eau provenant soit de la locomotive, soit d'une chaudière spéciale placée au milieu du train; chauffage au moyen de briquettes ou de combustibles agglomérés; chauffage par l'eau chaude circulant dans des appareils fixes, ou dans des bouillottes mobiles. Aucune solution décisive n'a pu être trouvée, et l'on a paru, en attendant, ne pas pouvoir renoncer au chauffage avec les bouillottes d'eau chaude.

M. E. Pelon avait inventé un appareil formé d'un mandrin de bois tournant dans un cône métallique et mû par les roues du wagon sous lequel il était placé. Ce cône s'échauffe vivement; autour de lui est un ser-

pentin dont une extrémité débouche dans le wagon, tandis que l'autre est un entonnoir dirigé vers la tête du train; l'air s'engouffre dans l'entonnoir, s'échauffe dans le serpentin et vient élever la température du wagon. Expérimenté, ce procédé de chauffage n'a pas donné les résultats qu'en espérait l'auteur.

**2° CHALEUR DÉGAGÉE PAR LA PERCUSSION.** — Le choc de deux corps est encore une source de chaleur; nous en avons quotidiennement des exemples sous les yeux. Nous résumerons, d'après M. de Parville, un des effets de cette chaleur déterminée par le choc, effet qui nous semble devoir présenter un grand intérêt.

On se rappelle combien de fois, pendant la guerre de 1870, on entendit dire : « Les Prussiens se servent de balles explosibles »; et, réciproquement, on nous accusa de temps en temps d'avoir tiré sur l'armée envahissante avec des projectiles interdits aux nations civilisées. Les chirurgiens trouvèrent quelquefois, en effet, dans les organes et les tissus, des fragments de balle si petits qu'ils furent conduits à admettre que ces morceaux n'étaient que des éclats produits par l'explosion d'une charge enfermée dans la balle.

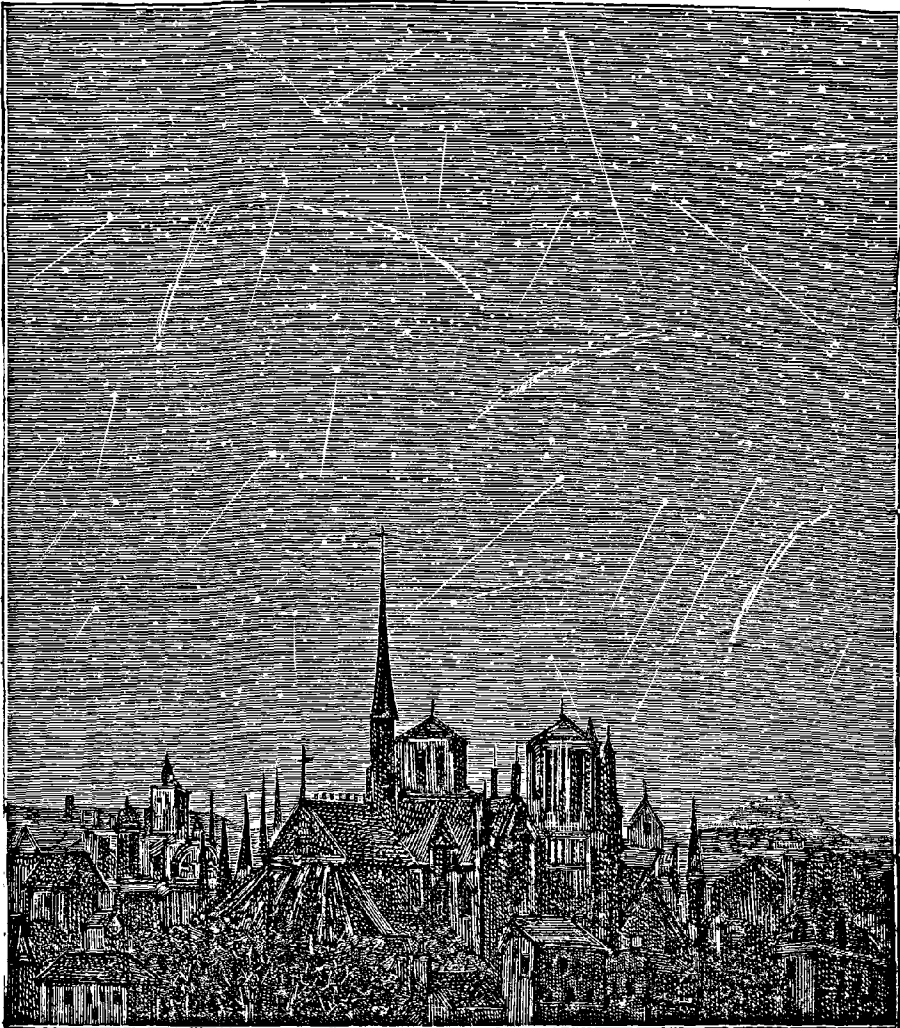
Nous ne nous sommes jamais servis de balles explosibles, et peut-être a-t-on accusé l'ennemi à tort; il faut au moins le souhaiter. Tout, en effet, pourrait s'expliquer à l'aide des remarques qu'a transmises à l'Académie des sciences, un savant professeur de la Faculté de médecine de Strasbourg, M. le docteur Coze.

M. Coze et plusieurs chirurgiens allemands ont, à plus d'une reprise, trouvé dans le voisinage d'une plaie un grand nombre de fragments de balle et la balle elle-même, mais fragmentée ou notablement diminuée de poids. Les morceaux auraient fait supposer, à un premier examen, qu'en effet ils provenaient bien de l'éclatement du projectile; mais la balle retrouvée ne permettait pas d'adopter cette hypothèse. Il devenait évident, au contraire, que le projectile pouvait se fragmenter de lui-même au contact d'un corps dur et se réduire partiellement en éclats.

M. le docteur Coze n'hésite pas à admettre, pour rendre compte des singuliers effets qu'il a eu l'occasion d'observer, que lorsqu'une balle rencontre un os dur, une pièce de monnaie, un bouton d'habit, enfin un corps suffisamment résistant, sa vitesse est brusquement anéantie, et le mouvement du projectile se convertit en chaleur. La température engendrée est assez élevée pour fondre une portion de la balle. Des parcelles de plomb fondu pénètrent dans les chairs, se refroidissent et se solidifient. On comprendrait ainsi très bien la présence dans les tissus de ces petits morceaux



de plomb que l'on a pris pour de véritables éclats d'un projectile explosif. On sait bien que la chaleur développée par l'arrêt de la vitesse d'un boulet qui frappe une cible est énorme. Certains boulets de marine



Les météores ou étoiles filantes qui éclatent dans l'air sont de petits corps... (page 394).

s'échauffent en frappant le but au point de rougir et d'éclater sans amorce de percussion; on conçoit donc bien qu'une balle de plomb, lancée avec la vitesse que lui communiquent les nouvelles armes, puisse s'échauffer au point de se fondre quand elle heurte un os résistant, et l'explication est

admissible. L'os, étant très dur, ne se déforme que difficilement; le projectile n'effectue pas de travail, et toute sa puissance vive peut se transformer en chaleur sensible.

M. le docteur Coze a constaté qu'en pesant les fragments retrouvés on reconstituait à très peu près le poids de la balle.

Le savant professeur de la Faculté de Strasbourg, pour appuyer son explication, demandait que son opinion fût contrôlée par des expériences. Ces expériences ont eu lieu à Bâle et confirment très bien les vues de M. Coze.

Les expériences n'étaient pas conçues dans ce but; mais elles n'en sont que plus nettes. On venait de remplacer, pour les exercices du tir de l'infanterie, les anciennes cibles en bois par des cibles en fer. On tira sur de fortes plaques de tôle et à petite distance, cent pas environ. Les balles coniques, en frappant la tôle, produisaient à la surface une déformation à peine appréciable et tombaient ensuite tout près de la cible. En même temps, une portion très notable de la balle se détachait par fusion du reste de la masse, et l'on voyait, tout autour du point touché sur la cible, une grande quantité de gouttelettes de plomb rayonnant dans tous les sens. Le poids normal du projectile, 40 grammes, était réduit à 13 grammes.

C'est bien là, ce nous semble, la reproduction fidèle de ce qu'a observé M. Coze chez plusieurs soldats gravement atteints. Le plomb, arrêté par l'os, s'écrasait en se fondant et jaillissait dans les parties molles du corps.

L'observation et le calcul se réunissent donc pour attribuer à une cause physique naturelle ce que l'on avait attribué à une violation des lois élémentaires de la civilisation.

**3° CHALEUR DÉGAGÉE PAR LA COMPRESSION.** — Les solides et les liquides étant très peu compressibles (page 44) la chaleur qu'ils donnent lorsqu'on les comprime est très faible. Ainsi, sous la pression de 30 *atmosphères*, la température de l'éther s'élève seulement de 6 degrés pour une diminution de volume de 4 centimètres cubes environ. Pour les gaz, la compression, en faisant éprouver à leur volume une diminution considérable, produit un grand dégagement de chaleur. Le petit appareil qui nous a servi à démontrer leur compressibilité, le *briquet à air* (*fig. 134*, page 278), sert à prouver le dégagement de chaleur produit sous une pression quelconque, puisque le coton placé au fond du tube s'enflamme lorsqu'on appuie sur le piston.

Un appareil, imaginé par MM. Clément et Désormes, permet même de mesurer la quantité de chaleur dégagée.

Cet appareil (*fig. 204*) consiste en un grand ballon de verre B, fermé par un robinet R, également très grand. Le ballon communique par un tube AD, fermé par un second robinet C, avec une machine pneumatique. Le tube AD communique aussi par un tube de verre DS, placé sur une échelle graduée, avec un récipient S, contenant de l'acide sulfurique coloré en rouge. On enlève, au moyen de quelques coups de piston de la machine pneumatique, un peu de l'air du ballon B, puis on ferme le robinet C. L'air du ballon est alors à une pression légèrement inférieure à celle de l'atmosphère, l'acide sulfurique du tube DS s'élève donc dans le tube, jusqu'en H, par exemple. Que brusquement l'on ouvre et que l'on ferme aussitôt le robinet R, le liquide descendra immédiatement dans le tube DS jusqu'au même niveau que dans le récipient S; mais la compression a échauffé l'air du ballon, et la preuve,

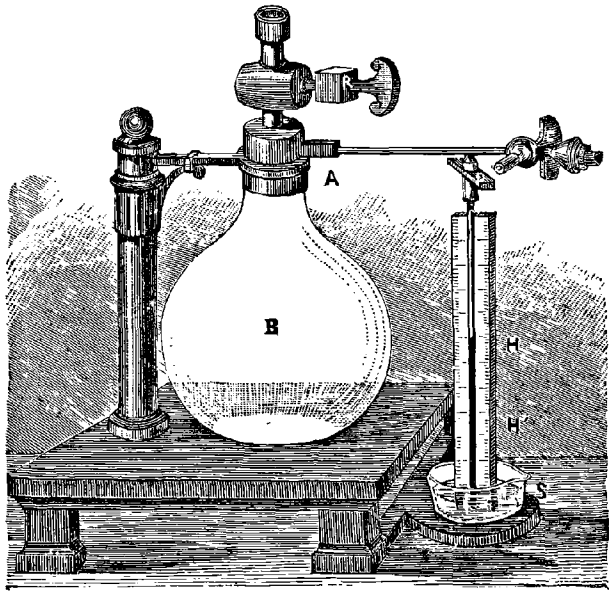


Fig. 204. — APPAREIL DE MM. CLÉMENT ET DÉSORMES.

c'est que, cet excès de chaleur se dissipant, l'air du ballon diminue de force élastique et le liquide remonte en H. On peut alors, par le calcul, déduire la valeur de la chaleur dégagée par la compression (page 283).

La réciproque du principe est vraie; c'est-à-dire que l'expansion d'un gaz produit du froid, qu'il y a absorption de chaleur. Pour le démontrer, on comprime de l'air dans le récipient d'une machine de compression (page 299); quand on ouvre le robinet qui met la machine en communication avec l'air extérieur, l'air comprimé jaillit aussitôt en donnant naissance à un léger brouillard formé par la vapeur d'eau de l'atmosphère qui se condense par le refroidissement de l'air dilaté, et qui, quelquefois même, se forme en glace. Dans les mines, les machines à épuisement contiennent dans un réservoir de l'air fortement comprimé; si on laisse échapper cet air, l'humidité de l'air se condense et le robinet se couvre de glace. Nous avons fait remarquer (page 327) que l'air comprimé dans

les tramways ne devait se rendre aux cylindres moteurs qu'après avoir été échauffé.

**ÉQUIVALENCE DE LA CHALEUR ET DU TRAVAIL MÉCANIQUE.** — Les exemples que nous avons donnés de chaleur produite par des actions mécaniques montrent évidemment qu'avec le *travail* on peut produire

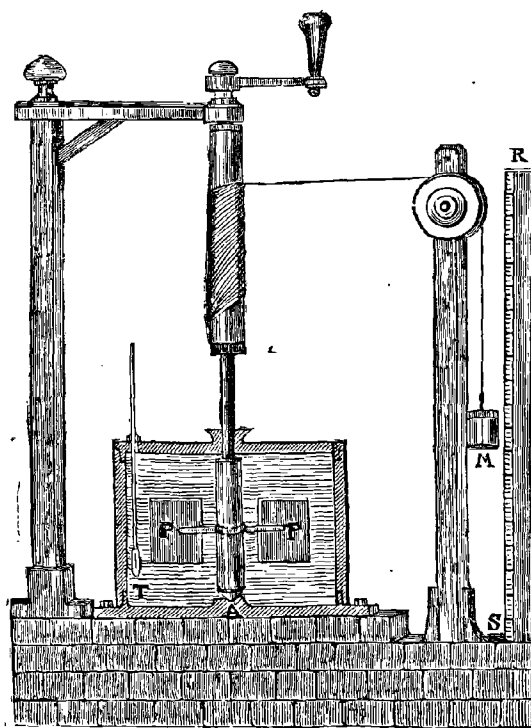


Fig. 205. — APPAREIL DE M. JOULE.

de la *chaleur*, et réciproquement qu'avec de la *chaleur* on peut produire du *travail*. L'expérience du *briquet à air* résume ces principes. En poussant brusquement le piston *travail*, nous produisons de la *chaleur*; et aussi, si le piston est enfoncé et que l'on chauffe l'air qui est au-dessous de lui, cette *chaleur* produira du *travail*; le piston remontera dans le tube d'une certaine quantité. Il y a donc une relation évidente entre le travail et la chaleur; ils peuvent se transformer l'un dans l'autre. Lorsqu'un corps en mouvement s'arrête, il y a élévation de température.

Or, pour mettre un corps *en mouvement*, il faut faire agir pendant un certain temps une *force* (pages 69 et 63), c'est-à-dire produire du *travail*; ce *travail* est représenté par le mouvement lui-même, qui en est, en quelque sorte, la forme sensible.

Partout où le travail, où le mouvement sera absorbé, il y aura production de chaleur équivalente à ce travail, ou bien production d'un nouveau travail; mais la somme du nouveau travail et de la chaleur produite est toujours égale au travail primitif.

On a pu déterminer cette équivalence, c'est-à-dire mesurer la quantité de chaleur nécessaire pour produire un certain travail, et réciproquement la dépense de travail nécessaire pour produire une certaine chaleur,

au moyen de l'appareil avec lequel M. Joule, savant physicien anglais, fit, vers 1843, son expérience fameuse.

Cet appareil (*fig. 205*) se compose d'une cuve pleine d'eau dans laquelle plonge un thermomètre T, et deux palettes P en cuivre, fixées à un axe vertical A, autour duquel, en dehors de la cuve, s'enroule un fil tendu, avec l'intermédiaire d'une poulie, par un poids M qui, en tombant, imprime à l'axe un mouvement de rotation. Une échelle, dressée sur la route que doit suivre le poids dans sa chute, indique la distance que celui-ci parcourt. Le poids de la cuve et de ce qu'elle renferme est connu, et l'on a noté la température indiquée par le thermomètre. On laisse descendre le poids, qui parcourt, sous l'action de la pesanteur, un certain espace RS, correspondant à un travail déterminé d'avance. Les palettes, mises en mouvement, agitent l'eau : il en résulte une élévation de température que l'on peut constater au thermomètre. On note cette élévation et, par un simple calcul, on peut déterminer la chaleur créée.

Quant au travail dépensé, il n'est pas seulement le produit de la hauteur de la chute par la valeur en kilogrammes de ce poids (page 74). Des *kilogrammètres* trouvés dans cette multiplication, il faudrait déduire le travail qui est employé à vaincre la résistance du cordon et celle de l'air, et celui qui sert à produire un peu de chaleur par le frottement de la poulie et par celui de l'axe qui porte les palettes. Enfin, quand le poids touche le sol, il y a encore un choc qui crée de la chaleur qu'on ne mesure pas. Il est possible cependant d'évaluer la quantité de travail ainsi dépensée ; et M. Joule a pu trouver, en définitive, qu'une dépense de travail de *425 kilogrammètres correspondait à une production de chaleur égale à une calorie, et réciproquement, pour une calorie dépensée, il y a 425 kilogrammètres de travail produit.*

On appelle *calorie* la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau.

## CHAPITRE II

## DILATATIONS — THERMOMÈTRES

**EFFETS GÉNÉRAUX DE LA CHALEUR.** — Le premier effet de la chaleur sur un corps est de changer sa *température*. On entend par ce mot le plus ou moins d'intensité de la chaleur qu'un corps peut manifester au dehors.

La *température* est indépendante de la quantité de matière qui est animée du mouvement vibratoire, mais elle dépend de la vitesse des vibrations : deux corps peuvent avoir la même *température*, quoique possédant des quantités diverses de chaleur. Ainsi une aiguille et une barre d'acier, portées au rouge, ont la même température, et cependant l'aiguille a une quantité moindre de chaleur.

Extrêmement mobile, le *calorique* (nous nous servons de ce terme pour exprimer la cause de la chaleur, et, pour plus de facilité dans nos explications, nous le considérons comme le fluide lui-même) est sans cesse en mouvement, se porte d'un corps sur un autre à travers l'espace, en sorte que tous les corps émettent continuellement de la chaleur en même temps qu'ils en reçoivent de ceux qui les environnent.

Si, par cet échange continu, ils gagnent plus de chaleur qu'ils n'en perdent, leur *température* s'élève ; s'ils en perdent autant qu'ils en gagnent, leur *température* reste stationnaire ; et s'ils en perdent plus qu'ils n'en gagnent, leur *température* baisse.

Il n'y a donc pas de corps absolument privés de chaleur ; il n'y a pas de corps absolument froids. Les corps que nous appelons *froids* peuvent produire sur d'autres corps plus froids encore des phénomènes tout à fait semblables à ceux que les corps chauds produisent sur des corps moins chauds.

Le même objet, ne variant pas de température, peut donc nous paraître froid dans un moment et chaud dans un autre, suivant la température extérieure de notre corps. Nous éprouvons une sensation de chaleur quand, l'hiver, nous pénétrons dans une cave, tandis que c'est de la

fraîcheur ou du froid que nous sentons quand nous y pénétrons pendant l'été. Cependant la température de ces lieux est à peu près constante; mais, en hiver, notre corps, extérieurement plus froid, reçoit de l'enceinte où il pénètre plus de chaleur qu'il n'en donne, et dans l'été, au contraire, il en perd plus qu'il n'en gagne, d'où la sensation de froid que nous éprouvons.

Si l'on prend un verre d'eau chaude et un verre d'eau froide, et que l'on mêle une partie de chacun dans un troisième verre, qu'ensuite on mette un doigt dans l'eau froide et un doigt dans l'eau chaude, puis successivement ces deux doigts dans l'eau mélangée, le doigt qui a été dans l'eau chaude éprouvera une sensation de froid, et celui qui a été dans l'eau froide une sensation de chaud.

Les phénomènes résultant de l'accumulation ou de la perte de chaleur dans les corps peuvent être divisés en deux classes : 1° variations de volume, dilatations ou contractions; 2° changements d'état, c'est-à-dire transformation de solides en liquides, de liquides en gaz, et réciproquement. Nous nous occuperons d'abord de l'étude des lois relatives aux variations de volume; nous traiterons ensuite des changements d'état.

Cependant, avant d'entrer dans ces détails, il faut que nous constatons la propriété générale à tous les corps *d'augmenter de volume quand ils s'échauffent, de diminuer de volume, au contraire, quand ils se refroidissent*. Cette propriété importante, appelée *dilatabilité*, sert presque exclusivement de base à l'étude des phénomènes calorifiques.

**DILATABILITÉ.** — La dilatabilité de tous les corps sous l'influence de la chaleur se démontre par les expériences suivantes :

1° *Corps solides.* — Pour la dilatation en volume (dilatation cubique), on se sert de l'appareil appelé *anneau de 'S Gravesande* (1) qui se compose (*fig* 206) d'un anneau à travers lequel passe exactement une boule de

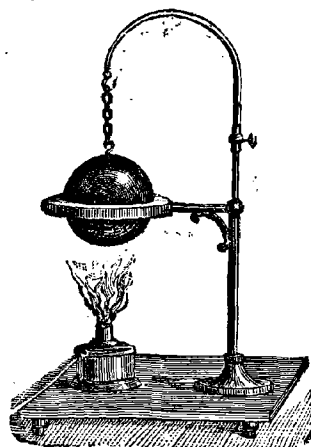


Fig. 206.

ANNEAU DE 'S GRAVESANDE.

(1) 'S GRAVESANDE (Guillaume-Jacob), savant hollandais (1688-1742), s'était fait remarquer dès l'âge de dix-huit ans; fut longtemps rédacteur d'un journal scientifique publié à La Haye. Il devint professeur de mathématiques, d'astronomie, de philosophie, et eut pour élève Musschenbrœk (page 235), dont il resta l'ami et qui appela de son nom l'instrument dont il est question ici, et que ce dernier avait imaginé. Il fut un des premiers à adopter et à propager les théories de Newton.

métal. Si on chauffe la boule, elle ne peut plus passer; si on la laisse refroidir, elle passe de nouveau. Si, laissant la boule froide, on chauffe l'anneau, elle passe plus facilement encore.

Cette expérience, que l'on peut ainsi varier, est concluante.

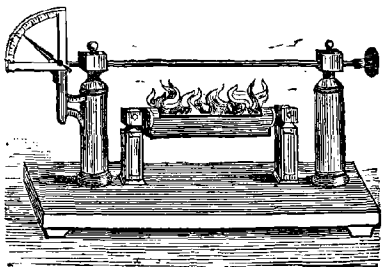


Fig. 207. — PYROMÈTRE.

Pour la dilatation linéaire, on emploie le *pyromètre* (fig. 207). C'est une tige de fer AB, maintenue à son extrémité A par une vis et butant, par son autre extrémité B, contre la courte branche d'un levier coudé C, dont la grande branche est une aiguille mobile sur un cadran divisé DE. On chauffe la tige, et le déplacement de l'aiguille prouve sa dilatation en longueur.

2° *Corps liquides*. — Les liquides et les gaz étant beaucoup plus dilatables que les solides, leur dilatation est facile à constater. L'appareil des académiciens de Florence sert à cet usage. C'est un ballon de verre (fig. 208), plein d'un liquide coloré ou de mercure, auquel est soudé un long tube capillaire. Si l'on plonge le ballon dans de l'eau chaude, on voit bientôt le liquide coloré monter dans le tube. On pourrait objecter que le tube lui-même se dilatant, sa paroi grossit, diminue conséquemment le volume intérieur et, par suite, amène l'élévation du liquide. Le contraire a lieu : le volume intérieur s'est d'abord augmenté; et la preuve, c'est que le liquide a commencé par descendre dans le tube, et, s'il remonte ensuite, c'est qu'il se dilate plus que le vase qui le renferme.

3° *Corps gazeux*. — La dilatation des gaz se démontre, comme celle des liquides, au moyen d'un tube beaucoup plus long que celui employé pour ceux-ci, parce que la dilatabilité des gaz est bien plus grande que celle des liquides.

Le gaz renfermé dans le tube est séparé de l'air atmosphérique par une bulle de mercure servant d'index. En chauffant la boule, on voit le gaz, se dilatant, chasser devant lui l'index.

C'est sur cette propriété des corps de se dilater sous l'influence de la chaleur qu'est basé l'instrument appelé *thermomètre*.

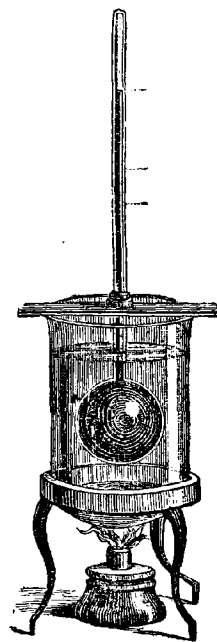


Fig. 208. — DILATATION DES LIQUIDES.



**HISTORIQUE DU THERMOMÈTRE.** — L'idée première d'un instrument destiné à mesurer les variations de la température appartient peut-être au célèbre Van Helmont, qui avait imaginé un appareil destiné, selon ses



Installation des thermomètres à l'Observatoire de Montsouris (page 420).

expressions, « à constater que l'eau, renfermée dans une boule terminée par une tige creuse, monte ou descend, suivant la température du milieu ambiant. » Cependant on a prétendu que, dès 1597, Galilée avait construit le premier thermomètre, et quelques auteurs revendiquent aussi

l'honneur de cette invention en faveur du fameux historien et théologien de Venise, Fra Paolo. Mais l'opinion la plus répandue est que l'on doit attribuer cette invention au physicien hollandais Van Drebbel (1).

Ce thermomètre, qu'il appelait *calendare vitrum* (verre indicateur), se composait (fig. 209) d'un ballon de verre B dans lequel on mettait de l'eau additionnée d'acide nitrique pour l'empêcher de se congeler. On chauffait cette eau pour en chasser l'air, puis on y introduisait le tube soufflé A.

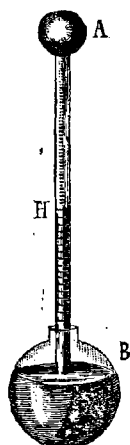


Fig. 209

THERMOMÈTRE  
DE DREBBEL.

A mesure que l'eau se refroidissait, elle montait dans le tube et s'arrêtait à une certaine hauteur H, qui était censée représenter la température moyenne. Une échelle collée sur le tube indiquait les divisions au-dessous de cette température.

On ignorait alors que la pression atmosphérique agissant sur l'eau d'un vase la fait monter dans un tube dont on a chassé l'air, et qu'ainsi l'ascension du liquide dans l'appareil de Drebbel n'était pas produite seulement par une dilatation due à la température. Cet instrument était donc d'une grande inexactitude.

Le médecin Sanctorius, à la même époque, imagina un instrument semblable pour indiquer la chaleur des fébricitants. Otto de Guéricke le modifia quelque peu et lui donna le nom de *perpetuum mobile* (mouvement perpétuel); Becker proposa de substituer le mercure à l'eau. Enfin les membres de l'Académie *del Cimento* apportèrent au thermomètre (du grec *thermos*, chaleur; *métron*, mesure) les derniers perfectionnements et lui donnèrent le nom et à peu près la forme qu'il a aujourd'hui. Pour le graduer, ils le portaient dans une cave profonde, marquaient zéro à l'endroit où le mercure s'arrêtait, puis, partant de là, marquaient arbitrairement, au-dessus et au-dessous de zéro, les divers degrés de chaleur ou de froid.

Cependant les thermomètres de cette époque ne concordaient point entre eux. L'instrument indiquait le plus ou moins de température, mais les différences ne se rapportaient qu'à un degré moyen pris arbitrairement par chacun. Le premier, R. Boyle proposa que tous les thermomètres prissent comme point fixe le degré de congélation de l'eau, et comme second point fixe le point où monterait l'alcool du tube plongé dans du

(1) DREBBEL (Cornélius Van), né à Alkmaër (Hollande) en 1572, mort à Londres en 1634. Fils d'un paysan, ce savant physicien fut protégé par le roi Jacques I<sup>er</sup> d'Angleterre, qui l'emmena à Oxford, et eut aussi la faveur des empereurs d'Allemagne Rodolphe II et Ferdinand II. Il découvrit le thermomètre, la teinture en écarlate, et on lui attribue, à tort, l'invention du télescope et du microscope.

beurre fondu ; on diviserait ensuite l'espace compris entre ces deux points en parties égales. En 1701, Newton substitua à l'alcool coloré, jusque-là presque toujours employé, l'huile de lin, qui pouvait supporter sans bouillir une plus haute température que l'alcool. Il avait pris pour points de repère ou degrés comparables : 1° la glace fondante ; 2° la chaleur du sang humain ; 3° la fusion de la cire ; 4° l'ébullition de l'eau ; 5° la fusion de différents alliages de plomb, d'étain et de bismuth ; 6° la fusion du plomb. En 1702, Amontons construisit un thermomètre à tube recourbé, remplaçant l'alcool par le mercure et prenant comme point fixe l'eau bouillante.

Presque en même temps, de nombreux thermomètres furent imaginés. Les Anglais adoptèrent un thermomètre, connu sous le nom de *thermomètre normal de la Société royale de Londres*, où les degrés étaient comptés de haut en bas, à l'inverse des autres : 0° correspondait à *très chaud* et 65° à gelée ; les Allemands eurent les thermomètres de Lambert (1) et de Sulzer (2) ; les Russes, celui de Delisle (3) ; mais tous ces thermomètres disparurent lorsque, en 1724, Fahrenheit, en 1731, Réaumur (4), eurent construit le leur, et que, en 1742, Celsius (5) eut proposé la division de

(1) LAMBERT (Jean-Henri), né à Mulhouse, ville qui appartenait alors à la Suisse (1728-1777). Il était fils d'un pauvre tailleur. Il fit seul son éducation, apprit presque toutes les langues anciennes et modernes, la physique, la chimie, l'astronomie, les mathématiques, etc. Précepteur dans une famille, puis professeur à Munich, il fut appelé à Berlin par le roi Frédéric, et fut aussitôt admis à l'Académie de cette ville. Il a laissé de nombreux travaux.

(2) SULZER (Jean-Georges), savant suisse (1720-1779), était ecclésiastique ; d'abord vicaire d'un curé de campagne, puis maître d'école, il obtint plus tard une chaire de mathématiques à Berlin, entra à l'Académie de cette ville. Il s'est occupé plus particulièrement de philosophie, et on lui doit une *Théorie des beaux-arts* longtemps estimée.

(3) DELISLE (Joseph-Nicolas), d'une famille de savants (1677-1729). Son père, Claude Delisle, était un chronologiste distingué, et son frère aîné, Guillaume Delisle, membre de l'Académie des sciences, le premier qui ait réformé la géographie d'après les observations des astronomes et des voyageurs modernes, fut le professeur de Louis XV enfant. Lui-même se fit connaître comme astronome, fut professeur au Collège de France et eut pour élèves les astronomes Lalande et Messier.

(4) RÉAUMUR (René-Antoine FERCHAULT DE), physicien et naturaliste (1683-1757). Membre de l'Académie des sciences dès 1708, il a pendant cinquante ans efficacement contribué, par ses propres études et surtout par son influence, au progrès des sciences au XVIII<sup>e</sup> siècle. En physique, on lui doit le thermomètre qui porte son nom ; et ses travaux sur la cémentation et l'adoucissement des fers fondus, sur la fabrication du fer-blanc, sur la porcelaine, sont au nombre des plus utiles et des plus beaux que l'on puisse citer. En histoire naturelle, la science lui est redevable de la première méthode digne du nom de système. Il avait rêvé de faire une grande histoire de la nature, telle que Buffon, aidé de Daubenton, l'entreprit ; mais le plan était trop vaste pour qu'il lui fût possible de l'achever. Il ne fit connaître que les plus petits animaux. Sentant sa fin approcher avant qu'il eût même ébauché ce que Buffon, jeune alors, promettait d'accomplir, il vit avec douleur lui échapper une gloire qu'il eût voulu ne partager avec aucun de ses confrères. La jalousie s'empara de lui, et, loin de faciliter à Buffon une œuvre si méritoire, il entama contre lui une lutte déplorable. Mais, comme le dit justement M. A. Maury, maintenant que Réaumur et Buffon n'existent plus, on a oublié les torts de l'un à l'égard de l'autre ; la science bénit leurs deux noms et les unit dans une gloire commune, qui est celle de la France.

(5) CELSIUS (André), astronome suédois (1701-1744), fit partie de l'expédition envoyée au pôle par la France, sous la direction de Maupertuis, pour y mesurer un degré. Professeur de physique

l'échelle en 100 parties exactement égales, depuis 0° (glace fondante) jusqu'à 100° (eau bouillante), c'est-à-dire le thermomètre centigrade. Depuis lors, ces trois thermomètres sont à peu près les seuls universellement adoptés.

Ces thermomètres ne diffèrent que par la graduation ; nous allons indiquer les détails de leur construction et de la graduation de chacun d'eux.

**CHOIX DE LA SUBSTANCE THERMOMÉTRIQUE.** — Puisque tous les corps se dilatent sous l'influence de la chaleur, et réciproquement se contractent sous l'influence du froid, il est évident qu'une matière quelconque peut servir de matière thermométrique. Mais, pour que les indications données par ces instruments soient comparables entre elles, pour que leur signification soit constante relativement aux causes de la chaleur, on a adopté, comme type, le *thermomètre à mercure*.

On avait écarté les corps solides, d'abord à cause de leur peu de dilatation, ce qui rendait les observations difficiles, quelquefois impossibles, quand il s'agissait de comparer des températures peu différentes entre elles. En second lieu, il est rare d'obtenir deux échantillons d'un corps solide parfaitement identiques ; s'ils sont, en effet, chimiquement purs, le travail qui les a purifiés a eu une influence sur leur dilatation. Néanmoins, nous verrons que l'on construit des *thermomètres métalliques*, utiles surtout pour les observations météorologiques comme *thermomètres enregistreurs*.

Comme substance thermométrique, les gaz offraient un grand avantage : leur dilatabilité extrême permet de négliger absolument la dilatation de l'enveloppe elle-même qui les renferme ; mais les dimensions considérables qu'exigent les thermomètres à gaz, leur observation qui devient une opération très délicate exigeant souvent des calculs pénibles, les a fait rejeter de l'usage ordinaire. On ne les emploie que pour des expériences scientifiques qui veulent une exactitude rigoureuse.

Les corps liquides, suffisamment dilatables, se trouvent facilement purs et identiques entre eux ; ils peuvent être pris sous des formes qui permettent de constater les moindres variations de leur volume. Parmi les liquides, le mercure est de tous le plus convenable. On peut se le procurer aisément à l'état de pureté, ou on le purifie facilement ; il est bon conducteur de la chaleur, c'est-à-dire qu'il se met rapidement à la tempé-

à la célèbre université d'Upsal, il y fit élever un observatoire à ses frais. Il ne faut pas le confondre avec l'illustre botaniste Celsius (Olaüs), le fondateur de l'histoire naturelle en Suède, qui fut le premier maître et le protecteur de Linné (1670-1756).

rature des corps qu'il touche. Sa chaleur spécifique est très faible, de sorte que, s'il est en contact avec un autre corps, cet autre corps n'éprouve dans sa température qu'un changement très négligeable. Il se dilate régulièrement, c'est-à-dire que les accroissements de son volume correspondent aux accroissements de chaleur. Il n'entre en ébullition qu'à 350°.

Cependant comme le mercure se contracte irrégulièrement de 36° à 39° au-dessous de zéro, et se congèle à 39°, ce thermomètre ne peut plus servir pour mesurer des températures inférieures à ce degré. On emploie alors le thermomètre à alcool, coloré en rouge avec une matière végétale, appelée *orseille*, parce que le liquide ne gèle pas par les plus grands froids connus. Mais la dilatation irrégulière de l'alcool, son point d'ébullition qui est peu élevé, 79°, la difficulté de trouver des alcools identiques, ce qui rend impossible de comparer entre eux ces thermomètres, tous ces inconvénients font qu'on ne se sert de cet instrument que pour les observations qui n'exigent qu'une exactitude très peu rigoureuse.

**CONSTRUCTION DES THERMOMÈTRES A MERCURE.** — Il faut d'abord se procurer des tubes capillaires parfaitement calibrés, c'est-à-dire ayant dans tous les points de leur longueur un diamètre sensiblement égal. Cette condition est très rarement remplie exactement; on cherche cependant à approcher le plus possible de la perfection. Après avoir fait un choix plus ou moins rigoureux entre les tubes dont on veut se servir et rejeté ceux dont les imperfections sont visibles, on introduit dans ceux que l'on suppose convenables une goutte de mercure dont on a mesuré la longueur et que l'on promène tout le long du tube. Au moyen de la *machine à diviser* (page 37) et du microscope que porte son chariot, on voit si, dans toutes les positions, la goutte de mercure ne varie pas de longueur, ce qui prouve la régularité du cylindre.

Le tube étant choisi, on soude, ou mieux on souffle à une de ses extrémités un réservoir, et à l'autre extrémité une ampoule, plus volumineuse que le réservoir et le tube et terminée par une pointe effilée et fermée, afin qu'en attendant le moment du remplissage, la poussière ne s'introduise par dedans, et n'oblige à un nettoyage très difficile. Quand on veut procéder au remplissage, on casse l'extrémité de cette pointe, on la plonge dans un vase plein de mercure et on chauffe légèrement l'ampoule (*fig.* 210). L'air qu'elle contient a augmenté de force élastique et a d'abord refoulé l'air extérieur; mais, en se refroidissant, sa force élastique diminue, ne peut plus faire équilibre à la pression atmosphérique, et celle-ci introduit du mercure dans l'ampoule qui en est en grande partie remplie. On ferme l'extrémité de la pointe afin de se mettre à l'abri

des vapeurs mercurielles, et l'on chauffe sur une grille (*fig. 211*), jusqu'à une température assez élevée, le tube et l'ampoule encore vides. On chauffe ensuite le mercure de l'ampoule, et en redressant l'instrument, une partie du mercure pénètre enfin dans le réservoir. On porte alors

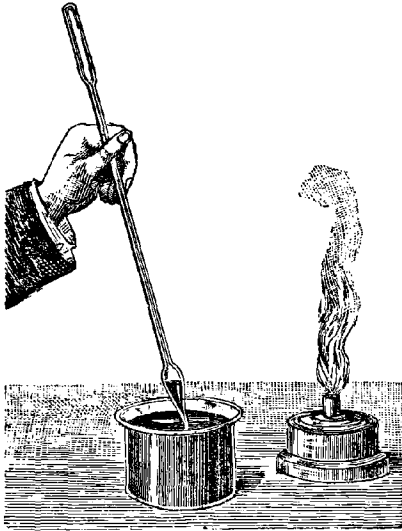


Fig. 210.

REMPLEISSAGE DU THERMOMÈTRE.

jusqu'à l'ébullition le mercure du réservoir; la vapeur produite chasse l'air du tube, le force à traverser le mercure de l'ampoule, et celui-ci, quand l'appareil se refroidit, surmonte l'action capillaire, descend dans le tube et le réservoir, sous l'influence de la pression atmosphérique et parce que les vapeurs refroidies se sont condensées et n'opposent plus aucune pression sur lui. On répète plusieurs fois cette opération, afin qu'il ne reste pas dans l'appareil une seule bulle d'air qui diviserait le mercure en plusieurs tronçons et rendrait le thermomètre impropre à servir. Cela fait, on règle la quantité de mercure qui doit rester dans l'appareil, selon les usages auxquels on le destine, c'est-

à-dire qu'on le porte à la température à laquelle il doit servir; du mercure sort de l'appareil, et celui qui reste suffit aux observations. Toutefois, on laisse un petit espace vide, afin que si, par hasard, on portait le thermomètre à une température plus élevée, le mercure pût encore se dilater sans briser l'instrument. Enfin on enlève l'ampoule en coupant le tube par un simple trait de lime, et l'on ferme le tube en le soudant à la *lampe d'émailleur*, sorte de lampe à huile dont la flamme est traversée par un courant d'air rapide qui l'active fortement et en élève extrêmement la température.

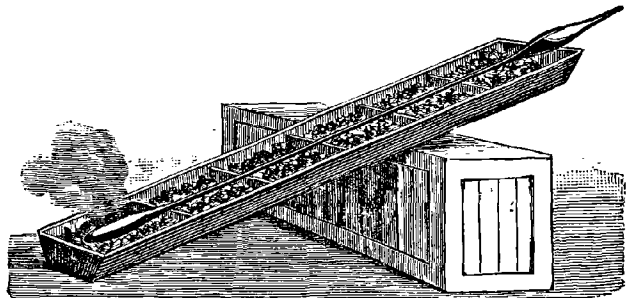


Fig. 211. — GRILLE A CHAUFFER LE THERMOMÈTRE.

**CONSTRUCTION DU THERMOMÈTRE A ALCOOL.** — La construction du

thermomètre à alcool exige beaucoup moins de précautions que celle du thermomètre à mercure, l'alcool étant bien plus dilatable que le mercure, et les tubes thermométriques employés étant moins capillaires. Pour introduire le liquide, il suffit de chauffer l'air du réservoir afin de dilater l'air qu'il contient et de plonger aussitôt l'extrémité ouverte du tube dans un bain d'alcool coloré. A mesure que l'air intérieur se contracte par le refroidissement, la pression atmosphérique fait monter l'alcool dans le tube et dans le réservoir qui se remplit en partie. On chauffe de nouveau jusqu'à ce que l'alcool entre en ébullition; ce liquide, qui est très volatil, donne d'abondantes vapeurs, et celles-ci, en se dégageant, entraînent rapidement l'air qui est dans la boule. Cependant il reste fréquemment une bulle d'air dans le réservoir; pour la faire disparaître on attache le tube à l'extrémité d'une ficelle et on lui donne un mouvement de fronde qui chasse la bulle. En plongeant alors une seconde fois le tube dans l'alcool, la vapeur se condense, et l'appareil se remplit aussitôt. On ferme ensuite le tube par le même procédé que pour le thermomètre à mercure.

#### GRADUATION DU THERMOMÈTRE. — ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES. —

Une graduation qui permit de rendre tous les thermomètres comparables entre eux était d'une nécessité évidente, puisqu'il est sinon impossible, au moins très difficile de leur donner à tous des dimensions égales, et que même, si on l'obtenait, cela présenterait des inconvénients graves à cause des circonstances variables dans lesquelles l'observateur se trouve placé.

Robert Boyle, Newton et quelques autres avaient proposé divers points de repère. On a adopté, avons-nous dit ci-dessus, les seules graduations de Fahrenheit, de Réaumur et de Celsius.

Fahrenheit plongeait son thermomètre à alcool dans un mélange réfrigérant de glace, d'eau et de sel marin, et il désignait le point où s'arrêtait l'alcool par 0° (froid extrême); plongeant ensuite l'instrument dans un mélange d'eau et de glace, il marquait 32° (glace fondante) au point où s'arrêtait l'alcool; puis il marquait 96° à partir de 32° au point où s'arrêtait l'alcool d'un thermomètre tenu dans la bouche ou sous l'aisselle d'un homme sain. Plus tard (1), à la suite de la lecture d'un mémoire d'Amontons, il substitua le mercure à l'alcool, et adopta comme troisième point de repère l'eau bouillante, qu'il marquait 212°.

Tous les physiiciens adoptèrent la glace fondante et l'eau bouillante

(1) Hoepffer. *Histoire de la Physique*.

pour déterminer les deux points fixes : la glace fondante parce que l'expérience a prouvé que la glace fondait toujours et rigoureusement à la même température ; l'eau bouillante parce que, comme nous le verrons ci-après, l'eau entre en ébullition toujours également à la même température et s'y maintient constamment, pourvu qu'elle soit distillée, qu'elle bouille dans un vase de métal et non de verre et sous une pression atmosphérique de 760 millimètres.

Réaumur plaça son 0° à la glace fondante, et 80° à l'eau bouillante ; et enfin, depuis Celsius, les thermomètres centigrades, partant aussi de 0° (glace fondante) ont leur 100° à l'eau bouillante (*fig. 212*).

La concordance entre ces diverses graduations est facile.

Puisque 80 degrés Réaumur valent 100 degrés centigrades, 1 degré Réaumur vaut  $\frac{100}{80}$  ou  $\frac{5}{4}$  de degré centigrade ; donc, *pour énoncer dans l'échelle Réaumur une température énoncée dans l'échelle centigrade, il faut multiplier par  $\frac{4}{5}$  le nombre de degrés centigrades ; et, réciproquement, pour énoncer dans l'échelle centigrade une température énoncée dans l'échelle Réaumur, il faut multiplier par  $\frac{5}{4}$  le nombre de degrés centigrades.*

Puisque, dans l'échelle Fahrenheit, la division 32 correspond au 0 de l'échelle centigrade, il faut d'abord retrancher les 32, reste 180. Puisque 180 degrés Fahrenheit valent 100 degrés centigrades, 1 degré Fahrenheit vaut  $\frac{100}{180} = \frac{5}{9}$  de degré centigrade ;

donc, *pour énoncer dans l'échelle Fahrenheit une température énoncée dans l'échelle centigrade, il faut multiplier par  $\frac{9}{5}$  le nombre de degrés centigrades et ajouter 32 au produit ; et, réciproquement, pour énoncer dans l'échelle centigrade une température énoncée dans l'échelle Fahrenheit, il faut d'abord retrancher 32 de ce nombre, puis multiplier par  $\frac{5}{9}$  le nombre restant.*

Le procédé pour graduer les thermomètres est le même, quelle que

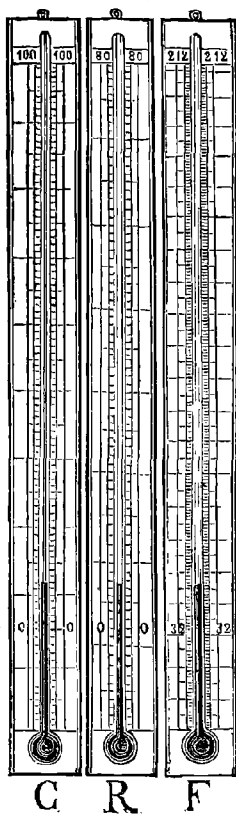
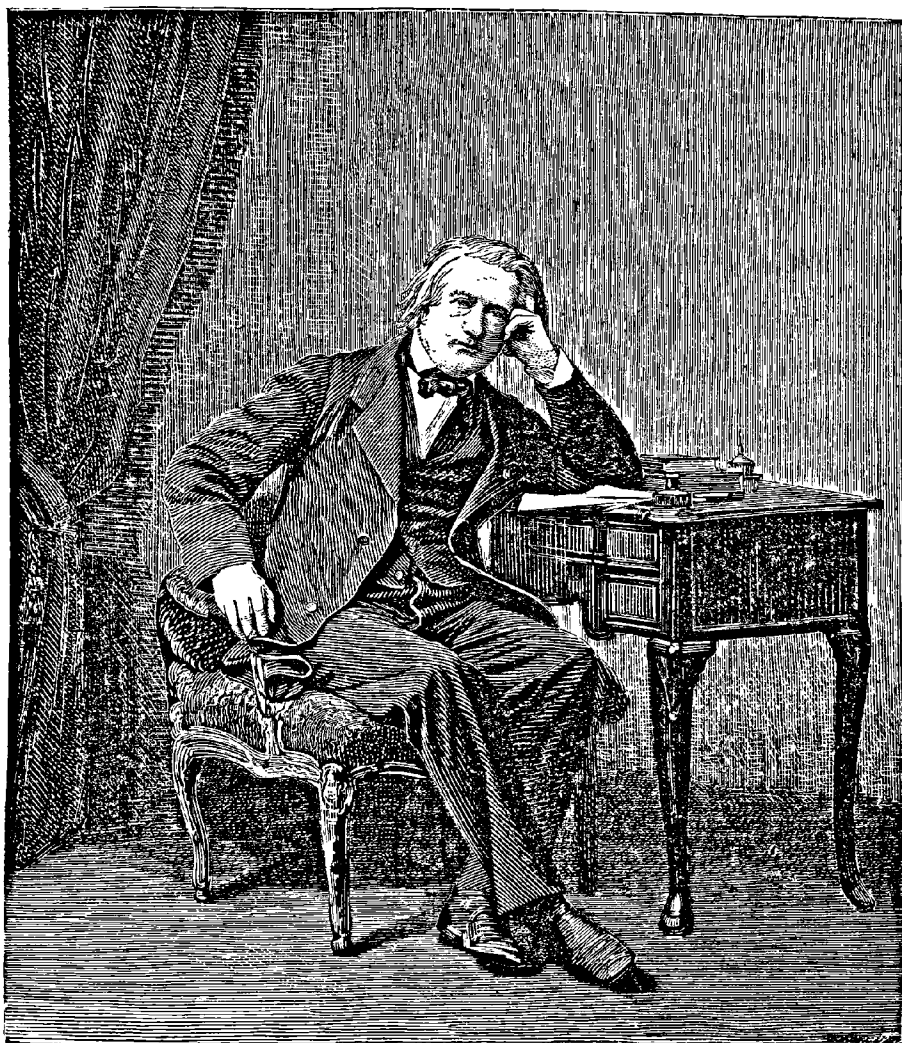


Fig. 212. — ÉCHELLES  
THERMOMÉTRIQUES.



soit l'échelle adoptée. Il faut d'abord déterminer les deux points fixes adoptés universellement, c'est-à-dire le point où, dans le thermomètre centigrade, sont placés 0° et 100°.



REGNAULT

Pour déterminer le 0°, on plonge le thermomètre dans un vase rempli de glace (*fig. 213*), au moment où cette glace commence à fondre. Le vase est percé de trous pour donner issue à l'eau qui s'écoule. On l'y laisse un certain laps de temps, vingt minutes au moins, et, quand le niveau du

mercure ne varie plus, on marque, avec un diamant très pointu, l'endroit précis où il s'est arrêté; c'est le point zéro.

Pour déterminer le 100, on se sert de l'appareil imaginé par Wollaston et par Gay-Lussac, et perfectionné par M. Regnault (*fig. 214*). C'est une chaudière cylindrique en cuivre ABCD, dans laquelle on met de l'eau que l'on porte à l'ébullition. La vapeur monte dans un tube EH, circule dans une double enveloppe KK, avant de s'échapper par le conduit L. Un

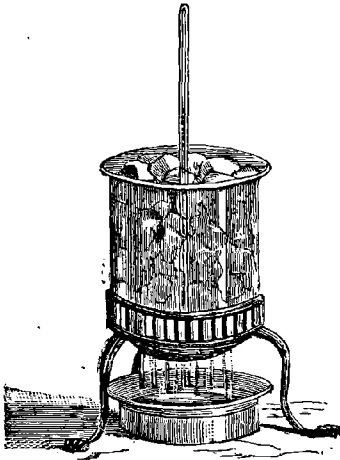


Fig. 213.

APPAREIL POUR LA DÉTERMINATION  
DU ZÉRO.

petit manomètre M, placé sur un côté du tube, montre que l'ébullition se fait bien sous la pression extérieure et que, par suite, l'issue donnée à la vapeur est suffisante. On place le thermomètre à graduer dans l'enveloppe intérieure, en maintenant l'extrémité qui dépasse le tube par un bouchon en liège P. Quand le mercure est devenu stationnaire, on marque un trait au point où il s'est arrêté : c'est la température de 100°.

Cependant il arrive fort souvent que la pression n'est pas égale à 760 millimètres; dans ce cas, on place le point 100 un peu au-dessus ou un peu au-dessous du point où le mercure s'est arrêté, en calculant sa position d'après ce principe

qu'une différence de pression de 26<sup>mm</sup>,6 donne lieu à une différence de 1° dans la température d'ébullition de l'eau.

Les deux points fixes obtenus, on divise la portion de la tige comprise entre ces deux points en 100 parties égales pour le thermomètre centigrade, en 80 pour le Réaumur, en 212 pour le Fahrenheit, au moyen de la *machine à diviser* (page 37). Quelquefois on marque au moyen de l'*acide fluorhydrique*, qui attaque le verre, les *degrés* sur le tube même du thermomètre. L'échelle ainsi tracée est un peu plus difficile à lire, mais elle a l'avantage de rester toujours fixe et constante, le verre étant peu dilatable. Le plus généralement, on trace les degrés sur une plaque de bois ou de métal (*fig. 215*).

Ces degrés s'indiquent par un petit zéro placé à droite et un peu au-dessus du nombre qui marque la température. Pour désigner que ce nombre de degrés est au-dessus de zéro, on le fait précéder du signe *plus* (+); s'il est au-dessous, du signe *moins* (—).

La graduation du thermomètre à alcool se fait d'ordinaire en déter-

minant seulement le 0° par immersion dans la glace ; puis, comme il ne peut marquer que jusqu'à 79°, on prend une deuxième température quelconque par comparaison avec un thermomètre à mercure et l'on divise l'espace compris entre ces deux points en parties égales.

**REMARQUES SUR LES CONDITIONS A OBSERVER POUR CONSULTER LES THERMOMÈTRES. — 1°** Les

différents degrés d'une échelle thermométrique n'indiquent pas que les températures soient doubles, triples d'une autre ; cela n'a aucun sens. Ils indiquent seulement quelle est, de deux températures comparées, la plus grande ou la plus petite. Ce ne sont, en quelque sorte, que des numéros d'ordre, indiquant une gradation entre plusieurs températures successives.

2° Tous les thermomètres sont soumis à une cause d'erreur qu'il est impossible d'éviter, quelque bien construits qu'ils soient. Cette erreur a été mise en lumière par M. Despretz. Au bout d'un certain temps, le zéro se déplace d'une manière assez notable ; ce n'est guère qu'au bout de dix-huit mois ou deux ans qu'il

reste invariable au nouveau point où il s'est arrêté. Ce phénomène est dû à un travail moléculaire dans l'intérieur du verre, produit soit parce qu'au moment de la construction de l'instrument il subit une sorte de trempe (page 54), soit par suite des brusques changements de température qu'il supporte dans les expériences. Le réservoir diminue de capacité. Il est essentiel de tenir compte de ce petit déplacement du zéro dans l'évaluation des températures.

3° Pour obtenir rigoureusement le degré de température d'un appar-

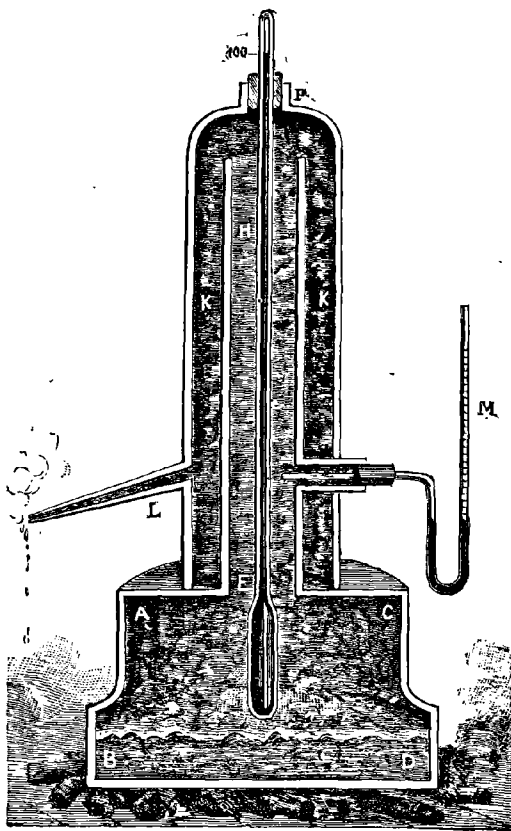


Fig. 214.

APPAREIL POUR LA DÉTERMINATION DU POINT 100.

tement, par exemple, ou de l'atmosphère, il faut avoir soin d'écartier toute cause qui pourrait influencer sur le thermomètre. Ainsi, il ne doit pas être placé contre un mur, surtout si ce mur communique avec l'extérieur, s'il est échauffé par le soleil ou par des tuyaux de cheminée. Il doit être suspendu par un fil au milieu de l'appartement. Pour les observations

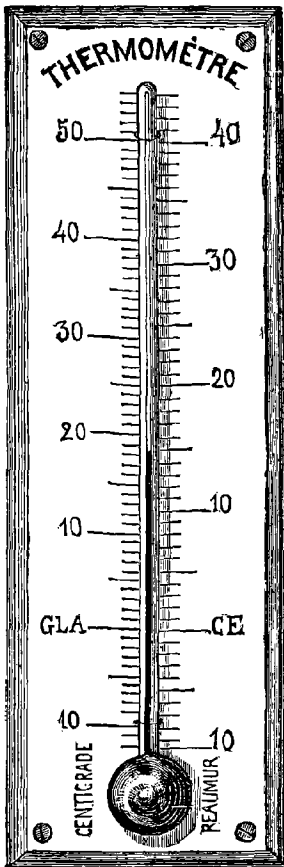


Fig. 215. — THERMOMÈTRE.

météorologiques en plein air, le mode d'installation des thermomètres est différent suivant les pays et le degré de force que le vent peut y atteindre (1). Pour qu'un thermomètre donne bien la température de l'air, on l'éloignera quelque peu de corps volumineux, comme les murs de clôture ou d'habitation, parce que ces murs, ayant une température presque toujours différente de celle de l'air, troubleraient la marche de l'instrument. Il ne faut pas non plus que des murs blancs, frappés par les rayons solaires, puissent rayonner vers les thermomètres qu'ils échaufferaient d'une manière sensible. En France, là où le vent n'atteint pas un degré de violence capable d'enlever ou de briser les instruments, on installe les thermomètres à l'air libre, sous des abris appelés *abris Montsouris* (page 409).

« Deux poteaux s'élèvent verticalement à 1 mètre environ de distance, l'un à l'est, l'autre à l'ouest. Entre ces deux poteaux sont placés deux toits parallèles entre eux, distants l'un de l'autre de 10 à 15 centimètres, et s'inclinant vers le midi d'un angle d'environ 30 degrés. Les deux toits parallèles sont en zinc; le toit inférieur est de dimensions un peu moindres que l'autre, afin qu'il ne reçoive pas les rayons directs

du soleil; mais il doit masquer le plan supérieur pour les thermomètres. Deux volets verticaux arrêtent les rayons du soleil levant ou couchant; des arbustes plantés sur le pourtour, excepté sur le côté nord, abritent le sol, qui est d'ailleurs gazonné. »

Dans les pays de grands vents, on peut disposer sous cet abri une caisse à persiennes permettant encore la circulation de l'air, mais protégé-

(1) A. Lévy. *Histoire de l'air*.

geant les instruments qui y sont renfermés. Il convient alors que les lames des persiennes soient en tôle mince pour prendre rapidement la température de l'air, et aussi que le toit soit agrandi pour que les parois de la caisse ne reçoivent pas les rayons directs du soleil. L'abri des caisses à persiennes est généralement employé en Angleterre et en Italie; il abaisse un peu les *maxima* et élève les *minima*, sans altérer sensiblement les moyennes des deux extrêmes.

4° La sensibilité du thermomètre dépend du volume du réservoir par rapport au tube : plus le réservoir sera petit et le tube fin, plus l'instrument sera sensible et la longueur du degré considérable. Pour les observations un peu délicates, il est donc utile que le thermomètre soit petit.

Mais, s'il s'agit de mesurer la température d'une masse dont la température se maintient à peu près constante, on pourra employer un thermomètre à gros réservoir. Toutefois, il faudra remarquer que le thermomètre ne se mettant en équilibre de température avec les corps que par suite d'un échange de température avec eux, il faut que le thermomètre lui-même ne fasse pas varier la température du corps observé.

5° Les indications du thermomètre sont fondées non pas absolument sur la dilatation du mercure, mais sur la dilatation *apparente*, c'est-à-dire sur la différence entre sa propre dilatation et celle du verre. Il a été constaté que cette dilatation apparente était de  $\frac{1}{6480}$  par degré, c'est-à-dire que, toutes les fois que le volume du mercure se dilatera ou se contractera de  $\frac{1}{6480}$  du volume qu'il possède à 0°, cette variation correspondra à un degré du thermomètre, si on ne tient pas compte de la dilatation du verre. Cela permet d'expliquer pourquoi différents thermomètres à mercure, placés dans des conditions identiques, ne donnent pas toujours rigoureusement la même température. Le verre employé pour la construction de chacun d'eux n'est pas absolument le même, et, par conséquent, ne se dilate pas tout à fait dans les mêmes proportions. Ce désaccord, d'ailleurs, est parfaitement négligeable pour les observations journalières : il résulte des travaux de M. Regnault sur ce point que le désaccord est à peu près nul jusqu'à 300°, et qu'au-dessus, vers 350°, la différence peut s'élever au plus, à 3° ou 4°. Il est utile néanmoins de ne pas l'oublier ; pour les expériences de grande précision, en effet, on doit abandonner les thermomètres à mercure et se servir des thermomètres à gaz.

**THERMOMÈTRES A GAZ. — THERMOMÈTRES DIFFÉRENTIELS.** — Les thermomètres à gaz sont composés d'un réservoir que l'on place dans l'enceinte dont on veut connaître la température, d'un tube calibré réuni au réservoir par un tube capillaire qui l'éloigne de l'enceinte, d'un autre

tube ouvert à son extrémité supérieure et par lequel on introduit du mercure; enfin d'un robinet qui sert à faire communiquer successivement les uns avec les autres les différents organes de l'appareil. Les thermomètres à gaz sont beaucoup plus sensibles que les thermomètres à liquide, à cause de la facile dilatation du gaz, qui est 160 fois celle du verre; ils signalent la moindre variation de température. Approcher la main seulement de l'appareil suffit pour les faire varier; cependant ils ont

été à peu près abandonnés aujourd'hui pour le *thermomètre électrique* de Melloni dont nous parlerons plus loin, quoique le thermomètre de Leslie (1) ait servi à faire des déterminations très délicates sur le rayonnement de la chaleur.

Ces appareils n'ont pas pour but de faire connaître la température d'un lieu, mais la différence de température entre deux lieux voisins.

Le *thermomètre de Leslie* se compose (*fig. 216*) de deux boules de verre parfaitement égales et pleines d'air, réunies l'une à l'autre par un tube de verre

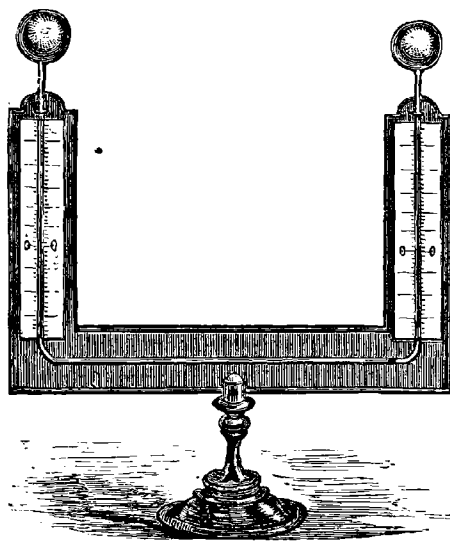


Fig. 216.

THERMOMÈTRE DIFFÉRENTIEL DE LESLIE.

deux fois recourbé. Une colonne d'acide sulfurique concentré et coloré en rouge est introduite dans ce tube, remplit la partie horizontale, et s'élève dans les portions verticales à une même hauteur (page 190), où l'on marque 0°. On porte alors l'une des boules à une température de 10° au-dessus de celle de l'autre; l'air qu'elle contient se dilate et fait aussitôt baisser le liquide dans la branche qu'elle surmonte, en l'élevant dans l'autre branche. On marque 10° de chaque côté, au point où le liquide s'est arrêté; on divise en 10 parties égales les intervalles compris entre 0° et 10°, puis on gradue avec les mêmes divisions le reste du tube.

Le *thermoscope de Rumford* (2) diffère du précédent en ce que la

(1) LESLIE (John), physicien écossais (1766-1832), était professeur à l'Université d'Édimbourg. Outre son *thermomètre*, la science lui doit un *hygromètre*, et l'industrie un des premiers moyens de produire artificiellement de la glace.

(2) RUMFORD (Benjamin THOMPSON, comte de), savant physicien, né à Rumford, dans l'Amé-

branche horizontale (*fig. 217*) est plus longue et les boules plus grosses. Dans la branche horizontale est un petit index liquide, très mobile, et placé juste au milieu quand ces deux boules sont à la même température; mais dès qu'une des boules est plus échauffée que l'autre, l'air s'y dilate et refoule l'index vers la boule moins chaude. Pour graduer l'instrument on a ménagé, à une des extrémités de la branche horizontale, un petit appendice où l'on fait arriver l'index pour faire passer une certaine quantité d'air d'une boule dans l'autre. Après quelques tâtonnements, on arrive à ce que l'index soit bien au milieu de la branche horizontale. On marque alors 0 sur l'échelle à chaque extrémité de l'index; puis, comme pour le thermomètre de Leslie, on chauffe une des deux boules à 10°; l'index s'avance; on marque 10° à ce point, et l'on divise les deux branches en parties égales.

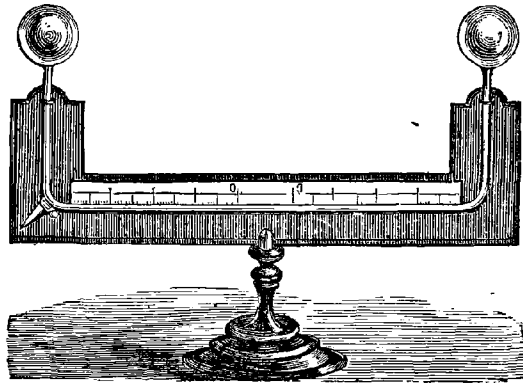


Fig. 217. — THERMOSCOPE DE RUMFORD.

**THERMOMÈTRES MÉTALLIQUES.** — Les *thermomètres métalliques* sont peu usités. Un des premiers employés fut celui que Mortimer fit connaître en 1747. Il se composait d'un cylindre de fer de trois lignes de diamètre et de trois pieds de long, qui, par son allongement ou son raccourcissement, indiquait sur un cadran les variations de température. Il était peu sensible et fut bientôt abandonné pour celui qu'avait construit Abraham Bréguet (1). Il se compose (*fig. 218*) d'une lame contournée en

rique anglaise (1753-1814). Il eut le malheur, dès 1775, de prendre parti pour les Anglais contre ses compatriotes révoltés et combattant pour leur indépendance. Venu en Angleterre, il y fut secrétaire d'État en 1780, puis retourna, en 1782, combattre les insurgés d'Amérique. Après la reconnaissance de l'indépendance américaine, il passa au service de l'électeur de Bavière, qui le nomma lieutenant général de ses armées, ministre de la guerre, directeur de la police, et le créa comte de Rumford. En 1799, l'électeur étant mort, Thompson voyagea, puis vint se fixer en France (1804) où il épousa la veuve de Lavoisier. Il est célèbre surtout par sa philanthropie. Il inventa les *soupes économiques* pour les pauvres. Malgré cela, il fut détesté de tous ceux qui le connurent : il était très pieux. La science lui doit son *thermoscope*, un *calorimètre*, les foyers qui portent son nom, des perfectionnements aux cheminées, aux lampes, etc.

(1) BRÉGUET (Abraham - Louis), célèbre horloger-mécanicien (1747-1823), appartenait à une famille de protestants que la dévotion de Louis XIV avait forcée de s'expatrier en Suisse, en 1685. Rentré en France vers 1762, Bréguet devint bientôt célèbre par son habileté et sa science. Il inventa les montres perpétuelles qui se remontent toutes seules, les ressorts-timbres, les cadratures de répétition, des échappements de toutes sortes; il créa l'horlogerie de précision. La science lui doit la

spirale et composée d'un ruban d'argent, d'un ruban d'or et d'un ruban de platine. L'argent est placé à l'intérieur, le platine est à l'extérieur, l'or sert de soudure. Quand la température augmente, l'argent étant plus

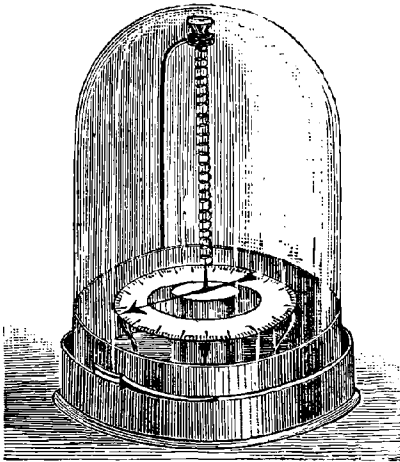


Fig. 218.

THERMOMÈTRE DE BRÉGUIT.

dilatatable que le platine, la spirale se détend et les courbures diminuent; si, au contraire, la température diminue, la spirale s'enroule. Or cette spirale est maintenue par son extrémité supérieure, et porte, à son extrémité inférieure, une aiguille qui se meut sur un cadran divisé. On a obtenu les divisions de ce cadran en portant successivement l'appareil à diverses températures données par un thermomètre à mercure très exact, et en inscrivant chaque fois ces températures en face de l'aiguille.

Cet appareil est très sensible, ce qui le rend quelquefois très utile. Nous verrons ci-après que plusieurs instruments

ont été construits sur le même principe que ce thermomètre.

Il existe d'autres thermomètres métalliques, les *thermomètres à cadran*, construits avec des dispositions analogues à celles des *baromètres à cadran* ou des *anéroïdes* (pages 267 et 270).

La figure 219 représente un thermomètre à cadran de M. Redier.

**THERMOMÈTRES ENREGISTREURS.** — Les thermomètres métalliques se prêtent bien à l'enregistrement de leurs indications, et c'est surtout comme *thermométrographes* (de *thermomètre* et du grec *grapho*, j'écris) qu'ils sont utilisés.

Dans le *thermométrographe* du P. Secchi, la température est indiquée

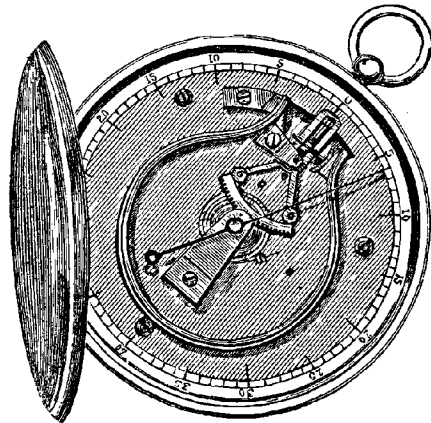


Fig. 219.

THERMOMÈTRE A CADRAN DE M. REDIER.

construction de chronomètres, d'instruments de physique et d'astronomie précieux. Il fut membre de l'Institut, du Bureau des longitudes. Il fut la tige d'une famille de savants mécaniciens dont la France s'honore à juste titre.



et enregistrée par la dilatation d'un fil de laiton de 17 mètres environ, dilatation qui met en mouvement un système de leviers en rapport avec un organe traceur. Dans celui de MM. Hasler et Escher, c'est une spirale



Installation du pyromètre Brongniart à la manufacture de Sèvres (page 432).

d'acier et de laiton soudés ensemble qui donne les variations de température; cette spirale communique avec un levier recourbé, fixé sur un axe en acier qui supporte le système traceur, de sorte que les moindres variations sont automatiquement enregistrées.

Pour bien faire comprendre le mécanisme des *thermométrographes*, nous décrirons celui auquel ont été apportés les derniers perfectionnements et qui, construit par M. Redier, sur les indications de M. Hervé-Mangon, directeur du Conservatoire des arts et métiers, a obtenu un grand prix à l'Exposition universelle de 1878. L'importance de ces instruments pour les observations météorologiques est assez grande pour qu'il soit utile d'entrer dans quelques détails (1).

L'organe thermométrique, c'est-à-dire ce qui subit et doit transmettre les variations de température, se compose (*fig. 220*) d'un tube extérieur A portant une roue dentée D, sur laquelle se trouve monté le mécanisme multiplicateur du thermomètre. A l'intérieur de ce tube A se trouve un tube en zinc z, s'ajustant librement dans le premier tube A. Ces deux tubes ont une longueur de 0<sup>m</sup>,70 et sont soudés l'un à l'autre par l'extrémité P. C'est la différence de la dilatation du tube d'acier sur le tube de zinc qui fera mouvoir

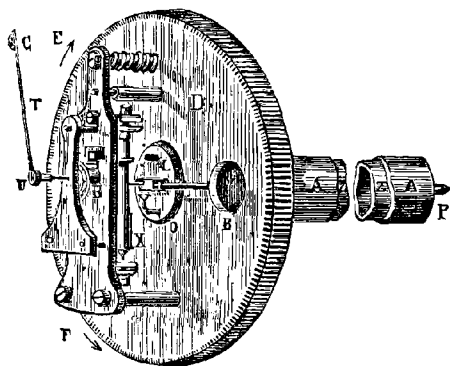


Fig. 220. — ORGANE DU THERMOMÈTRE  
ENREGISTREUR REDIER.

l'aiguille thermométrique A terminée par un crochet C.

Cette roue dentée D est destinée à faire tourner à droite et à gauche l'instrument thermométrique de façon à accrocher ou à décrocher l'aiguille T. Il était indispensable que cette roue obéît instantanément aux moindres différences de dilatation des tubes A et Z. M. Redier a obtenu ce résultat au moyen d'ingénieuses combinaisons mécaniques.

(1) Nous avons parlé ci-dessus (page 265) du baromètre de Vidie, construit et perfectionné par M. Redier. Les applications résultant de la perfection des appareils de cet ingénieur et savant constructeur sont nombreuses. Outre celles qui sont relatives aux phénomènes météorologiques, la physiologie lui doit de pouvoir étudier les lois de l'évaporation ou de la transpiration, soit d'une surface aqueuse, soit d'un sol nu ou enherbé, soit de plantes ou d'animaux, au moyen d'une *bascule à équilibre constant*; l'industrie : 1° de représenter les valeurs successives de la tension de la vapeur d'eau dans un générateur, d'où découle une régularité parfaite de la conduite du feu d'une chaudière et, conséquemment, une immense économie sur la dépense du combustible relativement à la force produite; 2° de représenter graphiquement les densités de l'alcool qui sort d'un alambic. Dans l'un ou l'autre cas, la courbe tracée, en dehors de l'action possible du chauffeur, montre au chef d'usine le plus ou moins de régularité du service de cet ouvrier. Les procédés inventés par M. Redier lui ont permis encore de résoudre le problème difficile de faire marcher une lourde aiguille sur un cadran monumental de 1 ou 2 mètres de diamètre, comme ceux des baromètres de la Bourse et de la Pointe-Saint-Eustache.

Voici maintenant la description de l'ensemble de l'enregistreur (fig. 221) :

- MN, double rouage d'horlogerie ;
- E, échappement réglant le rouage M ;
- V, volant réglant le rouage N ;
- Y, grande roue montée sur l'axe du train différentiel ;

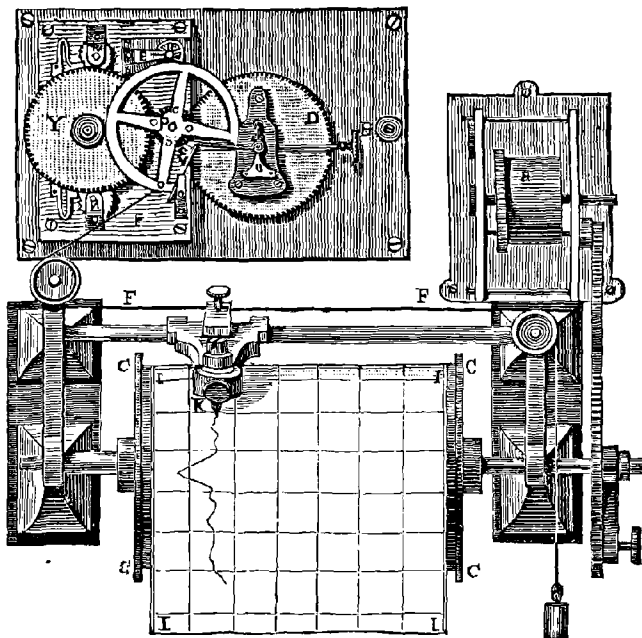


Fig. 221. — ENREGISTREUR DU THERMOMÈTRE REDIER.

- P, poulie montée sur un axe conduit par la roue Y ;
- D, roue dentée portant le mécanisme multiplicateur ;
- A, aiguille à crochet ;
- U, axe de l'aiguille A ;
- C, crochet de l'aiguille A ;
- B, bouton molleté servant à régler la course du thermomètre ;
- F, corde enroulée sur la poulie P et qui entraîne le crayon K ;
- R, rouage d'horlogerie conduisant le cylindre CC à raison de 4 milli-  
mètres par heure ;
- II, papier quadrillé enroulé sur le cylindre CC ;
- K, porte-crayon et crayon traçant la courbe sur le papier ;
- Q, poids tendeur du crayon.

L'ensemble de l'appareil fonctionne comme il suit :

Si la température s'élève, l'aiguille A va vers la droite, libère le volant V et le rouage inférieur N tourne. Il entraîne la poulie et le fil F de façon que le crayon K va vers la gauche. Ce rouage, en entraînant D, tourne jusqu'au moment où l'aiguille est raccrochée en V.

Si la température s'abaisse, l'aiguille maintient le volant V arrêté; l'échappement E entraîne la poulie en sens contraire et entraîne la roue dentée D de façon qu'il arrive un moment où le volant devient libre.

Dès lors, si la température reste constante, la roue D fait de petites oscillations et le crayon fait une ligne composée de stries très fines et invisibles pour tracer une ligne parallèle à celle des heures.

Le thermomètre ainsi disposé présente les avantages suivants : 1° Il

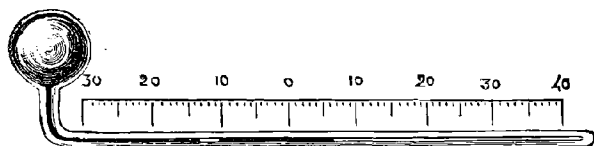


Fig. 222. — THERMOMÈTRE A MAXIMA.

est d'une sensibilité extrême, les deux tubes de zinc et acier n'ayant que deux dixièmes de millimètre d'épaisseur; 2° on peut faire usage de l'action motrice des

deux rouages pour régler des températures, quelles que soient les résistances; 3° si l'on veut éloigner l'action thermométrique de l'enregistreur, il suffit d'allonger suffisamment le tube extérieur d'acier et de faire le même allongement avec le même métal sur le tube en zinc. De cette façon on peut faire traverser un mur, par exemple, aux tubes thermométriques et soustraire l'instrument aux effets de la température pour toute la partie contenue dans l'épaisseur du mur.

Il va sans dire que le même instrument, muni des dispositions nécessaires pour entretenir la surface du tube d'acier en état d'humidité, devient un *thermomètre enregistreur humide*.

**THERMOMÈTRES A MAXIMA ET A MINIMA.** — Dans certaines circonstances, principalement pour les observations météorologiques, il est utile de connaître la plus haute ou la plus basse température (*maxima* ou *minima*) qui s'est produite pendant un certain laps de temps. On se sert alors de thermomètres dont la forme est quelque peu modifiée. Les plus connus et les plus sensibles sont ceux de Rutherford.

Le *thermomètre à maxima* est à mercure (fig. 222). C'est un tube recourbé, placé horizontalement, dans lequel on a introduit un petit cylindre d'émail qui peut courir dans le tube, mais est arrêté par le coude, et n'empêche pas la continuité de la colonne liquide. Si la température

s'élève, le mercure, en se dilatant, pousse devant lui le petit cylindre index ; quand elle s'abaisse ensuite, le mercure en se retirant laisse l'index au point le plus éloigné où il est parvenu, c'est-à-dire indiquant la température la plus élevée. Pour remettre l'instrument en expérience, on le redresse verticalement, et, à l'aide d'une petite secousse, on remet l'index à sa place.

Le *thermomètre à minima* (*fig. 223*) a la

même forme que le précédent, mais le tube est rempli d'alcool. Le petit index en émail est dans l'alcool, mais ne s'oppose nullement à sa dilatation. Lorsque le liquide se contracte et que son extrémité touche l'index, il l'entraîne avec lui par un effet d'adhérence ; mais, lorsqu'il se dilate, le liquide passe entre l'index et la paroi du tube sans l'entraîner, de sorte qu'il reste au point où il a été porté lors de la plus basse température.

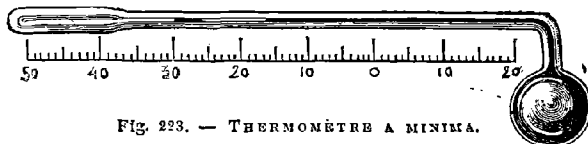


Fig. 223. — THERMOMÈTRE A MINIMA.



Fig. 224.

THERMOMÈTRE  
A  
DÉVERSEMENT.

**THERMOMÈTRE A DÉVERSEMENT DE WALFERDIN.** — Ce thermomètre, particulièrement destiné à donner les températures au-dessus de 10° des différentes couches terrestres, dans les opérations de sondage, consiste (*fig. 224*) en un thermomètre ordinaire dont le tube, terminé en pointe, aboutit à un réservoir de déversement contenant une certaine quantité de mercure.

Quand on veut se servir de l'instrument, on l'incline et on le chauffe de façon que le contact se fasse entre le mercure du tube et celui du réservoir de déversement ; on laisse alors refroidir, puis on place le thermomètre dans un bain dont la température est connue. L'équilibre établi, on porte le thermomètre dans le lieu dont on veut connaître la température ; là, le mercure se dilate, et une certaine quantité tombe dans le réservoir. Quand on le ramène et qu'on le plonge dans le bain dont on s'est servi, il manque dans le tube un certain nombre de divisions ; ce sont les degrés qu'il faut ajouter à ceux du bain pour avoir le degré de température du lieu où on l'a transporté.

**THERMOMÈTRE SALLERON.** — Nous voulons signaler un perfectionne-

ment ingénieux, récemment apporté à la construction des thermomètres. On a souvent besoin, dans certaines industries, de connaître exactement la température d'un lieu dans lequel on ne peut pénétrer : une étuve, par exemple, afin d'y maintenir une chaleur égale. M. Salleron a construit un thermomètre qui porte au loin ses indications.

A un thermomètre ordinaire, à gros réservoir en verre, placé dans le lieu dont on veut connaître la température, est adapté un tube de laiton de petit diamètre dont le mercure qui le remplit subit les mêmes dilatations et contractions que le mercure du thermomètre. Mais en sortant des lieux chauffés que l'on observe, le mercure du tube supporte l'influence de la température des divers milieux qu'il traverse, et les indications ne reproduiraient pas, au lieu d'arrivée, les indications réelles. M. Salleron, pour corriger cette erreur, dispose, à côté du tube entremetteur, un autre tube identique, également plein de mercure, mais sans communication avec le thermomètre. Ce second tube subit les mêmes influences de température que le tube entremetteur. Tous les deux aboutissent à deux réservoirs de verre isolés et gradués. Il est alors évident que la différence de niveau entre les deux liquides, dans les deux réservoirs, exprimera la seule variation de température transmise par le réservoir du thermomètre. En prenant pour 0° la division thermométrique où s'est arrêté le mercure du tube indépendant, ce qui sera au-dessus, dans l'autre réservoir, indiquera le nombre de degrés de chaleur du lieu dont on veut connaître la température.

**PYROMÈTRES.** — En 1671, Richer, chargé par l'Académie des sciences d'observer sous l'équateur la longueur du pendule à secondes, constata que l'horloge à pendule qu'il avait apportée de Paris retardait de deux minutes par jour et qu'il était obligé de raccourcir le pendule (page 119). Mais les physiciens partisans de Descartes ne pouvaient admettre que la pesanteur fût plus faible à l'équateur qu'aux pôles, en vertu de leur opinion sur la pesanteur (page 83), et attribuaient à l'action de la chaleur un allongement du fil du pendule. Newton démontra vainement que la chaleur équinoxiale était beaucoup trop faible pour produire le raccourcissement constaté par Richer ; ce ne fut qu'en 1730 que Musschenbroek se servit d'un instrument qui, sous le nom de *pyromètre* (du grec *pur*, feu ; *métron*, mesure) mesurait la dilatation des métaux et prouvait la fausseté de l'opinion des cartésiens et, conséquemment, la nécessité d'expliquer d'une autre façon le raccourcissement du fil du pendule à l'équateur. Cet instrument était celui que nous avons décrit sous le nom d'*Anneau de S Gravesande* (fig. 206). Ellicot, en 1736, puis successivement Bouguer,

Smeaton (1), l'abbé Nollet, Guyton de Morveau (2) imaginèrent des *pyromètres* plus ou moins ingénieux. D'abord destinés seulement à servir dans des recherches scientifiques, ils furent bientôt employés dans l'industrie pour mesurer les températures excessivement élevées, et auxquelles ne pouvait résister le thermomètre à mercure, qui se brise au-dessus de 350°.

En 1782, Wedgwood (3) construisit son *pyromètre*, qui fut longtemps très employé. Fondé sur le retrait qu'éprouve l'argile par l'action de la chaleur, et qui provient probablement d'un commencement de vitrification, cet instrument se compose (fig. 225) d'une plaque de cuivre appelée *jauge*, sur laquelle sont fixées trois barres légèrement inclinées, afin de former deux rainures coniques se faisant suite et divisées en 240 parties égales. Pour s'en servir, on prend un petit cylindre d'argile A, préalablement desséché à la chaleur du rouge sombre, et d'un diamètre tel qu'il entre dans la jauge juste au zéro de l'échelle. On le porte ensuite dans un creuset *réfractaire* (petit vase en grès, matière presque infusible) que l'on place sur le corps ou dans le milieu dont on veut mesurer la température. Dès qu'il a pris la température de ce corps ou de ce milieu, on le laisse refroidir et on le met de nouveau dans la jauge. Il s'enfonce alors plus ou moins profondément, en vertu du retrait qu'il a subi et qu'il a conservé en se refroidissant. On admet que chaque division du pyromètre de Wedgwood vaut 130° Fahrenheit, 57°,778 Réaumur et 72°,2225 centi-

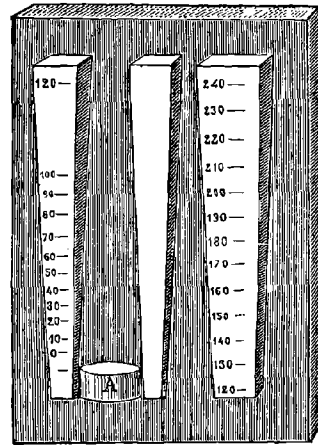


Fig. 225.

PYROMÈTRE DE WEDGWOOD.

(1) SMEATON (John), ingénieur anglais (1724-1792). On lui doit la construction du phare d'Eddystone, à l'entrée de la Manche, et le pont de Londres. Smeaton s'est occupé particulièrement de physique et d'astronomie.

(2) GUYTON DE MORVEAU (Louis-Bernard), né à Dijon (1737-1816), était avocat général à Dijon et cultivait en même temps les sciences avec ardeur. Il fit fonder par les états de Bourgogne des cours de science où lui-même enseignait la chimie, tout en continuant ses fonctions de magistrat. Élu en 1791 à l'Assemblée législative et à la Convention, il fut un des plus ardents partisans de la république. Il se dévoua sans arrière-pensée à l'œuvre d'émancipation en mariant le dévouement de l'homme aux travaux du savant. Nous avons vu qu'il s'était occupé d'aérostation ; c'est lui qui, commissaire à l'armée du Nord, organisa le corps des *aérostiers*. Comme fondateur, professeur et directeur de l'École polytechnique, il ne cessa d'imprimer une féconde impulsion aux sciences et à l'industrie. Ses découvertes en chimie le font presque l'égal de Lavoisier. On lui a reproché de n'avoir point sauvé de la mort ce dernier, condamné par le tribunal révolutionnaire ; cela prouve, dit M. Benjamin Gastineau, que Lavoisier ne pouvait être sauvé.

(3) WEDGWOOD (Josias), fabricant de porcelaines anglaises (1730-1795), devint membre de la Société royale de Londres.

grades. Mais ses appréciations sont peu raccordables, en réalité, avec l'échelle thermométrique, et aussi peu précises, quoique suffisantes souvent pour les besoins ordinaires de l'industrie.

M. Brongniart (1) est l'inventeur d'un autre *pyromètre* qu'il avait installé à la manufacture de Sèvres. Cet instrument n'est guère autre chose que celui que nous avons indiqué ci-dessus (*fig.* 207). Une plaque de porcelaine, placée dans le four dont on veut connaître la température, porte une rainure dans laquelle on met une lame de fer bien appuyée sur le fond invariable de cette rainure; une règle de porcelaine traversant le fourneau repose, d'un côté, sur l'extrémité de la lame de fer, et de l'autre sur la petite branche d'un levier coudé. Le fer, se dilatant, pousse la règle de porcelaine, qui se dilate elle-même d'une façon tellement peu sensible qu'on peut ne pas tenir compte de sa dilatation. Le levier coudé, mû par la règle, conduit, à l'aide d'un engrenage, une aiguille sur un cadran divisé. Les divisions correspondent aux diverses températures jusqu'à 1,500 degrés. Comme le pyromètre de Wedgwood, cet instrument donne des indications peu exactes; pour avoir une exactitude rigoureuse, il faut revenir aux thermomètres à gaz.

## CHAPITRE III

### VARIATION DU VOLUME DES CORPS

#### DILATATIONS ET CONTRACTIONS

**DILATATION DES SOLIDES.** — Nous avons démontré (page 407) que tous les corps ont la propriété d'*augmenter de volume quand ils s'échauffent, de diminuer de volume, au contraire, quand ils se refroidissent*. Des faits de chaque jour viennent corroborer les expériences de cabinet dont nous avons parlé. Pour cercler une roue de voiture, le charron prend un

(1) BRONGNIART (Alexandre), minéralogiste et géologue (1770-1847), fils de l'architecte distingué qui construisit la Bourse, l'hôtel d'Osmont, l'hôtel Frascati, le collège Bourbon (lycée Descartes), et fit le plan du cimetière du Père-Lachaise. Il s'occupa surtout de minéralogie, et fut directeur de la manufacture nationale de Sèvres.



cercle de fer plus petit que la roue en bois ; il chauffe ce cercle ; celui-ci s'élargit en tous sens et le charron y enchâsse la roue sans difficulté. Puis le fer est brusquement refroidi avec de l'eau. La contraction du



Pour cercler une roue de voiture, le charron chauffe un cercle (page 432).

collier de fer est tellement énergique que les fentes se resserrent sous une pression irrésistible, et que toutes les pièces de la roue sont désormais fixées entre elles de la manière la plus solide. Les rails des chemins de fer ne se touchent pas ; ils sont toujours séparés les uns des autres

par un petit intervalle afin qu'ils aient la liberté de se dilater ; sans cette précaution, ils se courberaient pendant les chaleurs de l'été. Si les rails étaient contigus, la différence seule de température entre l'hiver et l'été les ferait allonger de 70 centimètres par 100 kilomètres. Si l'on touche du verre avec un fer rouge, les parties touchées se dilatent rapidement et comme les parties voisines restent froides, le verre étant mauvais conducteur de la chaleur, elles s'opposent à la dilatation, et le verre se brise. Le même effet se produit si vous touchez le verre avec un corps trop froid. On emploie cette propriété pour découper des vases de verre. Après avoir fait à la lime un trait sur le vase, on y applique un charbon incandescent ; la rupture a lieu dans le sens du trait, si le verre ne présente pas de trop grandes irrégularités de structure.

Aujourd'hui que les métaux sont très employés comme matériaux de construction, il est nécessaire de connaître exactement les lois de la dilatation de chacun d'eux, ainsi que celles des briques, des pierres et des matériaux qui les entourent, afin de ne pas associer deux matières trop inégalement dilatables. On sait, en effet, que les toitures en zinc ou en plomb se boursoufflent pendant l'été et se déchirent pendant l'hiver, si l'on n'a pas la précaution de superposer les feuilles comme des tuiles. Les barreaux qui garnissent les fenêtres doivent être scellés par une seule extrémité ; l'autre, engorgée dans une cavité, doit pouvoir y jouer. Les tuyaux de conduite exposés à l'air ne doivent pas non plus être soudés sur une trop grande longueur ; les grilles des fourneaux doivent être plus petites que le foyer au milieu duquel elles sont placées. Les ponts en fil de fer présentent souvent, de grands changements de courbure : une chaîne de pont suspendu de 100 mètres de longueur subit, dans une année, une variation de 7 centimètres.

Il y a trois espèces de dilatation : *la dilatation linéaire*, c'est-à-dire suivant une seule dimension, la longueur ; *la dilatation superficielle*, suivant deux dimensions, longueur et largeur ; *la dilatation cubique*, suivant les trois dimensions, longueur, largeur et épaisseur.

**COEFFICIENTS DE DILATATION DES CORPS SOLIDES.** — On appelle *coefficient de dilatation* l'accroissement que prend l'unité de volume d'un corps lorsque sa température s'élève de 0° à 1° centigrade.

Les *pyromètres* ont été construits dans le but de connaître les coefficients de dilatation des corps, et Musschenbroek, Ellicot, Bouguer, Smeaton, Condamine, ont donné des tables de *dilatation linéaire* ; mais ces tables montrent combien peu les résultats concordaient entre eux. La connaissance exacte du coefficient de dilatation de quelques

corps solides, tels que le verre et les métaux, était cependant jugée indispensable pour la construction de certains instruments de précision, surtout du thermomètre. Dans ce but, en 1782, Lavoisier et Laplace, pour leurs expériences relatives à la dilatation du flint-glass anglais et du verre de Saint-Gobain, inventèrent l'appareil suivant (*fig.* 226) :

Une cuve de cuivre est placée dans une sorte de four entre quatre piliers de pierre. Entre deux de ces piliers est une barre horizontale, qui porte à une de ses extrémités une lunette G, et au milieu une règle de verre, mobile et tournant avec la barre et la lunette. Entre les deux autres piliers sont fixées deux traverses de fer qui maintiennent une règle de verre F. Enfin la cuve contient de l'eau ou un acide, et l'on y place la barre KH dont on veut mesurer le coefficient de dilatation, qui s'appuie sur les règles de verre F et D. La règle de verre F étant fixe, la barre KH ne peut s'allonger par la dilatation que dans la direction KH, et pour que ses mouvements soient bien libres, cette barre est placée sur des roulettes de verre. Enfin, dans la lunette est un fil micrométrique horizontal dont chaque angle correspond à un certain nombre de divisions d'une échelle AB placée à 200 mètres de distance.

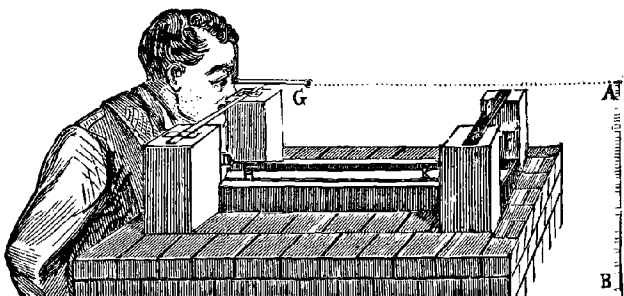


Fig. 226. — APPAREIL DE LAVOISIER ET LAPLACE.

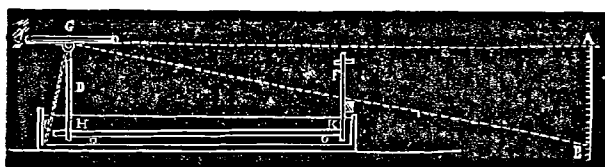


Fig. 227.

lorsque la barre placée dans la cuve a été amenée à la température de  $0^{\circ}$ . Si l'on élève cette température à un certain degré, soit  $15^{\circ}$ , la barre KH s'allonge, pousse la règle D et, conséquemment, fait baisser la lunette; le fil micrométrique se trouve donc en face d'une autre division de l'échelle AB. La température de la barre étant connue au moyen d'un thermomètre, on voit quel angle du fil micrométrique correspond à cette élévation de température.

Il est facile de déduire alors l'allongement de la barre (*fig.* 227). Soit CH

cette longueur, et GB la nouvelle direction du fil micrométrique; nous aurons les deux triangles  $GHC$  et  $ABC$  qui sont semblables, comme ayant leurs côtés perpendiculaires; d'où cette égalité  $\frac{HC}{AB} = \frac{GH}{AG}$ . De même, représentant par  $HC'$  un autre allongement et par  $AB'$  la division correspondante de l'échelle, nous aurons :  $\frac{HC'}{AB'} = \frac{GH}{AH}$ . La relation entre le prolongement de la barre et les déviations du fil sont donc constantes; supposons qu'elles

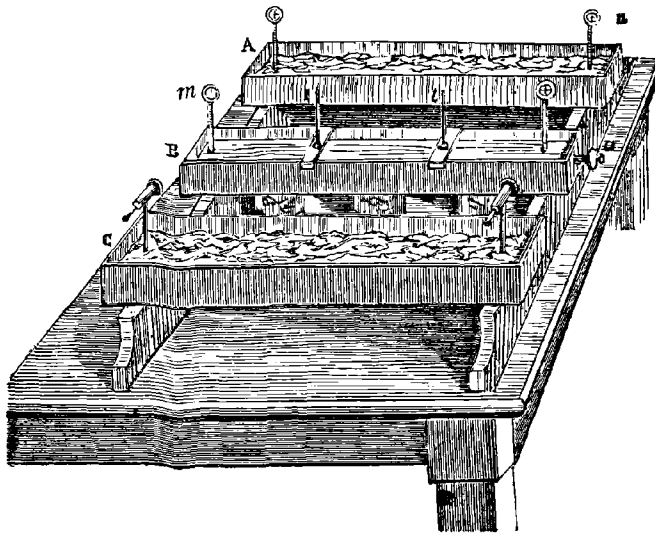


FIG. 228. — APPAREIL RAMSDEN.

soient dans le rapport  $\frac{GH}{AG}$ . Une expérience préliminaire nous a montré que ce rapport était, par exemple, de  $\frac{1}{744}$ . Il en résulte que  $\frac{HC}{AB} = \frac{1}{744}$ , d'où  $HC = \frac{AB}{744}$ , c'est-à-dire que l'allongement total de la barre s'obtient en divisant par 744 la distance parcourue sur l'échelle par le fil micrométrique de la lunette. Cette prolongation étant connue, en la divisant par la longueur de la barre à 0° et par la température obtenue ensuite de la barre, on obtient la dilatation pour l'unité de longueur et pour une élévation d'un seul degré, c'est-à-dire le coefficient de dilatation.

Il existe un autre appareil imaginé en 1787 et construit par Ramsden. Cet appareil (*fig.* 228) se compose de trois cuves métalliques parallèles de un ou deux mètres de large. Dans celle du milieu on place, après lui avoir donné la forme d'une barre prismatique, la barre du métal

dont on veut connaître le coefficient de dilatation, et dans les deux autres cuves des barres de fer d'une longueur identique à celle de la barre à expérimenter. Ces trois barres sont armées à leurs extrémités de tringles verticales, qui supportent, dans les cuves A et B, de petits disques de verre sur les cercles desquels sont tendus des fils micrométriques croisés, et dans la cuve C des lunettes renfermant également un fil micrométrique.

Les trois cuves étant pleines d'eau, et les trois barres placées à la température 0°, les points de rencontre des fils des disques et de la lunette sont sur une ligne parfaitement horizontale. Si, au moyen de lampes à alcool, on élève la température de l'eau de la seconde cuve à 100°, la barre qu'elle contient se dilatera; et comme une extrémité de celle-ci est en contact avec la pointe d'une vis  $a$  fixée en la paroi de la cuve, la dilatation se produira dans le sens  $nm$ , et, en plaçant au moyen de la lunette les trois disques du côté  $n$  en une ligne parfaitement droite, le disque  $m$  déviara de la ligne CBA d'une longueur exactement égale à la dilatation. Mais, puisque la vis  $a$  est unie à la barre, elle dépasse la paroi à droite et à gauche, et si on la porte dans le sens  $mn$ , de façon à ce que la ligne CBmA soit parfaitement horizontale, ce qui dépassera la paroi aura une longueur exactement égale à la prolongation de la barre. Et comme on a calculé préalablement le nombre de tours du pas de vis correspondant à une longueur donnée, on connaît la longueur de la dilatation, et, au moyen des mêmes calculs que ceux employés dans la précédente expérience, on déduit le coefficient de dilatation du corps en expérience.

#### RELATIONS ENTRE LES DIFFÉRENTS COEFFICIENTS DE DILATATION. —

En doublant le coefficient de dilatation linéaire d'un corps solide on obtient son coefficient de dilatation superficielle, et en le triplant on obtient son coefficient de dilatation cubique. Ceci se démontre ainsi par le calcul.

Soit un cube d'un corps solide ayant l'unité de longueur pour côté, son volume sera l'unité de volume. Désignant par  $l$  le coefficient linéaire de ce corps, et par  $c$  son coefficient cubique, chaque arête deviendra, en augmentant la température d'un degré  $1 + l$  et le volume  $1 + c$ .

Le cube, après cette dilatation, est resté semblable à lui-même. Or on démontre en géométrie que le volume d'un cube est égal au cube de son arête; on a donc

$$1 + c = (1 + l)^3;$$

d'où

$$\begin{aligned} 1 + c &= 1 + 3l + 3l^2 + l^3 \\ c &= 3l + 3l^2 + l^3. \end{aligned}$$

Mais  $\lambda$  est une quantité très petite correspondant à des unités de 5<sup>e</sup> ordre; on peut donc devant  $\lambda$  négliger  $\lambda^2$  et  $\lambda^3$ , et l'on a :

$$c = 3\lambda,$$

formule de la dilatation cubique.

Par un raisonnement analogue, on démontre que le coefficient de dilatation superficielle est *sensiblement* le double du coefficient linéaire.

Nous donnons un tableau des coefficients de dilatation linéaire des principaux solides; il est facile, après ce que nous avons dit, de calculer leurs coefficients de dilatation superficielle ou cubique.

Tableau des coefficients de dilatation linéaire des solides.

NOMS DES CORPS.	COEFFICIENTS.	AUTEURS.	NOMS DES CORPS.	COEFFICIENTS.	AUTEURS.
Acier .....	0,000010791	Lavoisier et Laplace.	Cuivre laiton en fil....	0,000019333	SMEATON.
Acier.....	0,000011600	DE LUC.	Cuivre rouge.....	0,000017840	BORDA.
Acier.....	0,000011301	STRUYE.	Cuivre rouge.....	0,000017182	DULONG et PETIT.
Acier.....	0,000011899	TROUGHTON.	Étain fin .....	0,000022833	SMEATON.
Acier trempé.....	0,000012250	SMEATON.	— de Falmouth....	0,000021730	Lavoisier et Laplace.
Acier recuit à 37°,5 ..	0,000013690	Lavoisier et Laplace.	Fer .....	0,000011821	DULONG et PETIT.
Acier recuit à 31°,2 ..	0,000012396	Lavoisier et Laplace.	— entre 0° et 300°..	0,000014684	DULONG et PETIT.
Aluminium .....	0,000022239	WINNERT.	— doux forgé.....	0,000012205	Lavoisier et Laplace.
Antimoine.....	0,000010833	SMEATON.	Fil de fer.....	0,000014401	TROUGHTON.
Argent.....	0,000020826	TROUGHTON.	Fonte de fer .....	0,000011100	ROY.
Argent de coupelle...	0,000019097	Lavoisier et Laplace.	Granit.....	0,000008683	BARTLETT.
Bismuth.....	0,000013917	SMEATON.	Marbre blanc.....	0,000010720	DUNN et SANG.
Bois de sapin.....	0,000003520	STRUYE.	Marbre noir.....	0,000004260	DUNN et SANG.
Bois de sapin.....	0,000004959	KATER.	Or .....	0,000014010	ELLICOT.
Briques ordinaires....	0,000005502	ADIE.	Pierre à bât. de Vernon	0,000004303	DESTIGNY.
Briques dures .....	0,000004928	ADIE.	— de Saint-Leu...	0,000006489	DESTIGNY.
Bronze.....	0,000018492	DANIELL.	— de Caithness...	0,000008947	ADIE.
Bronze { cuivre jaune 16 étain 1	0,000019083	SMEATON.	— de Arbroath...	0,000008985	ADIE.
	0,000018167	SMEATON.	Pierre calcaire blanche	0,000002501	VICAT.
Cadmium.....	0,000031300	H. KOPP.	Platine.....	0,000008842	DULONG et PETIT.
Ciment romain.....	0,000014349	ADIE.	Platine entre 0° et 300°.	0,000009183	DULONG et PETIT.
Cuivre jaune.....	0,000018230	ELLICOT.	Tubes de baromètre..	0,000008333	SMEATON.
— fondu.....	0,000018750	SMEATON.	Verge pleine (moyenne).	0,000008083	ROY.
— anglais en barre	0,000018930	ROY.	Règle.....	0,000008613	DULONG et PETIT.
— de Hambourg.....	0,000018550	ROY.	Verre entre 0° et 200°.	0,000009225	DULONG et PETIT.
— du Tyrol en pl.	0,000019030	HORNER.	— entre 0° et 300°.	0,000010108	DULONG et PETIT.
— en fil.....	0,000018850	HERBERT.	Glaces de Saint-Gobain	0,000008909	Lavoisier et Laplace.
— laiton.....	0,000018782	Lavoisier et Laplace.	Flint anglais.....	0,000008167	Lavoisier et Laplace.
			Flint français.....	0,000008720	Lavoisier et Laplace.
			Zinc fondu.....	0,000029417	SMEATON.

USAGE DES COEFFICIENTS DE DILATATION DES CORPS SOLIDES. — Nous avons cité plusieurs cas dans lesquels la connaissance des coefficients de dilatation des corps solides est utile; il en est un grand nombre d'autres. Les thermomètres métalliques sont construits en s'appuyant sur la loi de dilatation des corps par la chaleur, et celui de M. Bréguet, entre autres

(page 423), est basé sur la connaissance des différents coefficients de dilatation des métaux employés.

Nous avons également dit (page 134) qu'il fallait considérer, parmi les causes de variation des horloges, la température, qui, en vertu des lois de dilatation des corps par la chaleur, tend à allonger ou à raccourcir le pendule. On obvie à cette cause de variation au moyen des *pendules compensateurs*.

**PENDULES COMPENSATEURS.** — Le plus employé des pendules compensateurs est le *pendule à grill*, inventé par le célèbre horloger anglais Harrison (1693-1776). Il est composé (*fig. 229*) de tiges d'acier et de laiton soutenant une lentille très pesante. Au point de suspension est la tige d'acier supportant un cadre aussi en acier, qui supporte à son tour un cadran de laiton ; ce dernier en supporte encore un en acier, qui de nouveau en supporte un en laiton. A la barre supérieure de ce dernier est fixée la tige de fer à laquelle est attachée la lentille. La dilatation des tiges verticales d'acier est compensée par celle des tiges de laiton. La différence des longueurs à donner à ces tiges dépend de la différence des coefficients de dilatation de l'acier et du laiton.

M. Martin, horloger à Paris, est l'inventeur d'un autre *pendule compensateur* qui porte son nom. Sur la tige du pendule (*fig. 230*) il place perpendiculairement une tige formée de deux lames superposées de métaux ayant des coefficients de dilatation différents. Une boule pesante est à chacune des extrémités de cette tige. Si la température s'abaisse, comme le métal le plus dilatable est sur l'autre, la lame inférieure se contracte plus que la lame supérieure, la tige se recourbe en bas; les boules s'abaissent et ainsi abaissent le centre de gravité du système, et, en conséquence, le pendule s'allonge. Quand la température s'élève, le contraire a lieu.

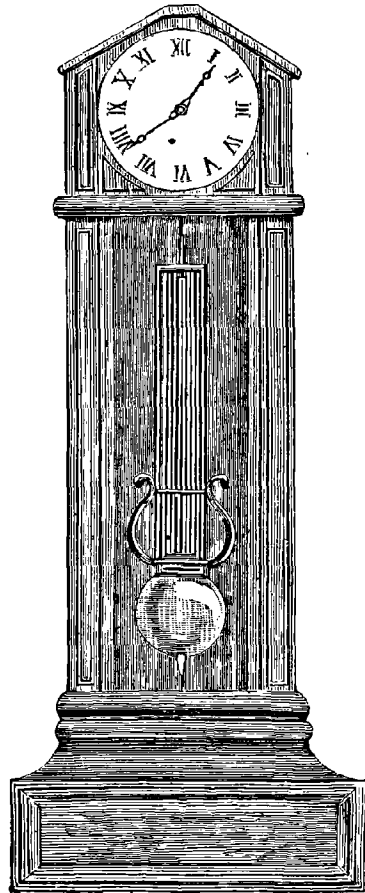


Fig. 229. — COMPENSATEUR A GRILL.

Le *pendule compensateur Leroy* (fig. 231) est un tube de laiton AB dans lequel passe une tige d'acier CDEH divisée en deux parties rejointes par une tige d'acier DE, flexible à la hauteur d'une fente taillée en biseau, placée dans une traverse KL fixe, et sur laquelle repose le tube de laiton. Le véritable point de suspension du pendule est évidemment à cette fente,

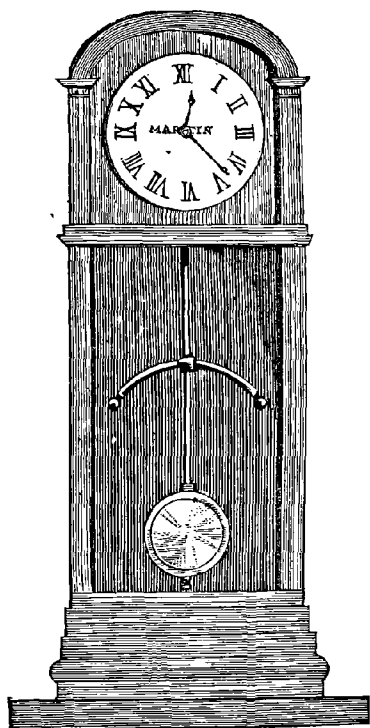


Fig. 230. — COMPENSATEUR MARTIN.

et sa distance au centre d'oscillation donne la longueur du pendule (page 116). En se dilatant sous l'influence d'une élévation de température, le tube de laiton et, par suite, le point de suspension de la tige d'acier du pendule remonte et compense ainsi l'allongement de la tige.

Dans le *compensateur Brocot* (fig. 232), la tige de fer  $t$ , qui supporte la lentille, est fixée à une traverse AB à laquelle sont adaptées deux tiges de laiton  $vv$  qui peuvent se dilater librement par leur extrémité inférieure. Ces extrémités inférieures reposent sur des leviers  $l, l$  agissant eux-mêmes sur la lentille. Quand la tige de suspension s'abaisse en se dilatant, les tiges, appuyant sur les leviers, relèvent la lentille, et la compensation s'effectue.

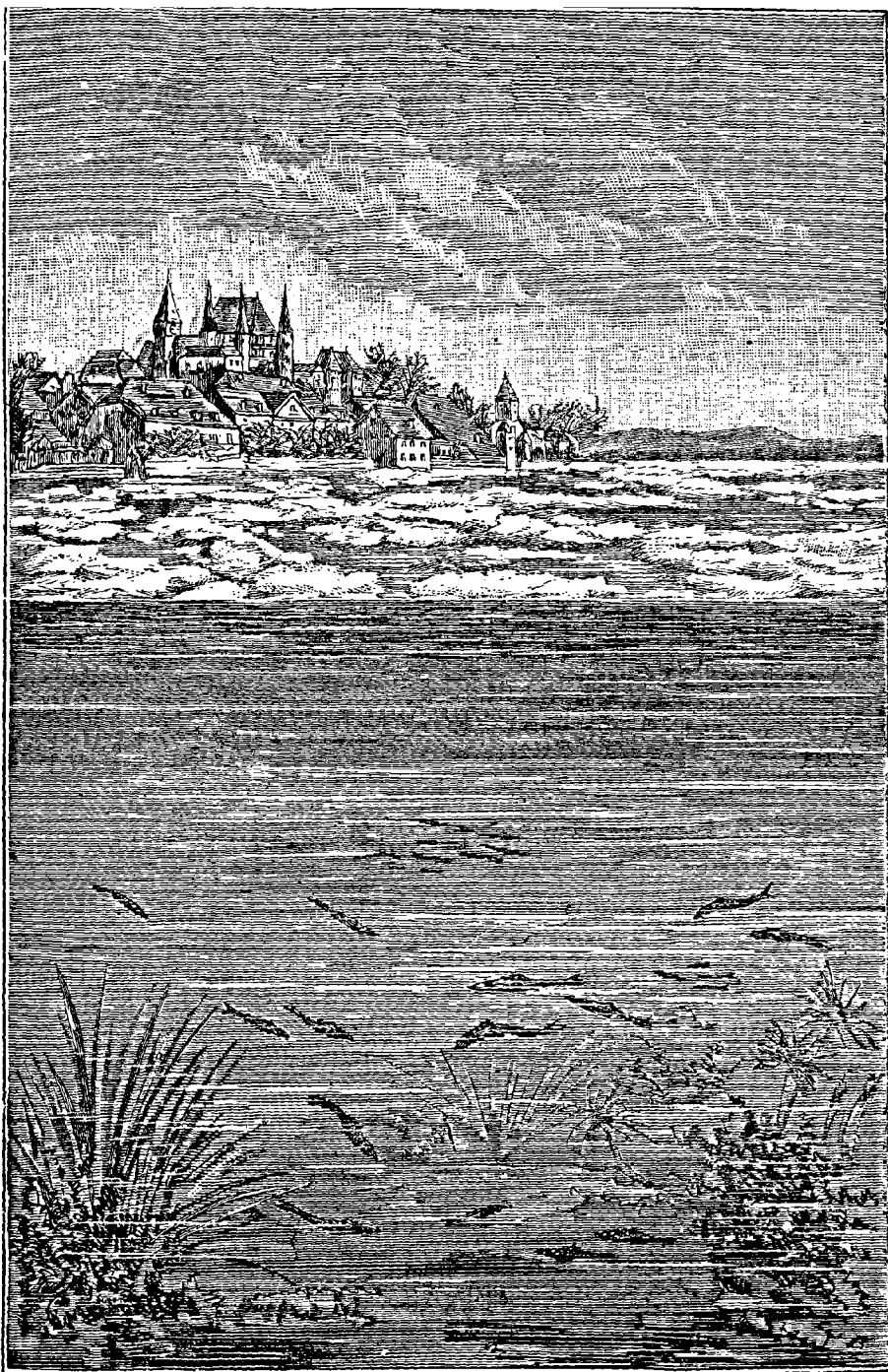
Le *compensateur Graham*, un des plus ingénieux (fig. 233), est formé d'une tige d'acier qui soutient à son extrémité inférieure une plaque de fer sur laquelle sont fixés deux cylindres de cristal en partie remplis de mercure. Lorsque la température allonge la tige et abaisse le centre de suspension, elle dilate en même temps le mercure, qui s'élève dans le cylindre et relève aussitôt le centre de suspension; il y a donc compensation, la quantité de mercure à placer dans les cylindres et le diamètre de ces cylindres ayant d'abord été calculés en conséquence.

Sur le principe des *lames de compensation* employées dans le compensateur Martin, comme dans le thermomètre Bréguet, est fondée la compensation des montres et des chronomètres, et cela a permis de donner à ces instruments, employés dans la marine et pour les observations scientifiques, la précision qui les caractérise.

Le régulateur de ces instruments est un balancier consistant en une



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Une infinité d'êtres n'ont à redouter, dans le lac de Genève, ni les grandes chaleurs  
ni les froids excessifs (page 450).



roue évidée (fig. 234), roue mise en mouvement par un *ressort spiral*, et formée de lames de métaux inégalement dilatables, le plus dilatable étant placé sur les autres, en dehors. Ces lames sont terminées par de petites masses. Quand la température s'élève, chaque point du balancier, se dilatant, tendrait à s'éloigner du centre, et l'instrument retarderait, puisque la durée des oscillations dépend du rayon du balancier ; mais les masses

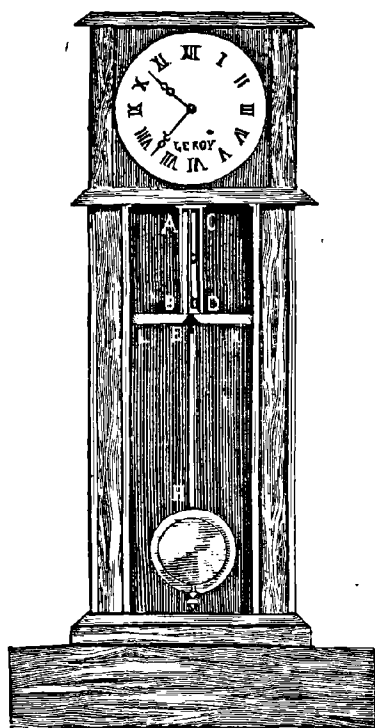


Fig. 231. — COMPENSATEUR LEROY.

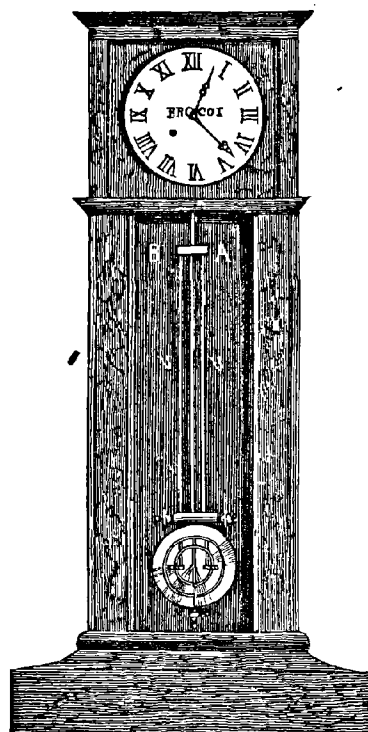


Fig. 232. — COMPENSATEUR BROCOU.

se rapprochent alors, et il y a compensation. De même, les masses s'éloignent et compensent lorsque, la température s'abaissant, le balancier tendrait à se rapprocher du centre en se contractant.

#### APPLICATIONS DIVERSES DE LA DILATATION DES CORPS SOLIDES. —

Nous avons parlé de quelques-uns des cas où la dilatation des corps solides intéresse l'industrie. Citons une occasion fameuse dans laquelle a été utilisée cette force de dilatation. Nous voyons, d'après le tableau des coefficients de dilatation ci-dessus, et d'après les formules données relatives à la force de traction (page 51) qu'il faudrait une traction de 250,000 kilo-

grammes environ pour accroître de  $\frac{1}{1200}$  de millimètre l'arête d'un cube

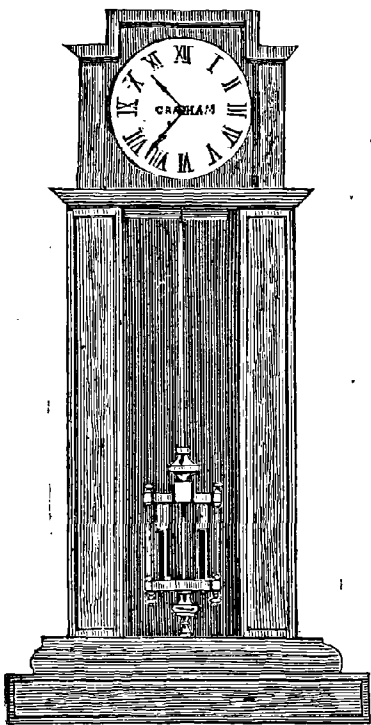


Fig. 233. — COMPENSATEUR GRAHAM.

de fer de 1 décimètre de côté, et que la seule élévation de  $0^{\circ}$  à  $100^{\circ}$  produit le même résultat. M. Humbert de Molard s'est servi de cette force pour redresser les murs d'une galerie du Conservatoire des Arts-et-Métiers. Ces murs soutenaient une voûte et, sous la poussée de cette voûte, s'étaient écartés et menaçaient de s'écrouler. L'architecte établit des barres de fer horizontales qui traversaient les murs opposés, et qui, terminées extérieurement par de grands X en fer, soutenaient les parois. Ces grands X étaient maintenus par des écrous. On chauffa fortement les barres de fer, de deux en deux, elles se dilatèrent; on put davantage enfoncer les écrous correspondants, et quand arriva le refroidissement, ces barres de fer, se contractant, relevaient les murailles. On chauffa les autres barres, on resserra leurs écrous; elles se contractèrent et produisirent le même résultat. Après avoir ainsi opéré pendant un certain temps, on a obtenu un redressement complet.

Pour assembler les plaques de tôle qui forment les chaudières à vapeur, on rive les clous à chaud; le clou étant porté au rouge, on l'enfonce et l'on rive immédiatement. Le clou, en se refroidissant, se contracte, diminue de longueur et, conséquemment, serre fortement les plaques assemblées.

#### EXCEPTIONS A LA LOI GÉNÉRALE DE DILATATION DES SOLIDES PAR LA CHALEUR.

Nous verrons tout à l'heure que, parmi les liquides, l'eau fait exception à la règle générale de dilatation. Parmi les corps solides, quelques-uns, entre autres le bois, certaines terres

de fer de 1 décimètre de côté, et que la seule élévation de  $0^{\circ}$  à  $100^{\circ}$  produit le même résultat. M. Humbert de Molard s'est servi de cette force pour redresser les murs d'une galerie du Conservatoire des Arts-et-Métiers. Ces murs soutenaient une voûte et, sous la poussée de cette voûte, s'étaient écartés et menaçaient de s'écrouler. L'architecte établit des barres de fer horizontales qui traversaient les murs opposés, et qui, terminées extérieurement par de grands X en fer, soutenaient les parois. Ces grands X étaient maintenus par des écrous. On chauffa fortement les barres de fer, de deux en deux, elles se dilatèrent; on put davantage enfoncer les écrous correspondants, et quand arriva le refroidissement, ces barres de fer, se contractant, relevaient les murailles. On chauffa les autres barres, on resserra leurs écrous; elles se contractèrent et produisirent le même résultat.

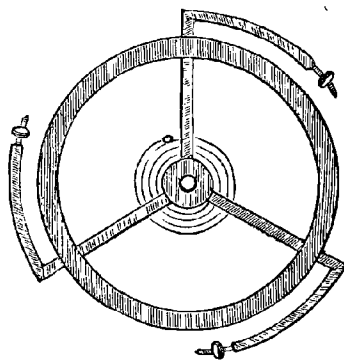


Fig. 234.  
COMPENSATEUR DES CHRONOMÈTRES.

argileuses, se contractent par la chaleur. Cela tient à ce que ces solides, ayant des pores assez grands pour contenir beaucoup d'eau, cette eau s'évapore quand elle est chauffée et permet aux particules de ces corps de se rapprocher. Le caoutchouc vulcanisé (c'est-à-dire auquel on a incorporé du soufre, soit directement, soit au moyen du sulfure de carbone ou du chlorure de soufre) se contracte réellement par l'action de la chaleur lorsqu'il est fortement tendu et qu'il possède toute son élasticité. Le caoutchouc ordinaire non tendu est soumis aux lois ordinaires de la dilatation. Il est probable qu'une certaine disposition des molécules

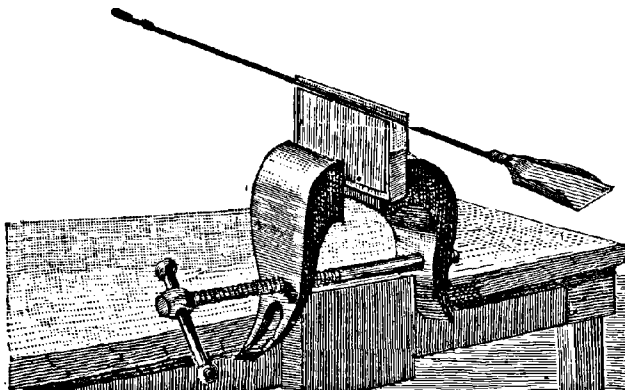


Fig. 235. — EXPÉRIENCE DE TREVELYAN.

du caoutchouc vulcanisé permet à la chaleur de les rapprocher les uns des autres en surmontant les forces intérieures qui les unissent.

**PHÉNOMÈNES RÉSULTANT DE LA DILATATION DES SOLIDES.** — Parmi les effets de la dilatation des solides, rapporte M. Cazin, que nous avons

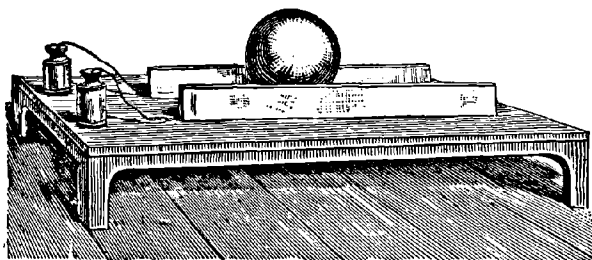


Fig. 236. — EXPÉRIENCE DE M. GORRE.

déjà cité un peu plus haut, il en est un très curieux que tout le monde peut observer. Il a été découvert en 1805, dans une fonderie de Saxe, par M. Schwartz. Un lingot d'argent très chaud ayant été posé sur une enclume froide, il se mit à trembler en produisant un son musical. Ce phénomène fut observé depuis par M. Trevelyan, en Angleterre, un jour qu'il avait appuyé sur une masse de plomb froide un fer à souder très chaud. Voici une forme que M. Tyndall a donnée à cette expérience.

On fixe parallèlement dans un étau deux lames de plomb (*fig.* 235) en les séparant par un morceau de bois d'un centimètre de largeur;

puis on chauffe une pelle à feu et on la pose en équilibre sur le bord d'une des lames. Elle oscille alors d'une lame à l'autre, et l'on entend un son qui peut être très pur, si l'on soutient légèrement avec le doigt le manche de la pelle.

Expliquons ce phénomène.

Le plomb est échauffé en un de ses points par le contact de la pelle ; il se dilate en ce point, et un petit mamelon se forme brusquement en faisant basculer la pelle ; elle retombe sur la seconde lame, où le même effet est produit ; la pelle revient donc sur la première et oscille tant qu'elle est assez chaude pour former un mamelon suffisant sur le plomb qu'elle touche. Cette oscillation est un mouvement vibratoire qui se propage dans l'air jusqu'à notre oreille et y détermine la sensation d'un son s'il est assez rapide ; le son est d'autant plus aigu que les oscillations se succèdent plus vite.

M. Gorre a disposé une autre expérience qui s'explique de la même manière.

Deux rails de cuivre (*fig.* 236) sont placés à une distance de 2 centimètres l'un de l'autre sur une planche de bois, et une boule creuse de cuivre peut rouler très aisément sur ces rails. On attache à l'extrémité de chacun d'eux un fil de cuivre, et on fait aboutir les deux fils au pôle d'une pile voltaïque. Le courant électrique passe par les rails et la boule de cuivre, et il échauffe fortement le rail au point qui touche la boule, parce qu'en ce point la résistance au courant est très grande. Un mamelon se forme donc et la boule est soulevée ; elle cesse d'être en équilibre ; elle vibre d'abord un peu ; puis, un nouveau mamelon se formant à chaque nouveau point de contact, elle se met à rouler.

#### DILATATION APPARENTE ET DILATATION ABSOLUE DES LIQUIDES. —

Les liquides, comme les solides, se dilatent par la chaleur (page 408) ; mais, comme les vases dans lesquels ils sont contenus sont également sujets à la loi de la dilatation, leur propre dilatation ne peut être constatée d'abord avec exactitude. Nous avons remarqué que les indications du thermomètre à mercure sont fondées, non pas absolument sur la dilatation du mercure, mais sur sa dilatation apparente, c'est-à-dire sur la différence entre sa propre dilatation et celle du verre, et qu'il y avait à tenir compte de cette cause possible d'erreur (page 421). Le *coefficient de la dilatation apparente* d'un liquide varie évidemment avec la nature du vase ; on l'obtient en mesurant le volume d'une masse quelconque de liquide à 0°, puis en mesurant le volume apparent de la même masse portée à une température plus élevée, et, à l'aide du même raisonnement que

nous avons employé pour déterminer les coefficients de dilatation des corps solides (page 434), on obtient son coefficient de dilatation apparente. Il est évident que, pour les liquides, on n'a à s'occuper que de la dilatation cubique.

Le coefficient de la dilatation absolue d'un liquide, le seul qu'il importe vraiment de connaître, est sensiblement égal à la somme du coefficient de dilatation apparente de ce liquide et du coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe.

Cela résulte des admirables travaux accomplis par MM. Dulong (1) et Petit (2), et des considérations théoriques qu'ils ont présentées dans leurs recherches sur la dilatation absolue des liquides.

L'appareil (fig. 237) dont ils se servirent se compose de deux tubes pleins de mercure communiquant entre eux par un tube très étroit. Le tube B étant entouré de glace, le mercure est à 0° et s'élève à une hauteur  $h$ , bien inférieure à la hauteur  $h'$  à laquelle est monté le mercure du tube A porté à une température quelconque. Ces hauteurs sont en raison inverse du rapport des densités, d'après le second principe des *vases communicants* (page 191). Désignant alors par  $h$  et  $d$  la hauteur et la densité du mercure à 0° dans la branche B, et par  $h'$  et  $d'$  la hauteur et la densité du mercure dans la branche A à  $t$ , nous aurons :  $\frac{h}{h'} = \frac{d'}{d}$ . Appelons encore  $v$  le volume du mercure dans A à 0°, et  $v'$  le volume de ce mercure porté à  $t$ , ces volumes seront aussi en raison inverse des quantités, puisque le poids du mercure reste le même, nous aurons donc :

$$\frac{v}{v'} = \frac{d'}{d} = \frac{h}{h'}$$

d'où

$$\frac{v' - v}{v} = \frac{h' - h}{h}$$

Divisant par  $t$  les deux membres de cette égalité, on a :

$$\frac{v' - v}{vt} = \frac{h' - h}{ht}$$

(1) DULONG (Pierre-Louis), né à Rouen (1785-1838), quitta la médecine pour s'occuper exclusivement de physique et de chimie. Successivement, il fut professeur à l'École vétérinaire d'Alfort, à l'École normale, à l'École polytechnique, dont il devint directeur des études, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, professeur à la Faculté des sciences. Ses recherches en chimie sont précieuses. En 1812, il découvrit le *chlorure d'azote*, et, en faisant des expériences sur ce gaz dangereux, il perdit, par suite d'une explosion, un œil et un doigt.

(2) PETIT (Alexis-Thérèse), né à Vesoul (1791-1821), savant physicien, beau-frère d'Arago.

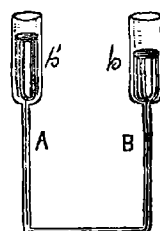


Fig. 237.

DILATATION  
ABSOLUE  
DES LIQUIDES.

égalité dont le premier membre représente le coefficient  $K$  de la dilatation absolue du mercure.

Donc 
$$K = \frac{h' - h}{ht}.$$

MM. Dulong et Petit avaient cherché seulement le coefficient de dilatation absolue du mercure; ils s'étaient servis pour cela de l'appareil ci-dessus, disposé d'une autre sorte, qu'il nous semble peu utile de décrire ici. Ils ont trouvé que le coefficient de dilatation absolue du mercure, entre  $0^\circ$  et  $100^\circ$ , est égal à 0,00018018. Au-dessus, la dilatation marche plus vite; de sorte que le coefficient moyen entre  $100^\circ$  et  $300^\circ$  est de 0,00018766. De  $-39^\circ$  à  $+100^\circ$ , la dilatation absolue est très régulière; au delà, elle cesse de l'être.

Voici le tableau des coefficients de dilatation des principaux liquides :

NOMS DES CORPS.	COEFFICIENTS.	NOMS DES CORPS.	COEFFICIENTS.
Alcool de vin.....	0,0010436	Éther sulfureux.....	0,0009905
Alcool de pommes de terre..	0,0008900	Éther sulfhydrique.....	0,0011964
Brome.....	0,0010332	Esprit de bois.....	0,0011856
Chloroforme.....	0,0011071	Liqueur des Hollandais.....	0,0011189
Éther.....	0,0015132	Mercurc.....	0,0001803
Éther acétique.....	0,0012585	Sulfure de carbone.....	0,0011398
Éther chlorhydrique.....	0,0015575	Térébène.....	0,0008966

**MAXIMUM DE DENSITÉ DE L'EAU.** — L'eau présente une exception remarquable et unique à la loi de dilatation des corps liquides. Jusqu'à  $4^\circ$  au-dessus de  $0^\circ$ , son volume diminue selon la loi, à mesure qu'elle se refroidit; mais, à partir de cette température, si l'on continue à la refroidir, elle se dilate au lieu de se contracter et augmente de volume jusqu'au point de congélation. La densité de tous les corps augmente à mesure qu'ils se contractent; pour l'eau, son maximum de densité est à  $4^\circ$  au-dessus de zéro.

« Nous prenons ici la nature, selon l'expression de Tyndall, sur le fait d'un arrêt dans sa marche ordinaire, d'un renversement dans ses habitudes. » Cette anomalie est le principe d'une grande loi terrestre.

Le célèbre physicien B. de Saussure a reconnu, par ses expériences sur le lac de Genève, que la température du fond des lacs est toujours de  $4^\circ$  en toute saison: nous en connaissons maintenant la raison. Pendant les nuits d'automne, la surface de l'eau se refroidit; lorsque la première couche est à  $4^\circ$ , elle est le plus dense possible et tombe, tandis que la



seconde couche vient prendre sa place. Celle-ci atteint à son tour 4° et tombe aussi, pour être remplacée par la troisième, et ainsi de suite. Il y a donc un courant descendant de particules d'eau à 4°, et un courant ascen-



Redressement d'une salle du Conservatoire des Arts-et-Métiers (page 444),

dant de particules plus chaudes ; de sorte que la température décroît progressivement de la surface au fond, où elle est de 4° exactement. Lorsque, pendant le jour, le soleil envoie ses rayons sur le lac, les couches superficielles s'échauffant deviennent moins denses et restent à leur place ;

de plus, elles absorbent la chaleur solaire et l'empêchent d'atteindre les couches situées au fond. A mesure que la saison s'avance, le refroidissement nocturne devient prédominant, et il y a un moment où la température est à  $4^{\circ}$  dans toute l'épaisseur du lac. Arrive l'hiver : les couches de la surface se refroidissent au-dessous de  $4^{\circ}$ ; elles deviennent moins denses et conservent encore leur position. La température croît de la surface, où elle peut être zéro, jusqu'au fond, où elle reste toujours  $4^{\circ}$ .

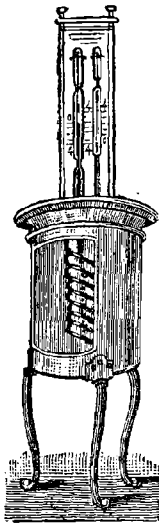


Fig. 238.

DENSITÉ DE L'EAU.

Quand la surface est à  $0^{\circ}$  degré, l'eau qui s'y trouve s'y congèle lentement; de petites aiguilles de glace se forment et flottent, parce qu'elles sont moins denses que l'eau : ballotées par le vent, elles grossissent en congelant l'eau qui les touche; elles deviennent des glaçons qui se soudent les uns aux autres, et bientôt une nappe de glace couvre le lac. Cette nappe préserve du refroidissement les couches inférieures, et la température de celles-ci se maintient pendant tout l'hiver. Quand les chaleurs reviennent, la glace fond; tant que l'eau produite est à  $0^{\circ}$ , elle reste à la surface; ce n'est qu'après un échauffement prolongé qu'elle atteint  $4^{\circ}$ , de sorte qu'au printemps il y a un moment où cette température règne de nouveau dans toute l'étendue du lac. En été, les couches superficielles sont les plus chaudes, et si le lac est assez profond, elles empêchent la chaleur solaire de pénétrer jusqu'au fond. Quant à l'échauffement par conductibilité, il est excessivement faible, parce que l'eau conduit mal la chaleur. En résumé, grâce au maximum de densité, la chaleur est comme emmagasinée au fond des lacs et des mers. Elle y entretient la vie d'une infinité d'êtres, animaux et végétaux, qui n'ont à redouter ni les grandes chaleurs ni les froids excessifs.

On reproduit sur une petite échelle, dans les cabinets de physique, l'image de ce phénomène.

Dans une boîte cylindrique en métal, remplie de glace (fig. 238), on place deux thermomètres, l'un à alcool, l'autre à eau, dont les tubes sortent par le haut de l'appareil. Le réservoir du thermomètre à eau, en raison de la moindre dilatibilité du liquide, est contourné en spirale entourant l'autre thermomètre. Tous les deux marquent  $0^{\circ}$ . Qu'alors on enlève la glace de la boîte de métal, que l'on échauffe l'appareil, on verra l'alcool monter, l'eau descendre, chacun dans leur tube respectif, jusqu'à ce que la température soit à  $4^{\circ}$ ; alors les deux liquides sont sur une même ligne horizontale.

Hobbes a imaginé une expérience plus rigoureuse encore (*fig. 239*) :

Dans une éprouvette en verre et pleine d'eau sont fixés deux thermomètres, l'un en haut, l'autre en bas. Un mélange réfrigérant entoure l'éprouvette. On voit bientôt le thermomètre du fond descendre jusqu'à 4°, tandis que celui qui est au-dessus descend à peine; mais le premier reste stationnaire à 4°, tandis que, peu à peu, le second descend à 0° et bientôt au-dessous jusqu'à la congélation de l'eau qui l'entoure.

Rappelons que c'est parce que l'eau présente son maximum de densité à 4° que, dans le système métrique, on a adopté, pour unité de poids, le poids d'un centimètre cube d'eau distillée, prise à la température de 4°.

#### CONVECTION DE LA CHALEUR DANS LES

**LIQUIDES.** — Lorsque les diverses parties d'un liquide sont ainsi portées à des densités différentes par suite de la différence de leur température, il s'établit donc, entre ces diverses parties, une sorte de courant dont le résultat est de répartir peu à peu la température sur tous les points de la masse. On a donné à ce phénomène le nom de *convection* (du latin *cum*, avec; *vehere*, transporter).

C'est à la convection que sont dus les courants marins dont nous avons parlé (page 190); dans l'atmosphère, elle est la cause principale des vents réguliers; dans l'industrie, les *calorifères à eau* et les *thermosiphons* en sont une application. Nous décrirons ci-après ces appareils, en même temps que ceux qui appliquent les propriétés des gaz et des vapeurs (page 464).

**APPLICATION DES COEFFICIENTS DE DILATATION DES LIQUIDES.** — Le principal usage que l'on fait des coefficients de dilatation des liquides a pour but la correction barométrique (page 277). Il est évident que les observations barométriques, pour être comparables entre elles, doivent toujours être ramenées à une température constante; on prend habituellement pour point de rapport la glace fondante. Cette correction barométrique s'obtient par la formule  $h = \frac{h'}{1 + kt}$ , si nous appelons  $h$  la hauteur de la colonne barométrique à 0°,  $h'$  sa hauteur à  $t$ °, et  $k$  le coefficient de la dilatation absolue du mercure.

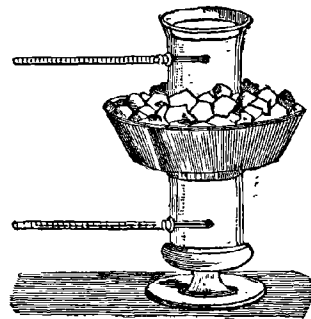


Fig. 239.

EXPÉRIENCE DE HOBBS.

**DILATATION DES GAZ.** — Les phénomènes de dilatation des gaz sont compliqués de changements dans leur force élastique. Ils peuvent en effet : 1° rester sous une pression constante pendant que leur température varie ; 2° conserver un volume constant, et alors leur force élastique varie (page 283) ; 3° changer à la fois de volume et de force élastique.

Ce furent Priestley, Roy, B. de Saussure, A. Prieur, qui les premiers firent des expériences sur la dilatation de l'air atmosphérique, du gaz acide muriatique, de l'azote, de l'hydrogène, de l'oxygène, etc. De ces expériences, A. Prieur avait conclu que les gaz augmentent de volume en suivant une loi particulière pour chaque espèce de gaz. Attaqués par

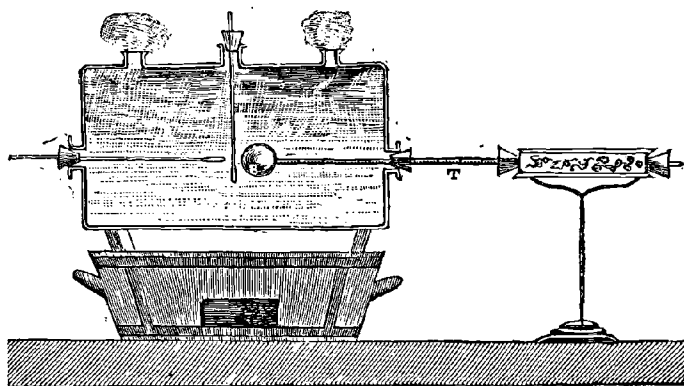


Fig. 240. — APPAREIL DE GAY-LUSSAC.

Laplace, les résultats des physiciens nommés ci-dessus furent examinés en 1807 par Gay-Lussac, sous la direction de Berthollet et de Laplace.

Gay-Lussac renfermait le gaz sur lequel il opérait (*fig. 240*) dans un ballon de verre B, après l'avoir fait passer, pour le dessécher, dans un tube T, rempli de chlorure de calcium fondu. Le long tube soudé au ballon était gradué et renfermait une petite gouttelette de mercure qui limitait le gaz sans l'empêcher de se dilater et qui servait d'index. Le ballon était placé dans une étuve, amené d'abord à 0°, puis porté à 100° ; on voyait alors le long du tube l'index avancer, et l'on notait ainsi l'accroissement du volume du gaz à tel degré de température.

Presque au même moment, Davy et Dalton, en Angleterre, un peu plus tard, Dulong et Petit, trouvèrent à peu près les mêmes résultats que Gay-Lussac, et les trois lois qu'établit ce dernier étaient regardées comme irrévocablement établies :

1° *La dilatation de tous les gaz est pour chaque degré de la 267<sup>e</sup> partie ou des 0,00375 du volume à 0° ;* 2° *tous les gaz se dilatent uniformément*

comme l'air, et, pour tous, le coefficient de dilatation reste le même; 3° la dilatation des gaz est indépendante de la pression.

Rudberg à Upsal, Magnus à Berlin, M. Regnault à Paris, ont prouvé depuis, après les expériences les plus soignées et en modifiant les appareils, que les lois de Gay-Lussac n'étaient pas rigoureusement exactes. M. Regnault, après les études les plus compliquées (page 281), démontra: 1° que le coefficient de dilatation de 0,003663 doit être substitué au nombre 0,00375; 2° qu'il faut distinguer deux coefficients de dilatation, l'un à volume constant, l'autre à pression constante; 3° que, pour les gaz très compressibles, le premier est plus petit que le second, et que l'inverse se présente pour l'hydrogène, ce qui détruit l'exactitude rigoureuse de la loi de Mariotte (page 30); donc, que la dilatation des gaz est inégale; 4° que la dilatation des gaz croît sous la pression.

Voici le tableau des coefficients de quelques gaz sous un volume constant et sous la pression constante d'une atmosphère.

Hydrogène. . . . .	0,3667	0,3661
Air. . . . .	0,3665	0,3670
Oxyde de carbone. . . . .	0,3667	0,3669
Acide carbonique . . . . .	0,3688	0,3710
Protoxyde d'azote. . . . .	0,3676	0,3719
Acide sulfureux. . . . .	0,3845	0,3903
Cyanogène. . . . .	0,3829	0,3877

**DENSITÉ DES GAZ.** — Nous avons déjà parlé (pages 220 et 278), de la densité des gaz; nous avons dit que cette densité était *le rapport du poids d'un certain volume de gaz, à la température de 0° et à la pression de 760 millimètres, au poids du même volume d'air pris également à 0° et à la même pression.* Nous ajoutons que les difficultés des opérations nécessaires pour déterminer ce rapport étaient fort grandes. M. Regnault (1) en a heureusement triomphé. Il y avait différentes causes d'erreurs. D'abord les températures des gaz contenus dans le ballon étaient très difficiles à déterminer: il y remédia en maintenant les ballons pendant un temps assez long dans la glace fondante, afin qu'ils fussent bien à la température de 0°. De plus, le ballon est pesé dans l'air; il faut donc ajouter à son poids apparent celui de l'air déplacé pour avoir son véritable poids, et cette opération est presque impossible à exécuter avec une grande précision, et d'ailleurs, par suite des modifications atmosphériques, il peut

(1) REGNAULT (Henri-Victor), né à Aix-la-Chapelle en 1810, célèbre physicien et chimiste français, a porté l'art des expériences à un degré d'exactitude inconnu avant lui; il est mort à Paris en 1878.

changer pendant la pesée même. M. Regnault évita ces causes d'erreur en imaginant de faire équilibre au ballon qui sert à peser les gaz avec un autre ballon de même volume et hermétiquement fermé, de sorte que les deux ballons, soumis aux mêmes influences, les détruisent.

Des expériences de ce savant, il résulte que : *A la latitude moyenne de 45° et au niveau de la mer, le poids du litre d'air sec à la température de 0° et sous la pression de 760 millimètres est égal à 1<sup>er</sup>,2927.* Dans les mêmes conditions, le poids d'un litre d'oxygène est donc, en prenant la densité que nous avons donnée (page 279) :

$$1,2927 \times 1,1056 = 1^{\text{er}},429.$$

**APPLICATIONS DE LA DILATATION DES GAZ. — CHAUFFAGE ET VENTILATION.** — La dilatation des gaz présente de nombreuses et importantes applications. Nous verrons ci-après, dans le chapitre consacré à la *Météorologie*, que les dilatations et les contractions qui se produisent dans l'atmosphère sont la cause de certains phénomènes. Nous ne parlerons ici que des applications de la dilatation des gaz au chauffage et à la ventilation.

**CHEMINÉES.** — De tous les moyens de chauffage, le plus répandu, le plus agréable du moins, est la cheminée.

Le foyer des plaisirs est la source féconde.  
 En cercle, un même attrait rassemble autour de l'âtre  
 La vieillesse conteuse et l'enfance folâtre ;  
 Là courent à la ronde, et les propos joyeux,  
 Et la vieille romance, et les aimables jeux ;  
 Là, se dédommageant de ses longues absences,  
 Chacun vient retrouver ses vieilles connaissances.  
 Là s'épanche le cœur ; le plus pénible aveu,  
 Longtemps captif ailleurs, échappe au coin du feu.

La poésie est une charmante Muse qui embellit tout ce qu'elle touche ; sous sa main, chaque objet se pare des plus vives couleurs. Elle a un art merveilleux pour rassembler les ornements et cacher les défauts ; mais elle a le malheur d'être rarement d'accord avec la physique. Ici, par exemple, cette antique cheminée dont Delille nous retrace, dans ce langage enchanteur de la poésie, les agréments et les plaisirs, est pour le physicien le plus pauvre moyen de chauffage. On peut calculer qu'avec les cheminées du *bon vieux temps*, celles qui pouvaient abriter toute une famille sous leur respectable manteau et recevoir quatre ramoneurs de

front dans leur tuyau plus respectable encore, on ne retirait que 1 et demi à 2 pour 100 du calorique développé par la combustion du bois. Quand l'appartement était bien clos, la cheminée fumait; quand les fenêtres ou les portes avaient quelques fissures, des *vents coulis* glaçaient les habitants de la chambre, et l'on était forcé d'avoir recours à ces incommodés, disgracieux et encombrants *paravents* qui disparaissent aujourd'hui. Pour éviter les rhumes et les rhumatismes, le roi-soleil, Louis XIV lui-même, se tenait, dans ses appartements, calfeutré et transi dans une sorte de boîte semblable à une chaise à porteurs.

De nos jours, il est vrai, le chauffage au moyen de cheminées a été quelque peu amélioré; nous jouissons du huitième ou du dixième de la chaleur produite dans le foyer. On consomme annuellement, en France, pour 150 millions environ de combustible, et l'on n'en utilise guère que pour 15 millions; le reste s'envole sur les toits (1). Malgré tous les perfectionnements apportés à la construction des cheminées, elles sont encore le mode de chauffage le plus imparfait et le plus dispendieux.

Lorsqu'on brûle du bois ou du charbon dans un foyer de cheminée, il en résulte aussitôt deux effets différents: émission de chaleur du foyer dans la pièce chauffée, et naissance d'un courant d'air, en vertu duquel l'air de la chambre monte dans la cheminée, tandis que l'air extérieur rentre dans la chambre par les joints des portes et des fenêtres.

Ce mouvement provient de ce que l'air de la cheminée étant plus chaud que celui de la chambre, et par conséquent plus léger, il y a une pression de ce dernier sur le premier, et, par suite, un mouvement de l'air froid vers l'air chaud, entraîné lui-même au dehors. On peut rendre sensible la présence de ces courants, dus aux différences de température, par l'expérience suivante: on ouvre une porte mettant en communication une pièce chauffée avec une pièce qui ne l'est pas, puis on tient vers le haut de la porte une bougie allumée; on voit alors la flamme se diriger de la pièce chaude vers la pièce froide; au contraire, si l'on pose la bougie sur le sol, la flamme se dirige de la pièce froide vers la pièce chaude. Ces deux effets sont dus à un courant d'air chaud qui s'échappe par le haut de la porte, tandis que l'air froid qui vient le remplacer entre par le bas.

Ce courant est ce qu'on appelle *le tirage*. Pour avoir un bon tirage, une cheminée doit remplir plusieurs conditions: la section du tuyau ne doit pas être trop grande, autrement il s'établit à la fois des courants ascendants et des courants descendants, et la cheminée fume; le tuyau

(1) Assegond. *Du chauffage par le gaz*.

de la cheminée doit être suffisamment élevé; car, le tirage ayant pour cause l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure dans le tuyau, cet excès serait sans effet si la colonne d'air chauffé était trop courte; enfin l'air extérieur doit pouvoir pénétrer dans l'appartement où est la cheminée assez rapidement pour répondre à l'appel du foyer. Dans un appartement hermétiquement fermé, le feu ne s'allumerait pas, ou il s'établirait des courants d'air descendants qui rabattraient la fumée dans l'appartement. L'air rentre également en quantité insuffisante par les joints des portes et des croisées.

Ce renouvellement continu de l'air est indispensable. L'air est pour nous un aliment de tous les moments, et l'expérience a appris que 6 mètres cubes d'air par personne et par heure sont nécessaires à l'assainissement des lieux habités, pour obvier aux effets de la viciation de l'air. Or, cette *ventilation* ou renouvellement de l'air peut s'opérer de plusieurs manières. Il y a d'abord la ventilation naturelle, due aux variations diurnes de température; les communications, qu'établissent avec l'air extérieur la cheminée et les portes et fenêtres, déterminent des courants qui marchent tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Si l'air de la chambre est à une plus haute température que l'atmosphère, il s'écoulera par la cheminée; et il s'écoulera, au contraire, par les joints des portes et fenêtres si sa température est inférieure à celle de l'atmosphère. Ce mode de ventilation étant souvent insuffisant, on a construit divers agents mécaniques, ou *ventilateurs*, qui, en peu de temps, peuvent provoquer le renouvellement de l'air d'une enceinte.

La chaleur est un troisième mode de ventilation, et, sous ce rapport, on voit que les cheminées concourent à la salubrité de nos habitations. Mais cet avantage est bien payé par l'énorme déperdition de chaleur qui résulte du départ de l'air à mesure qu'il est échauffé. Conservé dans l'appartement, cet air chaud en élèverait promptement la température; mais il s'échappe au plus vite et se trouve tout aussitôt remplacé par l'air froid de l'extérieur, qui vient incessamment remplir ce tonneau des Danaïdes, incessamment vidé. Considérons six faces au foyer: face supérieure, inférieure, latérales, postérieure et antérieure. On peut admettre que ces six faces émettent chacune la même quantité de calorique rayonnant; mais la face supérieure, en sus de ce calorique rayonnant, laisse perdre une énorme quantité de chaleur qu'emportent avec eux les gaz qui s'échappent du foyer. Il ne se répand guère dans l'appartement que le calorique fourni par la face antérieure, et cet air chaud n'y persiste pas longtemps. C'est ce qui faisait dire à M. Pécelet, auteur d'un ouvrage estimé sur les *Applications de la chaleur*: « Les architectes



comprennent si mal les principes de l'application du calorique que la place la plus chaude d'une maison se trouve sur les toits. »

Serait-il possible de recueillir, sinon tout, au moins partie du calo-



Le roi-soleil se tenait calfeutré et transi dans une sorte de boîte... (page 435).

rique qui s'échappe par la cheminée et qui échauffe ses parois à peu près en pure perte ?

Il faudrait que, dans l'épaisseur des faces supérieure, postérieure, latérales et même inférieure, on ménageât un espace dont la paroi externe

serait formée par la maçonnerie même de la cheminée, et la paroi interne ou la plus rapprochée du foyer, par des plaques de tôle un peu fortes. On aurait ainsi, autour du foyer, un espace rempli d'air ; quatre ouvertures ou bouches, deux supérieures et deux inférieures, pratiquées sur les côtés de la cheminée, à travers la maçonnerie, feraient communiquer cet air

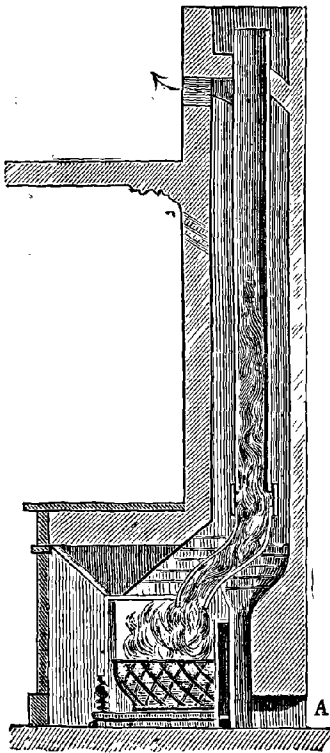


Fig. 241.

CHEMINÉE VENTILATRICE  
DOUGLAS-GALTON.

avec celui de l'appartement. Que se passerait-il ? L'espèce de boîte ainsi formée s'échauffant, l'air qu'elle contient deviendrait plus léger par sa dilatation et s'échapperait dans l'appartement par les ouvertures supérieures, tandis que l'air froid viendrait le remplacer par les ouvertures inférieures ; l'air chaud, incessamment serré par les ouvertures supérieures, rendrait à l'appartement le calorique absorbé par les faces de la cheminée, calorique qui, avec le mode actuel de construction, ne sert qu'à échauffer en vain la maçonnerie. L'orifice de sortie de la fumée serait ménagé au niveau de l'angle dièdre formé par la rencontre des faces postérieure et supérieure.

Dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, Gauger, Rumford, puis successivement L'Homond, Bronzac, Dalesmes, Douglas-Galton, Millet, Pécelet, Joly, ont perfectionné la construction des cheminées et, tout en leur faisant produire le plus de chaleur possible, les ont fait servir, bien mieux que les anciennes, à une bonne et saine ventilation.

Rumford diminua de beaucoup l'orifice supérieur de la cheminée, ce qui accélère en ce point la vitesse de sortie de la fumée, augmente le tirage et empêche un contre-courant de s'établir et de faire fumer ; il avança le foyer, afin de donner un plus vaste champ au rayonnement direct, limita l'intérieur des jambages par des surfaces disposées obliquement, en faïence polie ou en cuivre, pour que tous les rayons fussent réfléchis dans la pièce à chauffer.

L'Homond inventa les *tabliers mobiles*, composés de deux plaques de tôle que l'on élève et que l'on abaisse à volonté, et qui remplacent le soufflet, en donnant un tirage très vif.

Enfin, afin de permettre de fermer les fissures des portes et des

fenêtres au moyen de bourrelets et de rideaux, tout en ayant une ventilation suffisante pour le tirage, on a imaginé les cheminées à *ventouses*, dans lesquelles l'air pris au dehors circule d'abord dans des conduits qui contournent le foyer, s'échauffe et débouche enfin dans la pièce même.

Il existe une foule de dispositions diverses dans la construction de ces cheminées. Nous en reproduisons deux des plus simples.

Dans la cheminée de Douglas-Galton (*fig. 241*), l'air du dehors arrive par une ouverture A dans un conduit qui enveloppe entièrement le tuyau où passe la fumée; il s'y échauffe, puis entre dans la chambre par une seconde ouverture B, placée au plafond, et vient remplacer l'air consommé dans la combustion ou entraîné par le tirage.

La cheminée, système Joly (*fig. 242*), est formée d'un appareil de fonte, et le conduit de la fumée se subdivise en plusieurs conduits par où passent les gaz chauds de la combustion. Tout l'appareil échauffe ainsi la chambre dans laquelle arrive l'air du dehors, et celui-ci, en s'échappant par deux bouches de chaleur latérales, quand sa température est élevée par le contact des parois de l'appareil, contribue à la fois à chauffer l'appartement et à le ventiler.

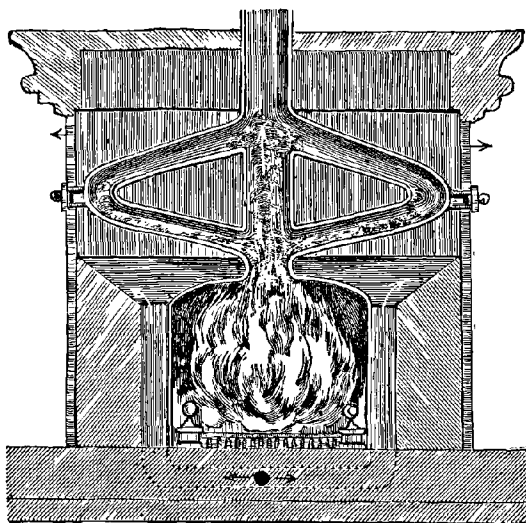


Fig. 242. — CHEMINÉE VENTILATRICE JOLY.

**CAUSES QUI FONT FUMER LES CHEMINÉES.** — Franklin, dès 1742, avait inventé une espèce de poêle ouvert pour mieux chauffer les appartements; c'était une sorte de *cheminée à la prussienne*, dans laquelle l'air froid s'échauffait en entrant. « Ces poêles, raconte-t-il dans ses mémoires, eurent bientôt une grande vogue. Pour l'augmenter encore, j'écrivis et je publiai une brochure ayant pour titre : *Description des foyers pensylvaniens nouvellement inventés, contenant une explication détaillée de leurs effets, où l'on démontre leur supériorité sur toute autre manière de chauffer les appartements, et où l'on répond à toutes les objections qui y ont été faites.* »

Cette brochure énumérait très exactement les causes qui font fumer les cheminées ordinaires. On peut reproduire ces observations, le mal n'ayant guère changé :

1° *Difficulté d'introduction de l'air dans l'appartement.* Si, à l'aide de bourrelets ou par tout autre moyen, on assure la clôture des portes et des fenêtres, la cheminée fume si elle n'a pas de ventouse convenable, parce que l'appel d'air que le tirage produit dans la chambre détermine un vide, et que la différence de pression fait alors rentrer dans la chambre, par la cheminée, de l'air chargé de fumée.

2° *Tuyaux trop larges.* Si les tuyaux sont trop larges, les cheminées fument, parce qu'il se produit deux courants d'air dans le tuyau, l'un ascendant, qui est déterminé par l'air ayant servi à la combustion, l'autre descendant, venant de l'extérieur remplacer l'air du courant ascendant; or, ces deux courants se mêlent toujours dans les points où ils se rencontrent, et le courant descendant ramène ainsi de la fumée dans l'appartement. En rétrécissant l'ouverture du conduit au-dessus du foyer, on remédie à cet inconvénient; la vitesse du courant ascendant, très augmentée par ce rétrécissement, s'oppose à l'introduction dans la cheminée d'un courant descendant. Il faut détruire et rétablir ce rétrécissement avant et après le ramonage.

3° *Foyers trop ouverts.* Beaucoup d'air peut pénétrer dans la cheminée, au-dessus du combustible, et, par suite, sans s'échauffer. Cet air refroidit la fumée, diminue dès lors sa vitesse et peut même la faire tomber dans l'appartement.

4° *Trop petite hauteur de la cheminée.* Cette hauteur influe beaucoup sur le tirage, qui augmente avec la hauteur.

5° *Action de plusieurs foyers les uns sur les autres.* Si deux pièces, communiquant entre elles, ont leurs cheminées allumées, l'air, sollicité à se porter en deux points opposés, se rendra de préférence vers la cheminée qui a le plus fort tirage, et produira dans la seconde un appel d'air de l'extérieur vers la chambre, qui se remplit de fumée.

6° *Communication des tuyaux entre eux.* Souvent le canal d'une cheminée vient déboucher dans le conduit d'une autre; si, alors, l'une des deux cheminées est allumée depuis un certain temps quand on allume l'autre, il peut en résulter que la colonne d'air ascendant, qui passe devant l'orifice du tuyau de la cheminée que l'on allume, ferme en quelque sorte cet orifice et empêche le mouvement de l'air de s'y produire; il peut encore se faire que le conduit d'une cheminée, débouchant dans l'air froid d'un autre canal, s'y refroidisse assez pour retomber dans la pièce sans feu.

7° *Action du soleil.* Quand le soleil frappe les toits auprès d'un tuyau de cheminée, ces toits s'échauffent, et il se forme au-dessus un courant d'air ascendant ; il doit en résulter un contre-courant descendant dans les parties plus froides, et, par suite, à l'intérieur de la cheminée, qui ne reçoit l'action du soleil qu'extérieurement. On empêche ce courant de s'établir en plaçant, au-dessus de l'orifice du tuyau, une sorte de mitre en tuiles.

8° *Influence des vents.* Le vent peut diminuer le tirage d'une cheminée, d'autant plus que ce tirage est plus faible, que la vitesse du vent est plus considérable, que sa direction est plus inclinée sur l'horizon dans le sens du haut en bas ; cette dernière influence est la plus grande, et ce défaut d'horizontalité du vent est souvent le résultat de la présence d'un relief du sol. Quand une ville est à peu de distance d'une colline, il y a toujours une direction du vent pendant laquelle les cheminées de la ville ont toutes plus de tendance à fumer. On remédie à l'influence du vent en accélérant la vitesse de la fumée à l'orifice supérieur de la cheminée. A cet effet, on diminue cet orifice, et, mieux encore, on le munit d'appareils en tôle qui empêchent le vent de pénétrer dans la cheminée et qui peuvent même le faire servir à activer le tirage.

**POÊLES-CALORIFÈRES.** — Bien mieux que la cheminée, le poêle remplit les conditions du problème du chauffage, qui consiste à répandre dans les appartements la plus grande quantité de calorique en brûlant le moins de combustible possible ; car on atteint aisément 90 pour 100 de la chaleur développée par le combustible. Mais il a contre lui des inconvénients nombreux. Il occupe avec ses tuyaux une place disgracieuse dans un appartement ; il ne permet pas la vue de la flamme, le tisonnement, distraction si réelle que Béranger a pu dire :

Combien le feu tient douce compagnie !

On chauffe incontestablement, et d'une façon rapide et assez égale, l'air d'une pièce ; mais souvent un poêle devient par lui-même une cause d'altération de l'air. Ainsi le tirage est-il insuffisant, les gaz produits par la combustion se répandent dans la pièce et occasionnent de la somnolence, de la paresse d'esprit, des maux de tête et de l'inflammation du côté des voies respiratoires. De plus, le poêle ne *chauffe* pas seulement, il *dessèche* l'air.

Les poêles de fonte, qui se refroidissent rapidement, ont encore l'inconvénient de dégager des odeurs désagréables, les miasmes de la

pièce venant se brûler sur leurs parois surchauffées ; en outre, il a été signalé, notamment par M. Sainte-Claire Deville et par M. le général Morin, les dangers extrêmes que présente l'usage de ces appareils de chauffage.

La fonte neuve contient généralement 3 pour 100 de carbone ; or, il arrive que, si l'on chauffe au rouge un poêle composé de cette matière, le carbone qu'elle renferme se combine avec l'oxygène de l'atmosphère ; le métal se transforme en fer ou en oxyde à sa surface, ainsi que cela a lieu dans les fours à *puddler*. Cette combustion du carbone étant très lente vu la densité de la fonte, il se forme de l'oxyde de carbone, et, si l'on n'y prend garde, on sent bientôt un assoupissement qui dégénère en *anesthésie*, et par suite en asphyxie, lorsque l'action est prolongée. Cette dernière période arrive principalement quand la pièce dans laquelle on se trouve ne reçoit pas de courant d'air.

On doit donc éviter de faire rougir ces sortes de poêles, surtout quand ils sont neufs et que la pièce chauffée est étroite et peu ventilée. On a aussi l'habitude de noircir ces poêles avec de la *mine de plomb* (graphite, plombagine) ; c'est encore un danger à signaler. La mine de plomb contient 0,95 de carbone sur 0,5 de fer. Ce carbone, en brûlant, dégage également de l'oxyde de carbone et tend à rendre l'atmosphère délétère.

Les poêles de faïence, il est vrai, n'ont pas ces inconvénients ; mais ils ne donnent qu'une issue toujours insuffisante à l'air vicié, et ne déterminent pas cet appel énergique de l'air pur, si nécessaire à la salubrité d'un local : en un mot, avec un poêle, on *chauffe* ce local, mais on ne le *ventile* pas. Or un bon appareil de chauffage doit remplir cette condition essentielle indiquée par le général Morin : « Il doit assurer par lui-même un renouvellement suffisant et régulier de l'air, ou être combiné avec des appareils qui produisent ce renouvellement (1) ».

Le poêle cependant sera longtemps encore l'appareil de chauffage obligé des ménages dont le budget n'est pas excessivement élevé, et des locaux que leur grandeur ne permet pas de chauffer avec une cheminée et dans lesquels il faut nécessairement une température suffisante et toujours égale, tels que des écoles, des ateliers, etc.

M. le général Morin indique, dans son livre, les améliorations dont la construction des poêles est susceptible. Des portes mobiles, un large tuyau de fumée, en feraient une sorte de cheminée capable de ventiler en échauffant. En outre, grâce à un revêtement intérieur, la fonte ne serait plus portée au rouge et n'émettrait plus d'oxyde de carbone.

(1) Général Morin. *Manuel pratique de chauffage et de ventilation*.

Le mot de poêle (du latin *pensile*, chambre où l'on travaillait, *pensum*) désignait d'abord une chambre chauffée où travaillaient les femmes de service, puis toute chambre chauffée, et enfin l'appareil qui servait à la chauffer. Quoique connus des anciens, les poêles sont certainement originaires des froides contrées du Nord, dans lesquelles les *braseros* ou les cheminées auraient été insuffisants. De nos jours, en Allemagne, en Russie, en Suède et en Norvège, les poêles sont de véritables monuments, construits en briques, revêtus de faïence ou de porcelaine. La prise d'air s'y fait extérieurement par un conduit qui pénètre dans le poêle et s'échauffe, avec l'air qu'il renferme, au contact des gaz chauds du foyer, pour se répandre ensuite, par des bouches de chaleur, dans l'appartement.

En France, une foule de formes différentes ont été données à ces appareils de chauffage, et leur construction est une branche des plus importantes de la *fumisterie*, et l'une des industries qui ont fait aujourd'hui le plus de progrès. Nous citerons, entre mille, les poêles-calorifères Geneste, adoptés, après concours, pour le chauffage des écoles et des asiles de la ville de Paris (*fig. 243*). Ces appareils chauffent moins par rayonnement qu'en versant dans les classes de l'air pur pris à l'extérieur, et dont ils ont élevé la température. L'appareil de fonte où le coke est brûlé est placé au centre et à la base du calorifère; il est enveloppé d'abord d'une large colonne d'air en mouvement, qui met à l'abri du rayonnement, puis d'un manchon de tôle à doubles parois, entre lesquelles est une épaisse couche de sable. Grâce à cette disposition, ni l'air de la salle ni les miasmes ne viennent plus se brûler sur la fonte, dans le cas où elle serait portée au rouge, ce qui ne peut se produire que par une mauvaise direction de l'appareil. En effet, le combustible ne descend qu'à mesure du besoin, et la combustion n'a lieu d'ailleurs que dans un espace très limité et au voisinage seulement de la grille placée au bas de l'appareil. En outre, avant d'être versé dans la salle par les bouches de chaleur, l'air chaud passe sur un réservoir d'eau, disposé à la partie supérieure du calorifère, où il vient perdre sa sécheresse.

Les poêles de nos salles à manger et de nos antichambres sont en faïence ou en terre cuite peinte (*fig. 244*). Les plus perfectionnés consistent

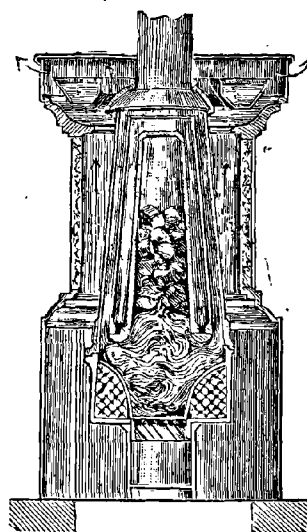


Fig. 243.

CALORIFÈRE GENESTE.

en une grille destinée à recevoir le combustible, dont la paroi du foyer est formée de six colonnes de fonte creuse. Ces colonnes débouchent, à la partie inférieure, dans un espace vide communiquant avec la chambre par deux ouvertures pratiquées à droite et à gauche de la porte du cendrier. L'air de la salle pénètre par ces ouvertures, s'élève à l'intérieur des colonnes où il s'échauffe, puis se répand dans un espace situé au-dessus du foyer, d'où il s'échappe par les bouches de chaleur.

Les *calorifères* (du latin *calor*, chaleur, *ferre* porter), quoiqu'on emploie ce mot pour désigner des appareils de chauffage portatifs, sont plus exactement des appareils destinés à porter de la chaleur dans un certain nombre de salles distinctes de celle où ils sont eux-mêmes installés. Les anciens connaissaient les calorifères; le moyen âge en perdit l'usage, et ce ne fut qu'à la fin du xvii<sup>e</sup> siècle que Bonnemain les remit en faveur.

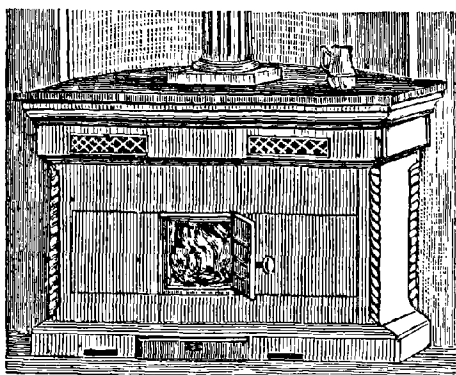


Fig. 244. — POËLE DE SALLE A MANGER.

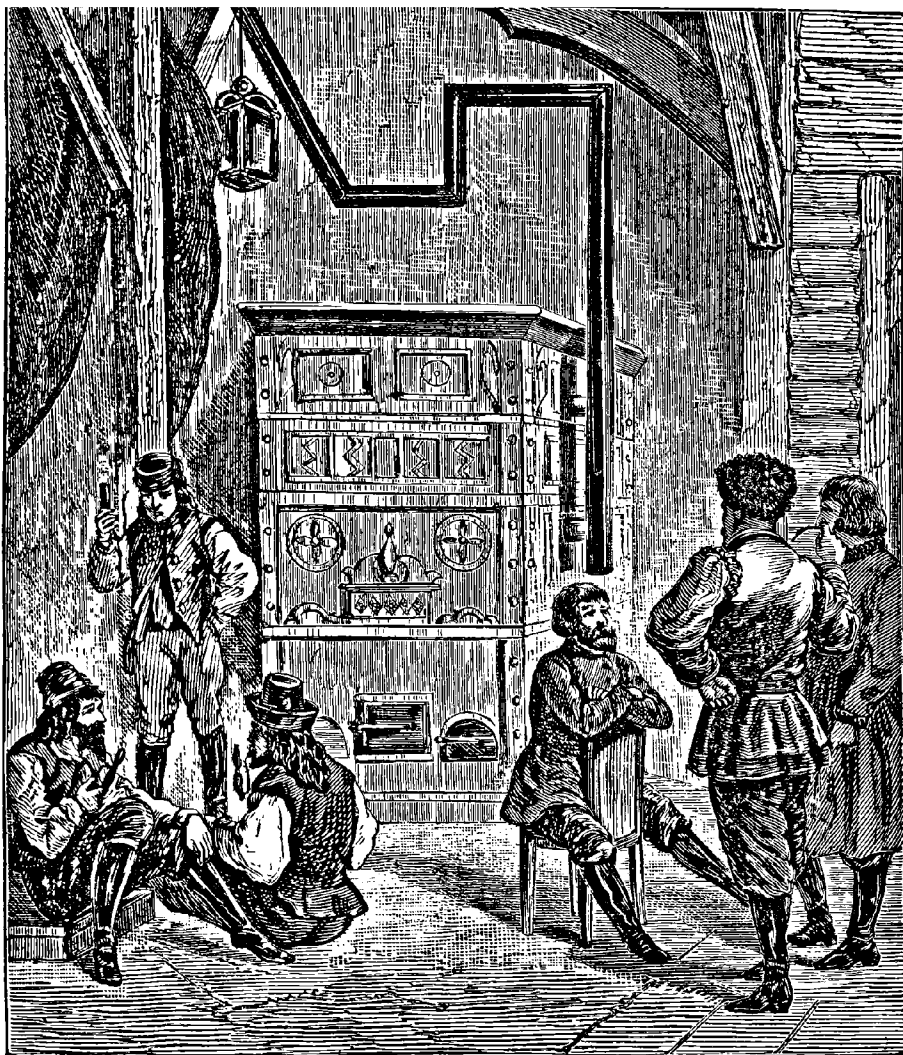
Il y a trois systèmes de calorifères : le *calorifère à air chaud*, le *calorifère à circulation d'eau chaude*, le *calorifère à vapeur d'eau*

1<sup>o</sup> *Calorifères à air chaud.* — Les calorifères à air chaud sont précieux pour le chauffage de vastes locaux dans lesquels une température égale et bien réglée doit être maintenue, comme, par exemple, dans toutes les classes d'une école. M. le docteur Riant, dans une étude sur l'*hygiène scolaire*, déplore très justement que, dans toutes les écoles un peu importantes, on n'ait pas installé, dans les sous-sols, de petits calorifères à air chaud, fondés sur le principe des grands appareils adoptés par M. Train, l'architecte du nouveau collège Chaptal, pour le chauffage de cet établissement.

Le calorifère, installé dans le sous-sol (*fig. 245*), élève la température de l'air d'une vaste chambre où il est placé, et dont l'air est renouvelé par une prise extérieure, mais qui n'est point en communication directe avec le foyer lui-même, de manière que la fumée ou les autres gaz de la combustion n'y ont aucun accès. Le conduit qui reçoit la fumée et les gaz se replie plusieurs fois sur lui-même, et se divise en un certain nombre de conduits, tantôt horizontaux, tantôt verticaux, disposition qui a pour objet d'augmenter la surface de chauffe et d'utiliser ainsi, autant que possible, la chaleur développée par le combustible. Les conduits verticaux sont beaucoup plus avantageux, parce que l'air chaud qui s'élève ne rencontre,



dans son mouvement, que les parois latérales des tuyaux horizontaux, tandis qu'il reste, pendant tout le temps de son ascension, en contact avec la surface entière des tuyaux verticaux.



Dans les pays du Nord, les poêles sont de véritables monuments (page 463).

Tout autour de la partie supérieure de la chambre s'ouvrent des tuyaux destinés à porter l'air chaud dans toutes les divisions du bâtiment. On évite par là ces courants violents et ces alternatives de courants très chauds et très froids, qui se produisent si fréquemment avec les anciens

calorifères, dans lesquels la prise d'air chaud se fait directement. Les tuyaux viennent s'ouvrir dans les parties inférieures des salles; à mesure que l'air se refroidit, il s'élève et se répand peu à peu dans la pièce; l'air vicié s'échappe dans les classes par les marches des gradins, et dans les dortoirs par des orifices pratiqués dans le plancher. Peut-être sort-il un peu moins vite ainsi que par le plafond; mais, quand l'orifice d'évacuation

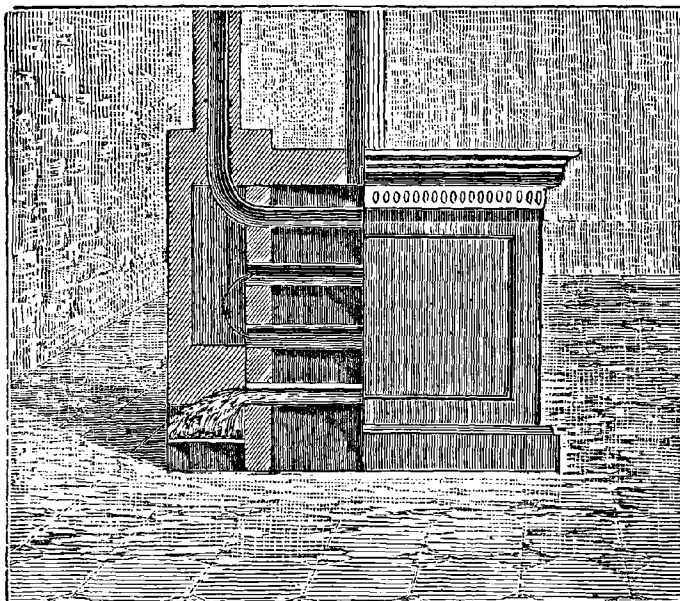


Fig. 245. — CALORIFÈRE A AIR CHAUD.

est au plafond, l'air vicié ne s'échappe pas seul; il entraîne tout l'air chaud à mesure qu'il pénètre dans la pièce, de sorte que l'on *ventile* alors, mais que l'on ne chauffe pas.

Afin d'assurer en même temps la ventilation, chaque pièce est pourvue d'un tuyau d'évacuation verticalement placé; tous

ces tuyaux viennent se rendre dans un collecteur horizontal, qui aboutit à une chambre à air vicié, au milieu de laquelle passe la cheminée du calorifère; la chaleur transmise par cette cheminée entraîne l'air accumulé dans la chambre à air vicié, dans un tuyau d'évacuation qui se termine, sur le toit, par un orifice protégé contre l'action du vent.

2° *Calorifère à circulation d'eau chaude.* — Le calorifère à circulation d'eau chaude se place, comme le précédent, dans le sous-sol de la maison à chauffer. Il y en a de deux sortes : les appareils à *haute pression*, c'est-à-dire dans lesquels le liquide peut être porté à une température très élevée, plus de 300°, par exemple, et les appareils à *basse pression*, dans lesquels l'eau n'est jamais portée qu'à 100°, son point d'ébullition. Ces derniers se composent (*fig. 246*) d'une chaudière de fonte, placée sur un foyer dont la fumée et les gaz s'échappent par une cheminée latérale. Du sommet de cette chaudière s'élève verticalement un tube aboutissant directement à un réservoir placé au sommet de l'édifice. Tout l'appareil

est plein d'eau. Le liquide chauffé se dilate, et les parties chaudes montent, par le tube, dans le réservoir le plus élevé, tandis que les parties plus froides descendent du réservoir supérieur au réservoir placé à l'étage au-dessous, puis au réservoir inférieur, jusqu'à celui placé dans le sous-sol. Au bout de très peu de temps, l'eau qui circule ainsi est chaude dans toutes les parties de la maison, surtout en haut, et l'espèce de poêle que forme le réservoir à chaque étage échauffe l'air de chaque pièce.

Les appareils à *haute pression*, dits du système *Perkins*, du nom de leur inventeur, consistent en une série de tubes, contournés en spirales à chaque étage de l'édifice à chauffer, et placés dans l'intérieur des murs et sous les planchers (*fig. 247*). Dans le sous-sol, le tube est soumis directement à l'action de la chaleur, et sa spirale y forme le sixième environ de sa longueur. Comme dans le système précédent, l'eau chaude monte d'abord au sommet de l'édifice, dans un réservoir appelé *vase d'expansion*, tube horizontal, court, d'un diamètre très supérieur à celui du tube de circulation, d'une capacité égale aux cinq centièmes au moins de la capacité totale de l'appareil. On introduit l'eau froide par ce tube et l'on ne le remplit jamais entièrement, afin que l'air qui y reste soit comprimé

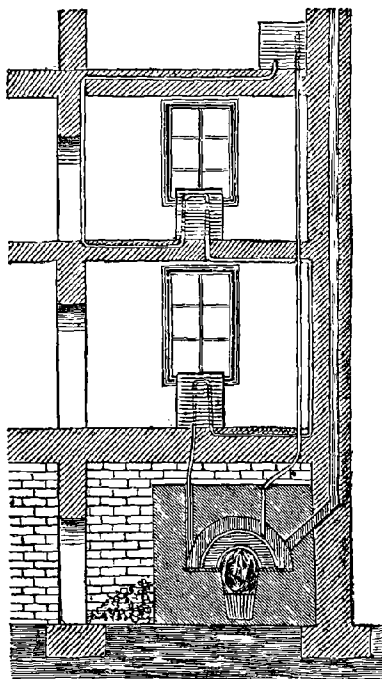


Fig. 246.

CALORIFÈRE A BASSE PRESSION.

par l'eau, quand la température de celle-ci s'élève, de façon à éviter l'effet de l'expansion du liquide et de la vapeur qui se forme.

Le principal défaut des calorifères à circulation d'eau chaude, si simples et n'exigeant pas une grande surveillance, est de charger extrêmement les planchers ; de plus, si une fuite se produit dans les tuyaux, il faut des travaux coûteux pour y remédier. Enfin, si l'appareil est à haute pression, cette fuite, par laquelle s'échappe aussitôt un jet de vapeur, peut causer de grands dommages ; et puis il y a un continuel danger d'incendie, par la combustion des pièces de bois voisines des tuyaux.

3° *Calorifère à vapeur d'eau.* — Ces calorifères sont construits comme les précédents ; ils sont basés sur la grande quantité de chaleur qu'abandonne la vapeur en se condensant, comme nous le verrons ci-après.

La vapeur, formée dans une chaudière, au bas de l'appareil, est dirigée verticalement, par un tuyau recouvert de matières non conductrices, dans les appartements les plus élevés, puis redescend, après de nombreux circuits. Un grand nombre d'inconvénients, la difficulté de son établissement, son entretien coûteux, l'inégalité de la température donnée, les ruptures, les explosions possibles, ont fait abandonner à peu

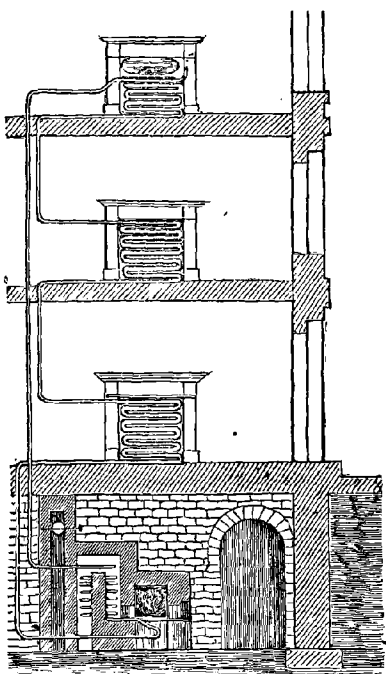


Fig. 247.

CALORIFÈRE A HAUTE PRESSION.

près complètement ce système de chauffage. Cependant un ingénieur, M. Goudelle, a imaginé de combiner le chauffage par circulation d'eau chaude avec le chauffage par la vapeur; celle-ci chauffe l'eau des poêles installés à chaque étage de la maison, et son système a produit de bons résultats.

**VENTILATION.** — La nécessité d'un renouvellement continu de l'air de nos appartements est une de ces vérités que personne ne met en doute, et à laquelle cependant on ne s'occupe pas assez d'obéir. Parmi les causes qui influent le plus sur la mortalité dans les villes, on peut certainement placer en première ligne l'encombrement, c'est-à-dire la privation d'air. M. Besnier, médecin de l'hôpital Saint-Louis, à Paris, a dressé un tableau de la mortalité dans les dernières épidémies de la capitale, et l'action

spéciale de l'encombrement s'y accuse nettement. Ainsi l'arrondissement de l'Opéra n'a, par exemple, qu'une mortalité relative de 10 pour 1,000, tandis que le XVIII<sup>e</sup> arrondissement, celui de Montmartre, a une mortalité triple, 33 pour 1,000. Ces chiffres sont, à eux seuls, la plus éloquente des démonstrations.

Ces inconvénients de l'encombrement, rapporte M. de Parville, apparaissent très nettement dans la population militaire. M. Michel Lévy admet que la mortalité, dans la population militaire, est de 18 pour 1,000, quand elle est de 9 pour 1,000 dans la population civile, et beaucoup de médecins tendent à attribuer cette mortalité excessive à deux causes principales : la fièvre typhoïde et la phtisie pulmonaire, deux maladies d'encombrement qui prennent leur origine dans les casernes. La comparaison de

la mortalité dans les casernes et les camps ne semble laisser subsister aucun doute à cet égard.

Dans nos casernes, l'espace alloué pour chaque soldat n'est que de 10 à 12 mètres cubes ; il faudrait donc, par heure, introduire 88 à 90 mètres d'air, tandis que la ventilation fait le plus souvent défaut. Le tirage par une simple cheminée, dans laquelle est entretenu un feu modéré, peut suffire pour amener un renouvellement d'air considérable dans les appartements ; mais on ne devrait plus tolérer des réunions d'enfants ou d'adultes dans des salles d'école dépourvues de tout conduit d'évacuation, ni des chambres de caserne sans cheminées ou sans appareils de ventilation.

Il existe un grand nombre de ces appareils de ventilation, parmi lesquels les plus estimés sont ceux de MM. G. Peugeot, Thomas et Laurens, général Morin, docteurs Arnolt et Van Hecke, etc. Dans beaucoup d'ateliers, de cafés et d'autres endroits analogues, on se contente d'adapter à la vitre d'une croisée un petit cercle de métal, muni de lames concentriques et placées obliquement, de manière que la différence de densité qui existe entre l'air du dehors et celui du dedans fasse tourner le cercle et introduise ainsi dans l'intérieur de la salle une notable quantité d'air. Mais ces appareils ne peuvent évidemment être employés pour les locaux un peu vastes, dans lesquels la ventilation doit être suffisante, tout en permettant de conserver dans le local une température convenable.

Il ne faut pas non plus confondre un grand mouvement d'air avec une bonne ventilation. Celle-ci ne peut exister qu'autant qu'il y a une distribution uniforme de l'air pur dans toute la pièce. Ainsi, une cheminée qui tire trop énergiquement détermine l'appel d'une grande quantité d'air, qui entre sous les portes, glisse le long du plancher, glace les pieds et les jambes, mais ne se mélange que lentement à l'air du reste de la pièce. Il y a là un courant d'air plus ou moins violent, mais non une ventilation parfaite.

**VENTILATION DES ÉCOLES.** — Pour la ventilation des écoles, par exemple, le problème est assez compliqué, et M. le docteur Riant, que nous avons cité plus haut, a présenté ainsi la question.

En tout temps, pendant la présence des élèves, l'air de la classe sera renouvelé, en partie, par l'ouverture de vasistas à soufflet ou de carreaux mobiles, établis dans les parties supérieures des fenêtres, ou par le moyen de cadres de toile métallique. La circulation d'air que produit une petite roue à lames concentriques serait très utile ; mais il faudrait parvenir à faire fonctionner cet appareil sans qu'il déterminât du bruit ou de la distraction pour les élèves.

À ces moyens élémentaires, on peut en ajouter d'autres dans les écoles à construire.

Comme les fenêtres des écoles sont réglementairement placées à 1<sup>m</sup>,50 du plancher, il est à craindre que l'air des parties basses de la salle ne soit pas suffisamment renouvelé par les procédés ci-dessus. Des ouvertures multipliées et d'un diamètre convenable, pratiquées de distance en distance dans les murs, des deux côtés les plus longs de la classe, disposées, l'une un peu au-dessus du niveau du plancher, d'un côté, l'autre, au ras du plafond, de l'autre côté, munies d'un grillage métallique et pouvant être réglées par un registre, donneront, celle d'en bas, entrée à l'air pur, plus froid ; celle d'en haut, issue à l'air vicié, qui, par sa température plus élevée, tend toujours à monter vers le plafond.

Voici encore un moyen simple, quoiqu'un peu plus coûteux, d'obtenir ce résultat : on établit, dans les murs extérieurs, des orifices communiquant avec la classe par des tuyaux, des gaines ou des canaux en briques creuses, qui viennent s'ouvrir dans le plancher, pour verser dans la classe l'air pur du dehors. Des registres règlent la quantité de l'air à introduire et sa distribution. D'autre part, au plafond, l'air altéré vient s'échapper par l'ouverture en entonnoir d'un tuyau montant à 1<sup>m</sup>,50 au-dessus du faite du toit, tuyau coudé brusquement à son extrémité supérieure ouverte, laquelle est mobile comme une girouette, afin de présenter toujours son orifice au côté opposé à la source du vent. On déterminera ou l'on activera la sortie de l'air impur, en hiver, au moyen de la chaleur du poêle, dont le tuyau sera dirigé dans la gaine destinée au passage de l'air vicié ; en été, en maintenant allumés quelques becs de gaz, dans l'intérieur de cette même gaine, afin d'y développer un courant ascendant.

Il ne faut compter qu'avec réserve sur l'introduction de l'air pur et sur la sortie de l'air vicié par les fentes des portes et des fenêtres, bien qu'un hygiéniste anglais ait estimé à environ 8 pieds cubes (le pied anglais vaut 3 décimètres) la quantité d'air qui passe par minute entre chaque fenêtre et son encadrement. En admettant même un chiffre essentiellement variable et la distribution régulière de l'air ainsi introduit dans toute la pièce, la quantité que recevrait, par minute, chaque élève, serait tout au plus suffisante pour maintenir la vie, mais non pour conserver la vigueur et la plénitude de la santé. Il faut ajouter que ce résultat, possible quand il existe dans les pièces un appareil de chauffage à tirage puissant, comme les vastes cheminées moyen âge, en usage en Angleterre, cesse de l'être quand la cheminée est remplacée, comme chez nous, par un très modeste poêle.

Parmi les appareils de ventilation destinés aux écoles, aux classes, aux dortoirs, etc., on ne doit pas hésiter à donner la préférence à un appareil qui ne nécessiterait l'intervention, l'intelligence et l'attention de personne. Tel est, par exemple, le système de ventilation naturelle, qui paraît avoir donné d'excellents résultats dans quelques écoles d'Angleterre, et que recommande M. Robson, architecte de la direction des écoles de Londres, *London school board*, pour les édifices où l'on n'a pas originairement prévu les nécessités de la ventilation.

L'installation d'un ventilateur de ce genre existe dans les salles du nouvel Hôtel-Dieu de Paris.

Il consiste en une corniche métallique creuse, qui fait le tour de la pièce et est divisée, dans toute sa longueur, en deux canaux superposés et séparés. L'air pur pénètre par un orifice qui traverse le mur, dans le canal inférieur, d'où il descend d'une manière insensible dans la pièce, au moyen de nombreuses ouvertures pratiquées dans la corniche. Le canal supérieur communique avec le tuyau de la cheminée, dans laquelle il dirige l'air vicié qu'il a reçu, par une série de petites ouvertures semblables à celles du canal inférieur. Ce moyen est économique, et il a l'avantage de n'exiger l'attention de personne. C'est un appareil *self-acting*, c'est-à-dire qui fonctionne tout seul.

On emploie encore dans les écoles, en Angleterre, le système Varley. Un tube de zinc perforé, communiquant avec l'air extérieur, passe autour de la corniche de trois côtés de la pièce. Sur le quatrième côté est un tube perforé en communication avec la cheminée; il agit comme tuyau d'attraction de l'air vicié.

Cependant, on n'aurait qu'une idée incomplète des causes qui rendent la ventilation nécessaire et des moyens de la réaliser, si l'on ne se rappelait ce que nous avons dit des appareils de chauffage, et si nous ne parlions de l'éclairage des classes.

Le gaz d'éclairage tend à se substituer partout aux autres combustibles. Propreté absolue, économie de temps et d'argent, service facile, pouvoir éclairant plus considérable, tels sont les avantages principaux qui déterminent ce choix. L'hygiène approuve ce mode d'éclairage pour les classes, à condition cependant que l'on prendra certaines précautions, au moyen desquelles il peut même devenir un excellent moyen de ventilation.

Le général Morin a démontré qu'un mètre cube de gaz brûlé peut servir à extraire de 600 à 800 mètres cubes d'air vicié, quand les dispositions convenables ont été prises. Il suffira donc, pour ventiler une pièce éclairée par le gaz, d'installer, au-dessus de chaque bec, un appareil aspi-

rateur convenablement disposé pour donner issue aux produits de la combustion.

A cet effet, on fait usage, en Angleterre, d'aspirateurs consistant essentiellement en deux tuyaux concentriques placés au-dessus de la flamme et en communication avec l'air extérieur. Lorsque le gaz brûle, il se produit dans le tube intérieur un courant ascendant : l'air contenu dans le tube extérieur ou manchon s'échauffe, se raréfie, se met en mouvement. Le tube intérieur entraîne vers la gaine, ou la cheminée avec laquelle il communique, les produits de la combustion ; le tube extérieur donne issue à l'air vicié de la pièce. De simples tubes, de zinc peuvent remplir très économiquement et très utilement cet usage. On obtient ainsi une combustion plus active, plus complète du gaz, une lumière plus belle ; on détermine l'aspiration, le rejet à l'extérieur des produits de la combustion ; enfin il se produit une ventilation qui contribue à diminuer l'élévation de température qui résulte de ce mode d'éclairage.

**VENTILATION DE LA SALLE DES FÊTES, AU TROCADÉRO.** — Après avoir parlé de la ventilation des écoles, nous voulons faire connaître, d'après M. de Parville, le système de ventilation adopté pour la salle des fêtes au palais du Trocadéro, c'est-à-dire là où les plus saines et les plus récentes données de la science ont été appliquées.

Il faut couramment 40 mètres cubes d'air à l'heure, par spectateur, pour assurer une bonne aération. Or, au Trocadéro, les auditeurs peuvent atteindre le nombre énorme de 5,000. C'est 200,000 mètres cubes d'air à l'heure qu'il faut envoyer dans la salle, soit 56 mètres cubes par seconde ! C'est la première fois qu'on se trouvait devant des masses pareilles à faire pénétrer et à distribuer également dans une enceinte. Jusqu'ici, on faisait déboucher l'air pur par des bouches ménagées dans le plancher, et on l'évacuait par des orifices de sortie placés à la partie supérieure. C'est le cas ordinaire des théâtres.

MM. Davioud et Bourdais ont renversé le système, en se fondant sur une observation fort juste. Quand une veine gazeuse sort d'un orifice, elle s'élève verticalement en colonne ; quand elle entre, au contraire, par un orifice, chaque filet pénètre horizontalement, se recourbe et passe sans engendrer d'appel vertical sensible. La sortie de l'air en colonne est gênante pour le spectateur ; l'air le frappe désagréablement. L'évacuation en filets courbes ne présente pas cet inconvénient. Il y a donc avantage à faire échapper l'air par en bas et à le faire entrer par en haut. En effet, au Trocadéro, l'air pur et frais, puisé dans les carrières du sous-sol, débouche dans la calotte sphérique centrale de la salle, et s'en va par



5,000 bouches disposées sous les fauteuils. Les vêtements des femmes pouvaient faire craindre qu'un grand nombre de bouches ouvertes sur le parquet fussent obstruées; on a poussé les précautions jusqu'à placer,



Chaque tonne de houille coûte cher à l'humanité (page 475).

dans chaque intervalle de raccordement de deux fauteuils, une seconde ouverture accessoire communiquant avec les tuyaux d'évacuation.

L'air des carrières est refoulé dans de hautes cheminées à l'aide d'un ventilateur à hélice. Il arrive par de très larges conduites, presque des

couloirs, jusqu'à la rosace centrale. Il est appelé au dehors, au contraire, par d'autres ventilateurs qui l'aspirent dans d'autres cheminées. Pour

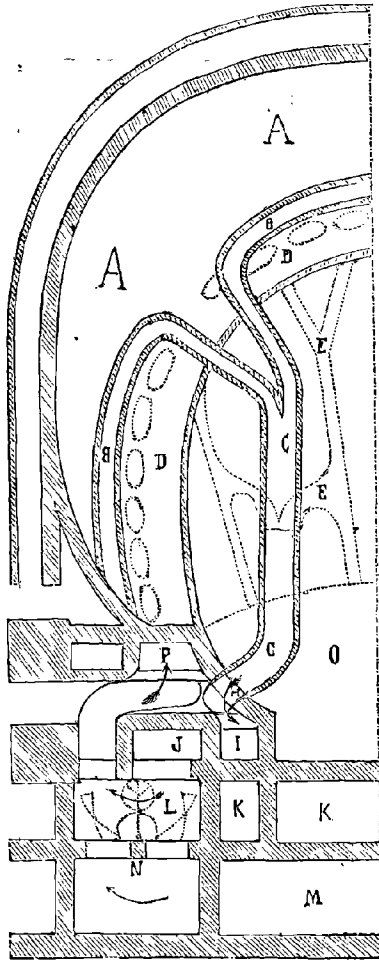


Fig. 248. — PLAN DE LA VENTILATION DE LA SALLE DES FÊTES AU PALAIS DU TROCADÉRO.

AA. Amphithéâtre. — BB. Ramification des loges et de l'amphithéâtre. — CC. Ramification générale. — DD. Loges. — EE. Évacuation du parquet. — H. Hélice d'aspiration. — I. Évacuation d'air pur. — J. Prise d'air pur. — KK. Caves. — L. Hélice de propulsion. — M. Chambre des machines. — N. Calorifère. — O. Places d'orchestre. — P. Introduction d'air pur.

sous pression pénètre par la rosace centrale et sort, aspiré par les hélices. Le système de ventilation de MM. Davioud et Bourdais tient largement tout ce qu'il avait promis.

vaincre les frottements de l'air dans les conduites, il faut une pression de 6 millimètres d'eau, soit 6 kilogrammes par mètre carré. Pour plusieurs raisons pratiques, on a préféré n'envoyer l'air que sous une pression de 3 millimètres et l'aspirent sous une dépression égale. La salle n'a donc qu'une pression à peine supérieure à celle de l'air extérieur, pression qu'on peut d'ailleurs varier à volonté. L'air qui entre en haut avec une vitesse de 3 mètres à la seconde s'échappe par les bouches avec une vitesse réduite de 30 centimètres.

Pour obtenir cette égalité de vitesse dans l'échappement d'un bout à l'autre de la salle, il a fallu réunir les conduites d'évacuation par séries, et leur donner à toutes le même développement. L'air dans le réseau distribué sous le plancher parcourt toujours la même longueur de tuyaux et se trouve, par conséquent, soumis à la même somme de frottements. Ces détails ont été fort bien étudiés (*fig. 248*).

L'air des carrières est froid relativement. On est obligé de le mêler à l'air extérieur par proportions convenables. L'observation a montré qu'il ne convient pas de faire arriver l'air pur à plus de 4 degrés au-dessous de la température ambiante. La sensation de fraîcheur est déjà prononcée. Il va sans dire que le même système s'applique au chauffage pendant l'hiver. L'air chaud

**AÉRAGE DES MINES.** — Le public se préoccupe des accidents de mine quand le nombre des victimes provoque sa pitié; mais que de mineurs isolés sont tués journellement au fond des galeries, sans qu'il s'élève de la foule une parole de regret! L'accident passe inaperçu. Chaque tonne de houille coûte cher à l'humanité! D'après des statistiques anglaises, en dix ans, on compte 8,500 personnes tuées dans les seules houillères d'Angleterre et 30,000 blessés!

Or la cause principale de ces accidents est la présence du *grisou* dans les galeries. On sait que le grisou est de l'*hydrogène protocarboné*, du gaz des marais, ainsi appelé par ce qu'il se développe par la décomposition spontanée des matières végétales enfouies sous l'eau; et que, dans certaines circonstances atmosphériques, élévation de température, baisse du baromètre, l'hydrogène s'échappe des interstices de la houille avec une grande rapidité. On sait encore que ce gaz est asphyxiant; quand il y en a dans l'air une quantité notable, il est impossible de vivre. En outre, lorsque la proportion est de  $\frac{1}{15}$  dans l'air, de 8 pour 100, et même, selon quelques ingénieurs, de 5 pour 100, il forme un mélange détonant, et, s'il y a inflammation, l'explosion survient avec toutes ses désastreuses conséquences.

Vers la fin de 1871, un honorable membre du Parlement anglais, M. Edward Hermon, ému de la fréquence des explosions du grisou, eut la bonne pensée d'ouvrir, à ses frais, un concours entre tous les hommes pratiques du Lancashire et du Yorkshire. Une somme de 200 livres serait partagée entre les *Mémoires* les plus méritants: au premier en attribuerait 150 livres, et 50 au second. Les juges du concours classèrent *ex æquo* M. Creswick, de Sheffield, et M. Galloway, de Londres. Ces deux ingénieurs conclurent, après une minutieuse étude de la question, que la meilleure défense contre le grisou était tout bonnement la *ventilation* et la *lampe de Davy*, dont nous parlerons ci-après. Ils admettent qu'il est possible d'expulser le gaz au fur et à mesure qu'il se dégage au moyen d'une ventilation habilement distribuée. L'atmosphère d'une mine est, en quelque sorte, dans un équilibre instable; il suffit d'une modification, même légère dans l'énergie du courant d'air, pour faciliter le dégagement du grisou, et quelquefois pour chasser de la poussière de charbon qui s'enflamme spontanément et met le feu au gaz. Il faut donc faire varier l'énergie de la ventilation en raison des fluctuations de la température et de la pression extérieure.

Il a été proposé un grand nombre de « procédés infaillibles pour combattre le grisou. » Nous le répétons, le seul procédé admis par les hommes compétents est une ventilation, à énergie variable, selon les

circonstances atmosphériques, et par cantonnement. On entend par ventilation par cantonnement le système de ventilation introduit par Wallsend en 1810 (*panel-work*), la ventilation à double courant d'air, en ventilant les chantiers non pas avec le même courant, mais en subdivisant la ventilation, en aérant chaque partie distincte des travaux, à l'aide d'embranchements spéciaux.

Sans vouloir entrer dans des détails techniques trop précis, nous exposerons les procédés de ventilation des mines le plus communément employés.

Dans un grand nombre de mines, il existe plusieurs puits, deux au moins, qui font communiquer la mine avec l'atmosphère de l'extérieur : il s'établit alors un aérage naturel. L'air des mines, dit M. Barat, étant presque toujours plus chaud que l'air extérieur, il en résulte que les colonnes d'air extérieur qui pèsent sur les deux puits ne se font pas équilibre; l'air frais et dense entre par l'orifice le plus bas, l'air échauffé et moins dense de la mine sort par l'orifice le plus élevé. En hiver, ces courants d'aérage sont très actifs; à tel point qu'on est obligé, dans beaucoup de cas, de les modérer par des portes. En été, si la température extérieure se rapproche de celle de la mine, les courants d'air se ralentissent ou deviennent nuls; il peut même arriver

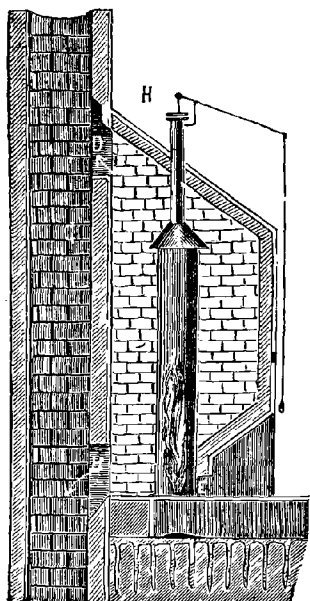


FIG. 249. — AÉRAGE DES MINES  
PAR  
LE CALORIFÈRE SERAING.

que l'air de la mine soit le plus froid et le plus dense, auquel cas, après un moment de stagnation, les courants deviendraient inverses, l'air extérieur entrerait par le puits le plus élevé et sortirait par le puits inférieur. Mais ce cas est tout à fait rare et exceptionnel, parce que, dans l'intérieur des mines, où le travail est actif, la combustion des lampes, les coups de mines et la respiration des ouvriers suréchauffent l'air.

L'aérage naturel, préférable à tout autre quand il est établi dans de bonnes conditions, n'est pas toujours suffisant : il faut souvent avoir recours à un aérage forcé. Pour cela, on place dans l'un des puits un foyer qui chauffe l'air et en détermine la circulation. Mais, dans les mines de houille, par exemple, il est impossible de placer ces foyers qui pourraient enflammer les gaz; on adopte alors le calorifère Seraing, ainsi appelé du pays où il a été employé pour la première fois. Au-dessus de l'orifice d'un

des puits, on élève (*fig. 249*) une haute cheminée C ; on place, dans une chambre latérale A, un calorifère métallique alimenté par l'air de l'atmosphère et clos de toutes parts. Les gaz de la mine pénètrent dans cette chambre par l'ouverture B, s'échauffent et s'échappent par l'ouverture D en déterminant alors un fort tirage dans la cheminée C. Le conduit E étant fort au-dessous de l'ouverture de la cheminée d'appel, il est impossible que les étincelles puissent s'élever jusqu'à cette ouverture et enflammer le gaz de la mine. Un disque H permet de régler le feu et le tirage.

L'aéragé mécanique s'obtient à l'aide d'appareils mus par la vapeur ou par une machine hydraulique et portant le nom de *ventilateurs*. Le nombre de ces appareils est considérable ; les plus connus sont les ventilateurs Fabry, Guibal et Lemielle (1).

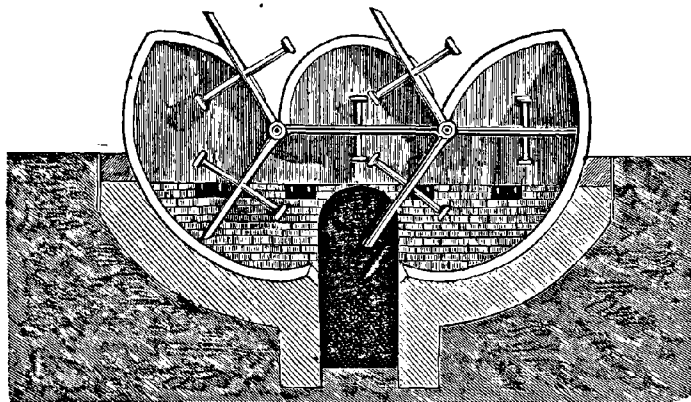


Fig. 250. — VENTILATEUR FABRY.

M. Fabry a construit, pour les puits de mine de Belgique et du nord de la France, des ventilateurs à l'aide desquels on peut extraire 10 à 20 mètres cubes d'air par seconde.

L'appareil de M. Fabry (*fig. 250*) se compose de deux arbres horizontaux parallèles, sur chacun desquels sont montées, au moyen de bras en fonte, trois palettes larges de 2 à 3 mètres, et, vers le tiers de sa longueur, à partir de son extrémité supérieure, chaque bras est muni d'une croisure se terminant par une surface de bois à section courbe. Les deux arbres sont installés dans deux coursiers en bois ou en briques, qui les embrassent le plus exactement possible jusqu'à la moitié de leur hauteur, et qui sont établis au-dessus du puits d'appel. Enfin, ils tournent en sens contraire, de telle sorte que, à chaque révolution, les surfaces en bois d'une des croisures de l'un vient au contact tangentiel de la surface de la croisure

(1) Maigne. *Arts et Manufactures*.

correspondante de l'autre, ce qui interromp toute communication entre l'air arrivant de la mine et l'air extérieur.

Le *ventilateur Lemielle* (fig. 251) consiste en un tambour hexagonal, sur lequel se plient et se développent successivement six palettes à charnières, appliquées sur chacun des pans du tambour, au moyen d'un mécanisme approprié. Il est installé dans un orifice rectangulaire par lequel se termine le puits d'aérage.

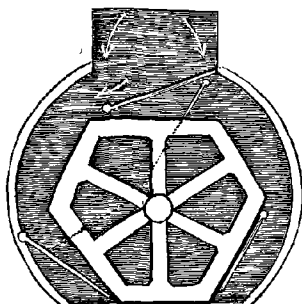


Fig. 251.

VENTILATEUR LEMIELLE.

La surface de la chambre, sauf dans les parties où aboutissent la galerie qui amène l'air de la mine et la cheminée qui envoie cet air au dehors.

**AÉRAGE DES TUNNELS.** — Le 31 août 1857, le roi de Sardaigne Victor-Emmanuel et le prince Jérôme-Napoléon, en mettant le feu à la première mine, inauguraient solennellement les travaux de percement du tunnel du mont Genis. La foi dans la réussite de ce gigantesque projet n'existait guère chez les savants étrangers, et, en France, M. l'abbé Moigno, dans son journal très répandu, le *Cosmos*, résumant une opinion presque générale, soutenait que l'entreprise ne réussirait pas, par cette raison qu'il serait impossible d'établir un ventilateur assez puissant pour insuffler l'air dans le canal à une telle distance, et pour y entretenir le courant continu nécessaire à la respiration et à tout le reste. Il prétendait même que ce courant ne pourrait être produit sur une longueur de 1,000 mètres seulement.

M. Manabrea, membre de la commission qui a entrepris ce grand

Le *ventilateur Guibal* (fig. 252) se compose de triangles équilatéraux en fer, reliés par des bras à un arbre tournant, et sur le prolongement de chacun des côtés desquels sont fixées des palettes en bois, toutes dirigées dans un même sens de rotation. Il est logé dans une chambre en maçonnerie, ayant un pourtour circulaire, et les choses sont combinées de telle sorte que les palettes viennent raser la

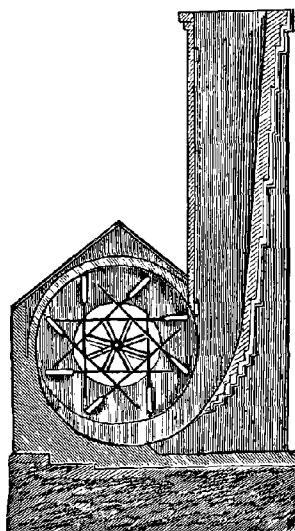


Fig. 252. — VENTILATEUR GUIDAL.

ouvrage, lui répondait vainement en lui envoyant le résultat d'expériences faites dans le but de vérifier à l'avance cette possibilité, ces expériences ayant eu lieu avec des tubes de 6 centimètres de diamètre, sur une longueur de 400 mètres, et moyennant une pression d'insufflation initiale de 6 atmosphères. Vainement des études approfondies avaient démontré la certitude de la réussite dans le tunnel projeté; M. l'abbé Moigno répondait en refusant de croire à la démonstration par des expériences faites sur une longueur de tubes de 400 mètres seulement, en faisant observer qu'il s'agirait d'envoyer, à 6,500 mètres, en vingt-quatre heures, 85,924 mètres cubes d'air comprimé à 6 atmosphères, avec des moyens mécaniques dont la puissance serait, sans doute, réduite de moitié par la pratique.

Le résultat a donné un éclatant démenti à M. l'abbé Moigno et aux savants qui partageaient son opinion.

Pendant les travaux, à côté des tuyaux de gaz, couraient, fixées à la paroi du tunnel, des conduites d'air. Les machines à comprimer l'air, installées hors du souterrain, à Fourneaux pour un versant, à Bardonnèche pour l'autre, refoulaient de l'air à 5 atmosphères dans ces tuyaux.

On eut recours à deux sortes de compresseurs.

Le compresseur à colonne d'eau se compose essentiellement d'un siphon renversé qui, d'un côté, communique avec une prise d'eau, et, de l'autre, avec un réservoir à air. L'eau descend dans la première branche du siphon, en s'ouvrant passage à travers une soupape d'alimentation, et remonte dans la seconde, en comprimant l'air qui s'y trouve. Celui-ci, refoulé, ouvre une soupape et pénètre dans un réservoir. Une soupape de décharge donne alors écoulement à l'eau et laisse rentrer l'air dans la petite branche du siphon. De nouveau, l'arrivée du liquide refoule encore l'air, et ainsi toujours, jusqu'à ce que la pression dans le réservoir atteigne le chiffre voulu. Le mouvement des soupapes d'alimentation et de décharge est, bien entendu, réglé par la machine elle-même. Il y avait, dans le chantier de Bardonnèche, dix compresseurs à colonne, divisés en deux groupes, que l'on pouvait utiliser séparément ou simultanément. Les eaux étaient amenées au réservoir par de gros tubes qui les recevaient du canal de dérivation, situé 20 mètres plus haut. Le réservoir mesurait 400 mètres cubes et était placé à 50 mètres au-dessus des soupapes de décharge. Des compresseurs partaient les tuyaux d'air comprimé, soutenus sur des pilastres en maçonnerie.

Les compresseurs à colonne fonctionnèrent d'abord à Bardonnèche; à Fourneaux, la chute étant moindre, on commença par soulever l'eau avec

des pompes, procédé naïf, pour la laisser retomber ensuite dans les compresseurs. M. Sommeiller remplaça bientôt ce système défectueux par le *compresseur hydropneumatique*, qui n'exige plus qu'une chute restreinte et fonctionne sans choc. A Bardonnèche même, quand il fallut augmenter le nombre des machines à air, on eut recours au nouveau compresseur. En voici brièvement le principe. Imaginez un corps de pompe horizontal (fig. 253), dans lequel peut aller et venir un piston mû par une roue hydraulique. Aux extrémités de ce corps de pompe horizontal s'élèvent deux cylindres verticaux, partiellement remplis d'eau. Les cylindres

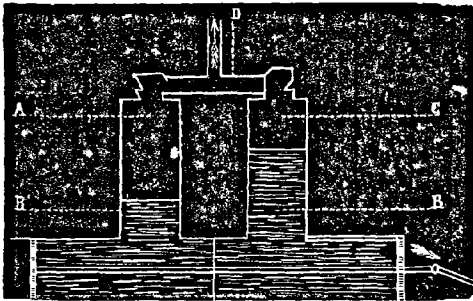


Fig. 253. — PRINCIPES  
DU COMPRESSEUR HYDROPNEUMATIQUE.

verticaux portent des soupapes ouvrant du dehors en dedans et du dedans dans un réservoir. A chaque mouvement de translation du piston, l'eau est refoulée d'un côté, l'air comprimé repoussé dans le réservoir, et de l'autre, la soupape de communication fermée et l'air extérieur appelé. On conçoit que cette pompe introduise chaque fois une nouvelle quantité d'air; et l'examen de la gravure

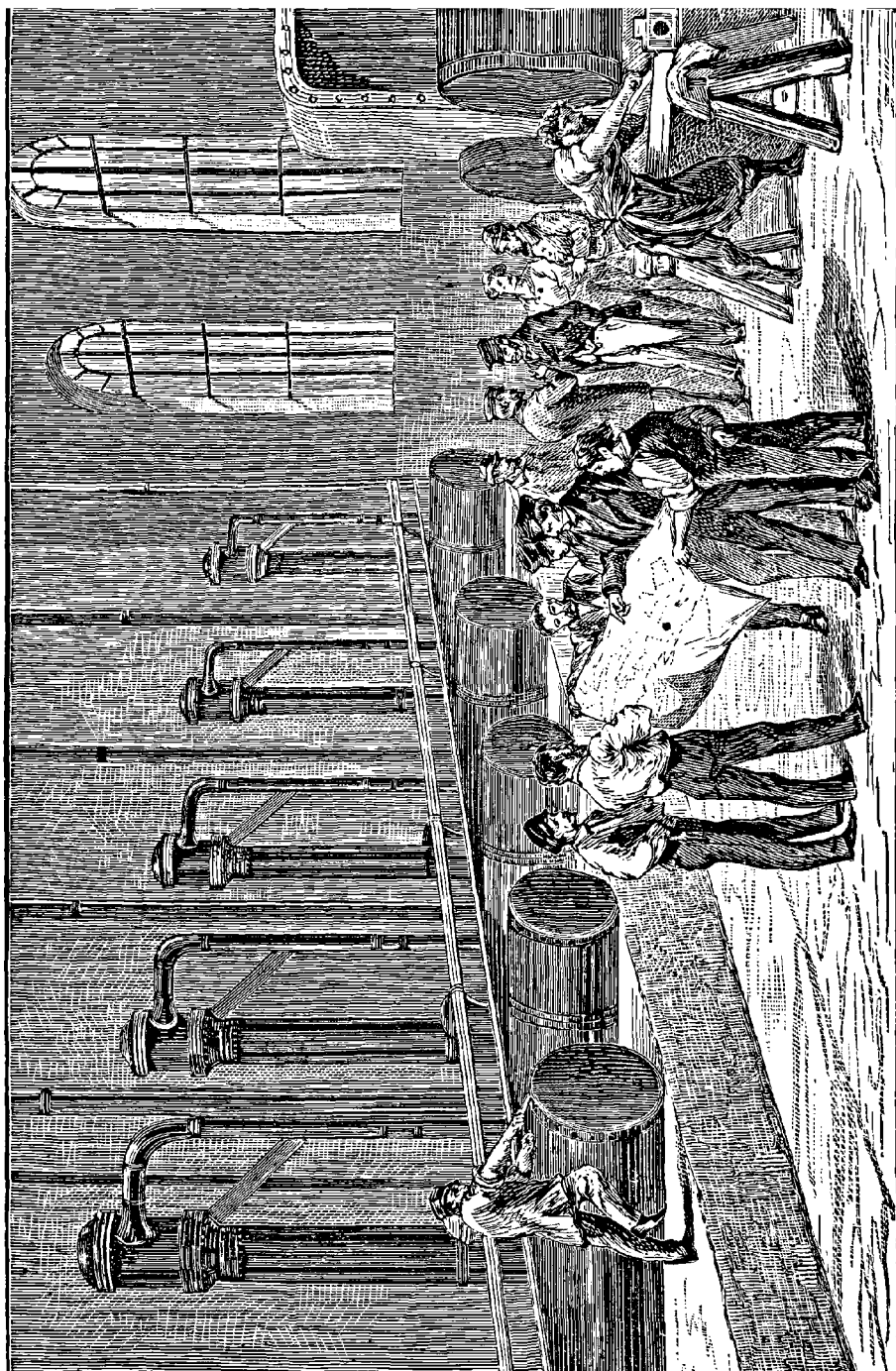
permet de comprendre parfaitement le principe. Nous appelons AC, BB, le niveau successif de l'eau dans le corps de pompe, et D le tuyau d'entrée de l'air comprimé.

On eut donc, pendant les travaux, partout de l'air pour respirer et comme force motrice. L'aérage du tunnel, pendant le passage des trains, est également aujourd'hui très satisfaisant; les craintes exprimées sur le manque d'air étaient chimériques. L'air du tunnel, loin de rester en repos, s'écoule, en effet, le plus souvent, avec des vitesses très appréciables, et il est facile de se rendre un compte exact de ce qui se passe en galerie.

Dans beaucoup de tunnels, dans celui de la Merthe, par exemple, il arrive que la fumée des locomotives sort mal du souterrain, malgré ses vingt-quatre puits d'aérage : le tunnel est de niveau; c'est, en somme, une longue cave avec des soupiraux. Les puits ont des hauteurs comprises entre 20 et 180 mètres, et créent, par cela même, des courants variables en direction, qui rabattent souvent la fumée dans la galerie. Le tirage ne s'effectue guère que par les puits les plus profonds.

Aux Alpes, au contraire, il n'y a aucun puits d'aérage, sauf à l'entrée du tunnel, du côté italien : la galerie constitue une seule et unique grande





Appareil compresseur envoyant l'air dans le tunnel du mont Cenis (page 480).



cheminée inclinée de France en Italie. Le tirage s'y fait donc, comme dans toutes les cheminées possibles, en vertu des différences de pression et de température. La pression est plus forte, sur le versant français, de 13 millimètres de mercure en moyenne; aussi, en général, l'air va de France en Italie. Cependant, le courant se retourne quelquefois et balaye le tunnel en sens inverse, d'Italie en France. Il suffit, pour cela, que la température sur le versant italien devienne plus faible que sur le terrain français; le tirage se fait de haut en bas, au lieu de se faire de bas en haut, comme il arrive souvent dans nos appartements, pendant l'été, lorsque la pièce, hermétiquement close, est plus fraîche que l'air extérieur. Dans tous les cas, le tirage reste faible, et c'est un inconvénient pour la ventilation.

En définitive, le tunnel est assez aéré pour que les voyageurs ne soient nullement incommodés pendant la traversée. On ne saurait plus conserver maintenant le moindre doute sur la possibilité d'exploiter le souterrain sans faire intervenir des machines soufflantes.

Il en est de même pour le tunnel du Saint-Gothard et pour le percement du tunnel sous-marin qui reliera la France à l'Angleterre, tunnel qui aura 50 kilomètres de long, tandis que celui du mont Cenis n'a que 12,800 mètres. On sait que l'on obtiendra l'aération de la galerie, pendant les travaux, par l'injection d'air comprimé jusqu'au front de taille. L'air comprimé sur la côte sera transmis par des tuyaux et servira, à la fois, à aérer et à transmettre la force motrice. Le tunnel construit, on sait que les puits des deux extrémités, conduisant au sol du tunnel, feront cheminées d'appel et renouvelleront l'air; que des pompes d'épuisement pourront, en même temps, ventiler; que le tirage naturel sera donc, sans doute, suffisant. Les trains eux-mêmes, en circulant, feront piston et refouleront l'air d'un côté pour l'aspirer de l'autre. Si, malgré cela, le renouvellement de l'atmosphère souterraine n'était pas assez abondant, on en serait quitte pour diriger dans le tunnel des jets d'air comprimé, et pour continuer, pendant l'exploitation, ce qu'il faudra bien faire pendant les travaux. Dans tous les cas, quand on en sera là, les moyens d'aérage ne feront certes pas défaut. On a imaginé dernièrement un système de ventilation consistant simplement en deux grands cylindres de bois, avec un fond et un piston mobile, muni de soupapes, au moyen desquelles on aspire l'air; une machine à vapeur de la force de huit chevaux sert de moteur à ces pompes aspirantes. Grâce à elles, on a pu reprendre les travaux dans la houillère de Poirier, près de Charleroy. La vitesse de l'air y est telle que les ouvriers sont obligés de s'habiller chaudement.

Il n'y a donc pas à se préoccuper désormais de l'aérage des tunnels.

## CHAPITRE IV

### PROPAGATION DE LA CHALEUR RAYONNEMENT — RÉFLEXION

**CHALEUR RAYONNANTE.** — Lorsque deux corps, à des températures inégales, sont à une certaine distance l'un de l'autre, il y a entre eux, à travers cette distance, un échange continu de chaleur, jusqu'à ce que l'un et l'autre aient atteint la même température (pages 391 et 406). C'est à cette propagation à distance de la chaleur qu'on a donné le nom de *rayonnement*, et la chaleur qui se trouve dans cette condition physique s'appelle *chaleur rayonnante*. La ligne que suit la chaleur, en se propageant ainsi, est dite *rayon de chaleur* ou *rayon calorifique*.

**APPAREILS THERMOSCOPIQUES.** — 1° **THERMO-MULTIPLICATEUR DE MELLONI.** — Avant de commencer l'étude de la chaleur rayonnante, nous devons parler des *sources de chaleur* et des *appareils thermoscopiques* dont on fait généralement usage pour cette étude.

Il fallait d'abord un thermomètre excessivement sensible, et, à la fin du siècle dernier, Leslie avait imaginé, pour ses expériences, le thermomètre différentiel que nous avons décrit (page 422). Les observateurs modernes, Melloni (1), La Provostaye (2), Desains (3) se sont servis du *thermo-multiplificateur* de Melloni, instrument dont la sensibilité est bien

(1) MELLONI (Macedonio), grand savant italien et républicain convaincu (1801-1853), d'abord professeur de physique à Parme, sa ville natale, est forcé de quitter cette ville pour s'être mêlé au mouvement révolutionnaire après 1830; se réfugie en France, où Arago lui obtient une place de professeur au collège de Dôle. Il passe ensuite à Genève, où il était plus libre de penser et de travailler; mais il communique tous ses travaux à l'Institut de France, qui le nomme son correspondant. On l'a surnommé le Newton de la chaleur.

(2) HERVÉ DE LA PROVOSTAYE (Ferdinand), né à Redon en 1812, savant professeur, s'est particulièrement occupé des phénomènes relatifs à la chaleur; il est mort à Alger en 1863.

(3) DESAINS (Quentin-Paul), né à Saint-Quentin (Aisne) en 1817, professeur à la Faculté des sciences de Paris.

supérieure à celle du thermomètre de Leslie, et dont la construction s'appuie sur des phénomènes d'électricité.

En 1821, le docteur Seebeck, de Berlin, démontra que l'on peut obtenir, par l'action de la chaleur, un courant électrique. On appela ces courants *courants thermo-électriques* (de *thermos*, chaleur). Il prenait une lame de cuivre recourbée et soudée à ses deux extrémités à un cylindre de bismuth (*fig. 254*). Cela formait une sorte de rectangle ABCD, dont un côté AD était le cylindre de bismuth. Au milieu de ce rectangle est une aiguille aimantée H. Si l'on chauffe l'une des soudures du circuit, l'aiguille aimantée dévie, ce qui prouve l'existence d'un courant électrique ; si l'on refroidit l'une des soudures, l'aiguille dévie en sens contraire.

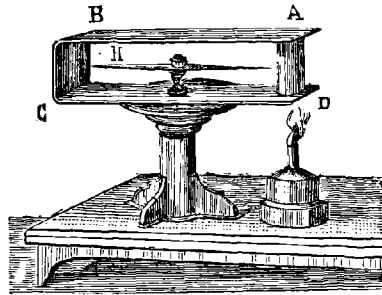


Fig. 254.

EXPÉRIENCES DE SEEBECK.

Ceci compris, voici l'appareil imaginé par Nobili et perfectionné par Melloni. Une pile est formée par de petits barreaux de bismuth soudés à

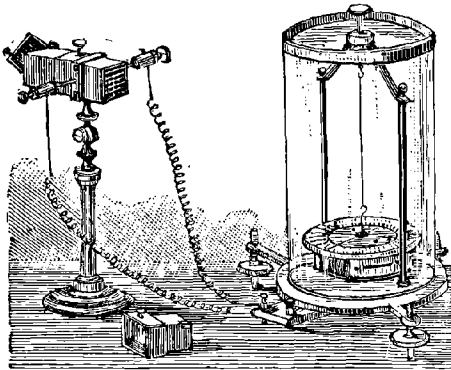


Fig. 255.

THERMO-MULTIPLIEUR DE MELLONI.

de petits barreaux d'antimoine, disposés de sorte que toutes les soudures du rang pair soient d'un côté, toutes celles du rang impair de l'autre. On contourne cette sorte de chaîne en forme de parallépipède rectangle, et on la place dans une armature en cuivre, laissant à l'air les deux faces où sont les soudures (*fig. 255*). Les faces sont enduites de noir de fumée. De petits tubes prismatiques sont placés aux extrémités de la pile,

pour soustraire l'appareil à toute influence autre que celle du faisceau calorifique qui touche normalement sur les soudures.

Ces prismes sont fermés par des volets que l'on manœuvre avec des fils de soie, parce que la chaleur de la main ferait fonctionner la pile. Les extrémités de la chaîne sont en rapport, par l'intermédiaire de deux tiges métalliques, avec les deux bouts du fil d'un galvanomètre, de sorte que, s'il vient à se produire un courant, le galvanomètre en décèlera la présence. Mais, comme il n'y a pas de proportionnalité entre les différences

de chaleur et les déviations du galvanomètre, une table doit être établie par des expériences directes.

Si donc un rayon calorifique vient frapper l'une des faces de la pile, il se produit un courant dont l'intensité est donnée par le galvanomètre. On a ainsi un thermomètre d'une extrême sensibilité.

**2<sup>o</sup> SOURCES DE CHALEUR DIVERSES.** — On se sert le plus généralement, pour produire de la chaleur, de l'appareil appelé *cube de Leslie* (fig. 256). C'est un cube métallique dont chacune des faces est enduite d'une substance que l'on choisit suivant l'expérience que l'on veut faire. On remplit ce cube d'eau, que l'on fait bouillir, soit en la plaçant sur une lampe à alcool entourée d'un écran pour intercepter son rayonnement, soit en y injectant de l'eau bouillante. Un tube de verre surmonte le cube, de sorte que la vapeur se condense dans le tube et retombe dans le cube qui, ainsi, ne se vide point.

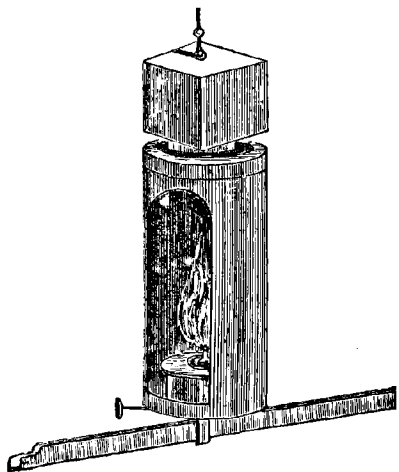


Fig. 256. — CUBE DE LESLIE.

Quelquefois on emploie la *lampe de Locatelli* (fig. 257), qui n'est autre chose qu'une lampe à huile armée d'un petit réflecteur. C'est une source de chaleur très constante; mais elle est d'une faible intensité.

On emploie encore des plaques de cuivre enduites de noir de fumée, et que la flamme d'une lampe à alcool porte à 400° environ, ou bien une spirale de fil de platine que l'on maintient incandescente en la suspendant au-dessus d'une lampe à alcool, dont elle entoure la flamme.

Les radiations de chaque source calorifique ayant des propriétés spéciales, il faut multiplier ces sources et vérifier, avec chacune d'elles, les lois étudiées.



Fig. 257.

LAMPE  
DE LOCATELLI.

**LOIS RELATIVES A LA CHALEUR RAYONNANTE.** — La chaleur rayonnante est soumise aux lois suivantes :

1<sup>o</sup> *Un corps chaud émet de la chaleur autour de lui dans toutes les directions.* Il est facile de vérifier cette loi en plaçant un thermomètre dans différentes positions autour d'un corps chaud. A des distances égales, le thermomètre indiquera la même élévation de température. On pourrait

supposer que le corps chaud, *la source de chaleur*, échauffant les couches d'air successives, la chaleur arrive au thermomètre en vertu de la *conductibilité*, propriété que nous étudierons ci-après. Il n'en est rien. Une expérience de Prévost (1) le démontre. Entre une source de chaleur et un thermomètre, il plaçait le grand plateau de verre d'une machine électrique, puis il le faisait tourner de sorte qu'à chaque instant une nouvelle portion du verre était interposée entre la source de chaleur et le thermomètre. Le plateau, n'ayant pas le temps de s'échauffer, ne pouvait permettre de communication par conductibilité; les variations du thermomètre étaient dues à la seule chaleur rayonnante.

2° *La chaleur rayonnante, dans un milieu homogène, se transmet en ligne droite.* Cette loi se démontre en plaçant des écrans, percés d'un petit trou, entre une source de chaleur et un thermomètre. Lorsque les trous sont bien en face les uns des autres, sur une ligne droite, le thermomètre est influencé; si, au contraire, ils cessent d'être en ligne droite, la chaleur est interceptée.

3° *La chaleur rayonnante se transmet à travers le vide.* Le soleil, dont les rayons calorifiques traversent le vide avant de pénétrer dans notre atmosphère, nous démontre que la chaleur traverse le vide; mais on pouvait objecter que cette chaleur était accompagnée de lumière: Rumford montra que la *chaleur obscure* se propage aussi bien que la *chaleur lumineuse*. Il construisit un baromètre (*fig. 258*) dont la chambre barométrique était un ballon de verre, lequel, en conséquence, était parfaitement vide. Au milieu de ce ballon il plaça un thermomètre soudé par sa tige à la partie supérieure. A l'aide d'un chalumeau, il ramollit le tube du baromètre au-dessous du ballon, afin d'isoler complètement ce dernier. Quel'on plonge cette espèce de baromètre dans de l'eau bouillante, le mercure monte aussitôt dans le thermomètre. L'on ne peut attribuer cette élévation de température à une communication de chaleur par les parois, car cette communication ne se fait qu'avec une extrême lenteur, parce que la conductibilité calorifique du verre est très faible, comme nous le verrons ci-après, tandis que l'élévation du thermomètre est immédiate; de plus, la paroi n'est pas échauffée vers le point où le thermomètre est soudé, et cependant le mercure du thermomètre s'est déjà élevé dans le tube d'une quantité notable.

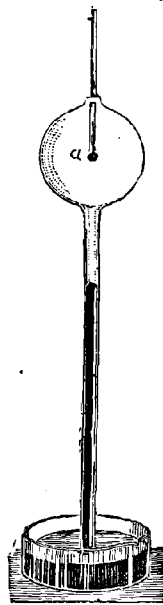


Fig. 258.

EXPÉRIENCE  
DE RUMFORD.

(1) PRÉVOST (Isaac-Bénédict), physicien et naturaliste genevois (1733-1819).

4° *L'intensité de la chaleur rayonnante est proportionnelle à la température du foyer.* Un thermomètre différentiel étant placé en face du cube de Leslie, si l'on remplit ce cube d'eau successivement à 50°, 60°, 80°, 100°, on voit le thermomètre indiquer des températures qui sont entre elles dans le même rapport que les premières, c'est-à-dire comme 5, 6, 8, 10, etc.

5° *L'intensité de la chaleur rayonnante est en raison inverse du carré des distances.* On démontre cette loi par le raisonnement, en s'appuyant sur ce théorème de géométrie : que *la surface d'une sphère croît comme le carré de son rayon.* Supposons une sphère creuse au centre de laquelle

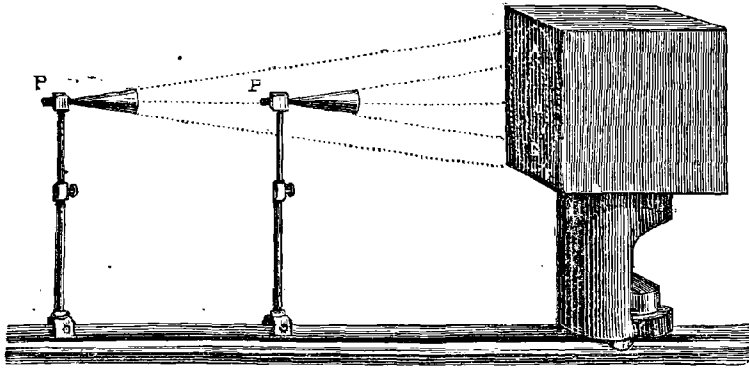


Fig. 259. — EXPÉRIENCE DE M. TYNDALL.

est placée une source de chaleur : chaque unité de surface de la paroi intérieure recevra une certaine quantité de chaleur. Augmentez le rayon de la sphère 2, 3, 4 fois, la surface deviendra 4, 9, 16 fois plus grande; elle recevra donc 4, 9, 16 fois moins de chaleur, et, réciproquement, si le rayon diminue 2, 3, 4 fois, la surface recevra 4, 9, 16 fois plus de chaleur.

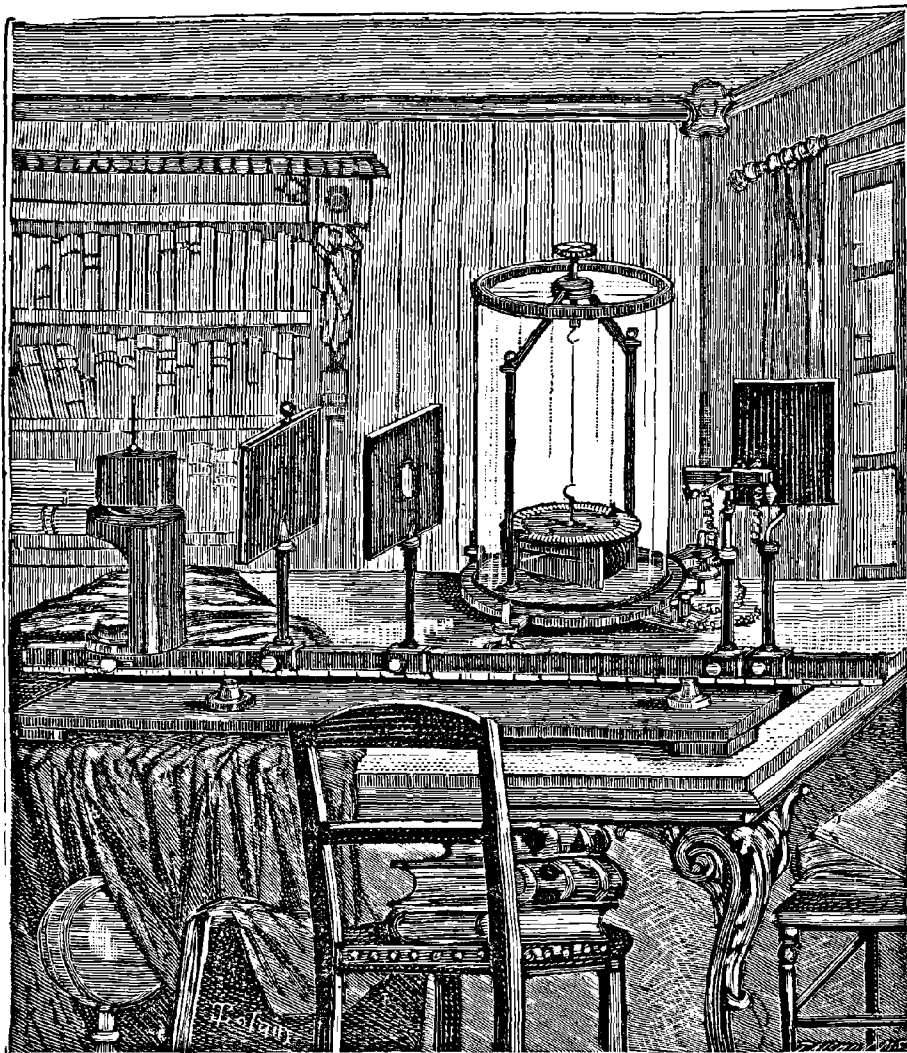
Cette démonstration n'est point absolument rigoureuse : elle suppose, en effet, que la chaleur est une sorte d'effluve, émise par le foyer de chaleur; or, nous pensons aujourd'hui que la chaleur est un ébranlement de l'éther. Le raisonnement devrait donc être modifié; mais la démonstration très exacte perdrait ainsi le caractère de simplicité qui l'a fait adopter.

Une expérience de M. Tyndall donne d'ailleurs la preuve irréfutable de cette loi fondamentale (*fig. 259*).

On place en P, puis en P', en face d'un cube de Leslie, une pile de Melloni, sur la face antérieure de laquelle est un petit cône, noirci en dedans pour empêcher toute réflexion sur la surface intérieure. Le côté du cube qui regarde la pile est aussi couvert de noir de fumée, et le cube lui-même



est rempli d'eau bouillante. Or, à quelque distance que l'on place la pile, en P ou en P', l'indication thermométrique reste la même, quoique, la pile étant placée en P, elle reçoive toute la chaleur émise par la surface circu-



Mesure du pouvoir émissif des corps pour la chaleur (page 493).

laire AB, tandis qu'en P' elle reçoit la chaleur émise par une surface beaucoup plus grande A'B'. Ces deux surfaces sont des cercles dont les rayons sont proportionnels aux distances PO, P'O; leurs surfaces sont proportionnelles aux carrés des mêmes quantités. Si elles envoient à la

pile la même quantité de chaleur, c'est donc que l'intensité du rayonnement varie en raison inverse du carré des distances.

6° Quand un rayon de chaleur tombe sur une surface polie, il se réfléchit, en faisant un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence; et ces deux angles sont dans un même plan normal à la surface.

Soit (fig. 260) AB une surface réfléchissante, c'est-à-dire présentant un certain degré de poli. Si un rayon calorifique DO frappe cette surface, il se réfléchira suivant une direction OE, de telle sorte que les angles COE, COD, formés par ce rayon et la perpendiculaire ou normale OC, soient égaux; en d'autres termes, l'angle d'incidence COD sera égal à l'angle de réflexion COE. De plus, ces deux angles seront dans un même plan EOD, perpendiculaire à la surface AB.

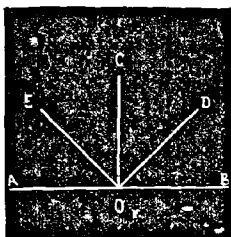


Fig. 260.

Ces lois sont précisément les lois de la réflexion de la lumière, et nous verrons, en traitant de la lumière, qu'elles sont susceptibles d'une vérification très rigoureuse. On admet aujourd'hui, depuis les travaux de Melloni, l'identité de la lumière et de la chaleur; les sources de chaleur et de lumière n'envoient à travers l'éther qu'une seule espèce de pulsations; et ces pulsations diffèrent entre elles seulement par la rapidité de leur succession, de même que les sons aigus diffèrent des sons graves par la rapidité seule des vibrations des corps sonores.

Nous acceptons donc comme vraies ces conclusions théoriques, les expériences faites avec les *miroirs ardents* les ayant d'ailleurs vérifiées.

**MIROIRS ARDENTS.** — Nous avons rapporté (page 11) l'opinion qui attribue à Archimède, sinon l'invention, du moins la première application, historiquement connue, des *miroirs ardents*. Nous avons dit comment la possibilité du fait, révoquée en doute par Descartes, avait été prouvée par des expériences ultérieures. Qu'il nous soit permis, avant de poursuivre nos démonstrations scientifiques, de citer quelques beaux vers inspirés par l'action d'Archimède; la comparaison que le poète

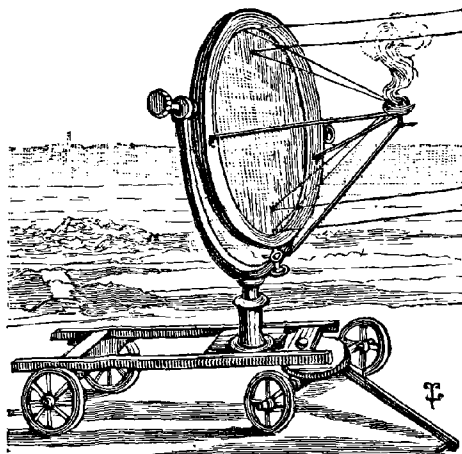


Fig. 261. — MIROIR ARDENT.

applique à la poésie vengeresse nous semble plus applicable encore aux vérités scientifiques, destructives des superstitions vicieuses :

Quand la flotte romaine assiégeait Syracuse,  
 Archimède, appliquant la science à la ruse,  
 Au soleil défenseur osa s'associer.  
 Il enferma ses feux dans des miroirs d'acier,  
 Comme nous dans l'obus un réservoir de poudre,  
 Et lançant la lumière en place de la foudre,  
 Et d'éclairs contre Rome armant le sein des eaux,  
 Acheva le problème en brûlant ses vaisseaux.  
 Nous criions au miracle!... Et pourquoi ce prodige  
 Ne laisse-t-il en nous ni lueur ni vestige,  
 Quand de l'ordre physique il passe à l'idéal  
 Et du monde des sens à l'univers moral?  
 L'œil croit et l'âme nie. Eh! pourtant, qu'on le dise!  
 Que sont ces forts marins que la guerre improvise,  
 Près du vice en bataille, autour de nous posté,  
 Dont l'éternel blocus cerne l'humanité;  
 Près de la servitude et de sa lèpre immonde;  
 Près du virus de l'or, qui pourrira le monde;  
 Vos plus savants miroirs, bornés dans leurs effets,  
 Consument à cent pas vos donjons imparfaits...  
 Regardez le poète, alors que dans son œuvre  
 Le soleil enfermé sous son regard manœuvre!  
 Combattant aujourd'hui contre vos passions,  
 A vingt siècles plus loin il darde ses rayons.  
 Qu'il s'allume aujourd'hui! dans trois mille ans encore,  
 Le miroir de ses vers, sublime météore,  
 Ira de ces marchands, que nous traitons en rois,  
 Foudroyer l'avarice, incendier les lois,  
 Et, comme le fer rouge employant le tonnerre,  
 Cautériser le crime aux veines de la terre (1).

Nous reprenons.

Les *miroirs ardents* (fig. 261) sont des surfaces sphériques de métal très poli ou de verre étamé, concaves, quelquefois à plusieurs facettes planes, convergeant toutes en un même point, appliquant ainsi à ces surfaces la loi donnée ci-dessus pour la réflexion sur des surfaces planes. Le point unique auquel tous les rayons concourent est le *foyer* du miroir. Dans les temps modernes, après le Père Kircher (2), dont nous avons

(1) Lefèvre-Deumier. *Le Couvre-feu*.

(2) KIRCHER (le Père), jésuite allemand (1602-1680). Il fut professeur de philosophie et de langues orientales à Wurtzbourg; puis, après être resté quelque temps en France chez les jésuites d'Avignon, il alla à Rome vers 1636, où il enseigna les mathématiques au Collège romain, qu'il quitta pour se

parlé, Tschirnhausen (1) construisit, en 1687, un miroir en cuivre de 2 mètres de diamètre qui permettait de fondre le cuivre, l'argent, et de vitrifier la brique; François Vilette, opticien de Lyon, en construisit un remarquable pour Louis XIV; et, en 1757, Bernières en fit un pour Louis XV, en verre étamé. Plus tard, Robertson perfectionna les miroirs ardents, en rendant les glaces mobiles; un mécanisme permettait de manœuvrer toutes les glaces d'un même coup et de transporter à volonté le point de concours des rayons de chaleur d'un point à un autre. La monture d'un miroir ardent porte généralement trois tringles qui maintiennent au *foyer* un support pour soutenir les substances que l'on veut soumettre aux rayons réfléchis.

Ce fut Mariotte qui, en 1682, fit voir que la chaleur du feu est sensible au foyer d'un miroir ardent qui la réfléchit, et que, si on place un verre entre le miroir et son foyer, la chaleur n'est plus sensible. Cette expérience mit hors de doute la réflexion de la chaleur. Scheele, peu de temps après, démontrait que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion et que le plan d'incidence est le même que le plan de réflexion.

Lambert et Pictet (2), à la suite de ces observations, dit M. Hoeffler dans son *Histoire de la Physique*, distinguèrent les premiers la chaleur rayonnante en *lumineuse* et en *obscur*. Pictet imagina une expérience qui a été souvent répétée depuis. Il se servait de deux miroirs concaves (*fig. 262*) mis à 24 pieds l'un de l'autre; par la chaleur d'un charbon incandescent, placé au foyer de l'un de ces miroirs, il enflammait un corps combustible, placé au foyer de l'autre. Les physiiciens crurent que, dans cette expérience, c'était la *chaleur lumineuse* qui déterminait la combustion. Lambert ne partagea pas cette opinion, et il attribua l'effet obtenu à l'action de la chaleur obscure; car, en réunissant au foyer d'une lentille la lumière d'un feu très ardent, il avait remarqué qu'on obtenait à peine une chaleur sensible.

livrer exclusivement aux sciences. Savant universel, il fut un des premiers qui étudia la langue copte, tenta d'expliquer les hiéroglyphes égyptiens, imagina une écriture universelle, inventa la lanterne magique, s'occupa d'acoustique et surtout de magnétisme, qu'il considérait comme une panacée universelle. Il joignait à une incontestable érudition une crédulité dévote et des bizarreries prodigieuses. Le musée du Collège romain conserve une précieuse collection d'objets rares d'histoire naturelle, d'antiquités, d'instruments de physique, rassemblés par le P. Kircher.

(1) TSCHIRNHAUSEN (Ehrenfried-Walter de), physicien et géomètre allemand (1651-1708), membre associé de l'Académie des sciences de Paris; il s'occupa tout particulièrement de la fabrication des instruments d'optique, pour laquelle il établit, en Saxe, de superbes verreries. Il fabriqua, entre autres choses, des verres brûlants dits *Caustiques de Tschirnhausen* et une porcelaine semblable à celle de la Chine.

(2) PICTET (Maxime-Auguste), membre d'une famille de savants genevois (1752-1825), un des cinq inspecteurs généraux de l'Université impériale, professeur d'histoire naturelle à Genève, correspondant de l'Institut. Il créa, avec son frère, la *Bibliothèque britannique*, un des organes savants les plus accrédités, devenu plus tard la *Bibliothèque universelle de Genève*.

L'idée de Lambert, continue M. Hoeffler, fut reprise par B. de Saussure : « J'ai pensé, dit-il, que si, au lieu de charbon embrasé, on plaçait au foyer de l'un des miroirs un boulet de fer très chaud, mais non pas rouge, et que ce boulet excitât une chaleur sensible au foyer de l'autre miroir, ce serait une preuve certaine que la chaleur obscure peut, comme la lumière, se condenser en un foyer. Comme je ne possédais pas cet appareil, j'ai fait cette expérience avec celui de M. Pictet et conjointement avec lui. Les miroirs étaient d'étain, d'un pied de diamètre et de 4 pouces et demi de foyer. Nous avons pris un boulet de fer de 2 pouces de diamètre; nous l'avons fait rougir fortement pour qu'il se pénétrât de

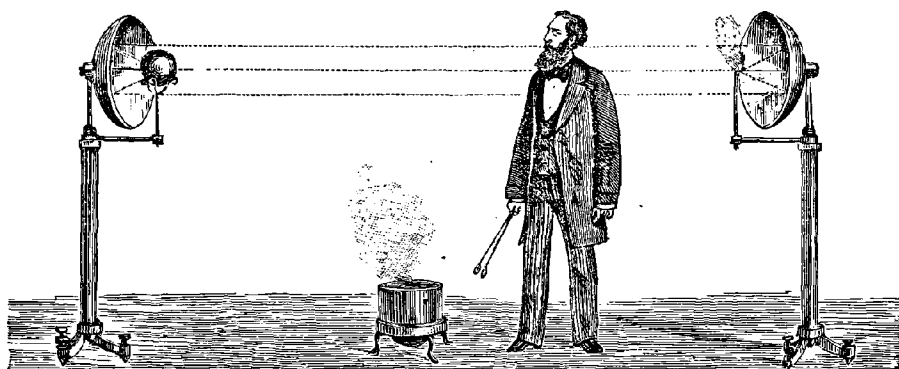


Fig. 262. — EXPÉRIENCE DES MIROIRS CONJUGUÉS.

chaleur jusqu'à son centre; puis nous l'avons laissé refroidir au point de n'être plus lumineux, même dans l'obscurité. Alors les deux miroirs étant en face l'un de l'autre et à 12 pieds 2 pouces de distance, nous avons fixé le boulet au foyer de l'un d'eux, tandis que nous tenions un thermomètre au foyer de l'autre. L'expérience se faisait dans une chambre où il n'y avait ni feu ni poêle, et dont les portes, les fenêtres et les volets mêmes étaient fermés, pour écarter, autant que possible, tout ce qui aurait pu causer des variations accidentelles dans la température de l'air. Le thermomètre au foyer du miroir était, avant l'expérience, à 4°; dès que le boulet a été placé dans l'autre foyer, il a commencé à monter, et en 6 minutes, il est venu à 14 degrés 1/2, tandis qu'un autre thermomètre, suspendu hors du foyer, mais à la même distance et du boulet et du corps de l'observateur, n'est monté qu'à 6 degrés. Il y a donc eu, dans cette expérience, plus de 8 degrés de température produits par la réflexion de la chaleur obscure. »

B. de Saussure et Pictet répétèrent plusieurs fois cette expérience à des jours différents, et les résultats furent toujours les mêmes.

**RÉFLEXION APPARENTE DU FROID.** — Pictet eut l'idée de remplacer, dans l'un des foyers, la boule chaude par un mélange frigorifique de glace et d'acide nitrique, et il vit, à son grand étonnement, le thermomètre placé dans l'autre foyer descendre à plusieurs degrés au-dessous de zéro. Partant de ce fait, il crut devoir admettre l'existence de rayons frigorifiques, indépendamment des rayons calorifiques. Mais Prévost, entre autres, combattit énergiquement cette opinion, en montra la fausseté, après une longue polémique, et prouva qu'il y avait là un simple phénomène d'échange. D'abord, en effet, il ne peut exister de rayons frigorifiques, puisque le froid n'est pas un agent distinct de la chaleur. Dans l'expérience de Pictet, la glace envoie, comme tous les corps, de la chaleur au thermomètre, moins cependant que cet instrument ne lui en envoie à son tour, de sorte que c'est parce qu'il donne plus de chaleur qu'il n'en reçoit que le thermomètre indique un abaissement de température.

**ÉQUILIBRE MOBILE DE TEMPÉRATURE. LOI DE NEWTON.** — L'expérience précédente rentre donc dans la loi générale de l'*équilibre de température*, par laquelle on énonce que plusieurs corps ayant des températures inégales, étant mis en présence dans une même enceinte, tendent tous à prendre la même température. Un rayonnement mutuel et continu de chaleur s'établit entre eux, et ce rayonnement mutuel subsiste encore quand il y a égalité de température entre eux tous. On donne à cet échange continu de chaleur entre des corps, placés à distance, et dont la température se maintient égale, le nom d'*équilibre mobile* de température.

Toutes les déterminations numériques, dans l'étude de la chaleur rayonnante, reposent donc sur cette loi découverte par Newton, et qui s'énonce ainsi : *L'abaissement de température est proportionnel à l'excès de la température du corps qui se refroidit sur la température ambiante*; d'où l'on déduit par le calcul cette conséquence : *Les temps croissant en progression arithmétique, les températures décroissent en progression géométrique*. Lorsqu'il s'agit de petites variations de température, on peut admettre sensiblement que ces variations sont proportionnelles aux variations mêmes de la quantité de chaleur, de sorte qu'on peut donner à la loi de Newton cet énoncé souvent utilisé : *Si un corps chaud est placé dans un espace dont la température est inférieure à la sienne, il rayonne à chaque instant une quantité de chaleur proportionnelle à l'excès de sa température sur la température ambiante*.

**POUVOIR ÉMISSIF DES CORPS POUR LA CHALEUR.** — Deux corps de

même forme, de mêmes dimensions, à la même température, émettent des quantités de chaleur plus ou moins grandes. Ce pouvoir varie selon l'état physique des corps, leur nature, la couleur et le degré de poli de leur surface. Ainsi une surface dépolie rayonne plus qu'une surface polie; cela ne paraît pas dépendre du poli lui-même, mais de l'état moléculaire qu'entraîne le polissage : le marbre et l'ivoire ont le même pouvoir émissif, que leur surface soit striée ou non; l'argent laminé a un pouvoir émissif plus grand quand il est dépoli; c'est le contraire pour l'argent fondu. Par le mot surface, il ne faut pas entendre ici la surface mathématique, mais bien une couche d'une certaine épaisseur, et le rayonnement est d'autant plus intense que la densité de la couche superficielle est plus petite. Les couleurs sombres ont, en général, un pouvoir émissif plus grand que les couleurs claires; cependant il y a des exceptions. Enfin le pouvoir émissif change sensiblement avec la température du corps; les quantités de chaleur émises diminuent encore à mesure que diminue l'angle formé par les rayons de chaleur sur la surface qui les émet.

Tous ces phénomènes ont été étudiés par Leslie au moyen de son thermomètre, par La Provostaye, Desains, et surtout par Melloni, au moyen de l'appareil construit par ce dernier. Voici comment on disposait cet appareil pour les expériences relatives au pouvoir émissif des différents corps.

Sur une règle métallique divisée (*fig.* à la page 489), on place un cube dont les diverses faces sont recouvertes de substances différentes. Ce cube contient de l'eau que l'on entretient en ébullition à l'aide d'une lampe à alcool, placée dans la partie creuse du support. A une certaine distance est placée la pile, et des écrans intermédiaires permettent d'arrêter, quand on le veut, le rayonnement. Or, si l'on fait rayonner successivement vers la pile les diverses faces du cube, on obtient des courants dont les intensités, dans l'état d'équilibre, seront précisément la mesure des pouvoirs émissifs des substances qui recouvrent la face du cube.

On ne peut, en réalité, déterminer le *pouvoir émissif absolu* d'un corps, c'est-à-dire *la quantité de chaleur émise pendant l'unité de temps pour l'unité de surface d'un corps*; on n'a que son pouvoir relatif, le pouvoir absolu étant rapporté à celui du *noir de fumée*, que l'on a choisi parce que c'est le corps dont le pouvoir rayonnant est le plus grand et dont on a représenté le pouvoir émissif par 100.

*Tableau des pouvoirs émissifs de divers corps.*

Noir de fumée.....	100	Encre de Chine.....	85	Argent.....	12
Blanc de céruse....	100	Gomme laque.....	72	Cuivre jaune....	12
Carbonate de plomb	100	Mercure .....	20	Or en feuilles....	4.25
Ivoire, jais, marbre	98	Plomb .....	19	Argent poli.....	3
Papier.....	98	Fer, acier.....	15	Laiton poli.....	3
Verre.....	90	Étain en feuilles...	12	Argent mat bruni	2.40

**POUVOIR ABSORBANT DES CORPS POUR LA CHALEUR.** — On appelle *pouvoir absorbant* la propriété qu'ont les corps d'absorber une quantité plus ou moins considérable de la chaleur qui tombe sur leur surface. Pour déterminer ce pouvoir, Melloni plaçait devant la pile, disposée comme pour l'expérience précédente, un disque métallique très mince, enduit du côté de la pile de noir de fumée, et, du côté de la source de chaleur, de la substance dont on voulait étudier le pouvoir absorbant. Sous l'influence du rayonnement, le disque s'échauffait et rayonnait lui-même vers la pile, en raison de la quantité de chaleur qu'il avait absorbée. Il procédait ainsi pour ne pas altérer la pile, appareil fort délicat. Le galvanomètre indiquait les accroissements ou les diminutions de température. Plus simplement, mais un peu moins rigoureusement, on place la boule du thermomètre différentiel de Leslie au foyer d'un miroir ardent, en recouvrant successivement cette boule des diverses matières dont on veut connaître le pouvoir absorbant, et l'autre boule du thermomètre marque les changements de température.

De ces expériences, on a tiré cette conclusion, facile à prévoir, que les nombres qui représentent le pouvoir absorbant sont, pour chaque substance, les mêmes que ceux qui représentent le pouvoir émissif. En effet, l'émission ou l'absorption de la chaleur sont deux phénomènes de même nature; c'est un flux de chaleur qui tend à entrer dans un corps ou à en sortir.

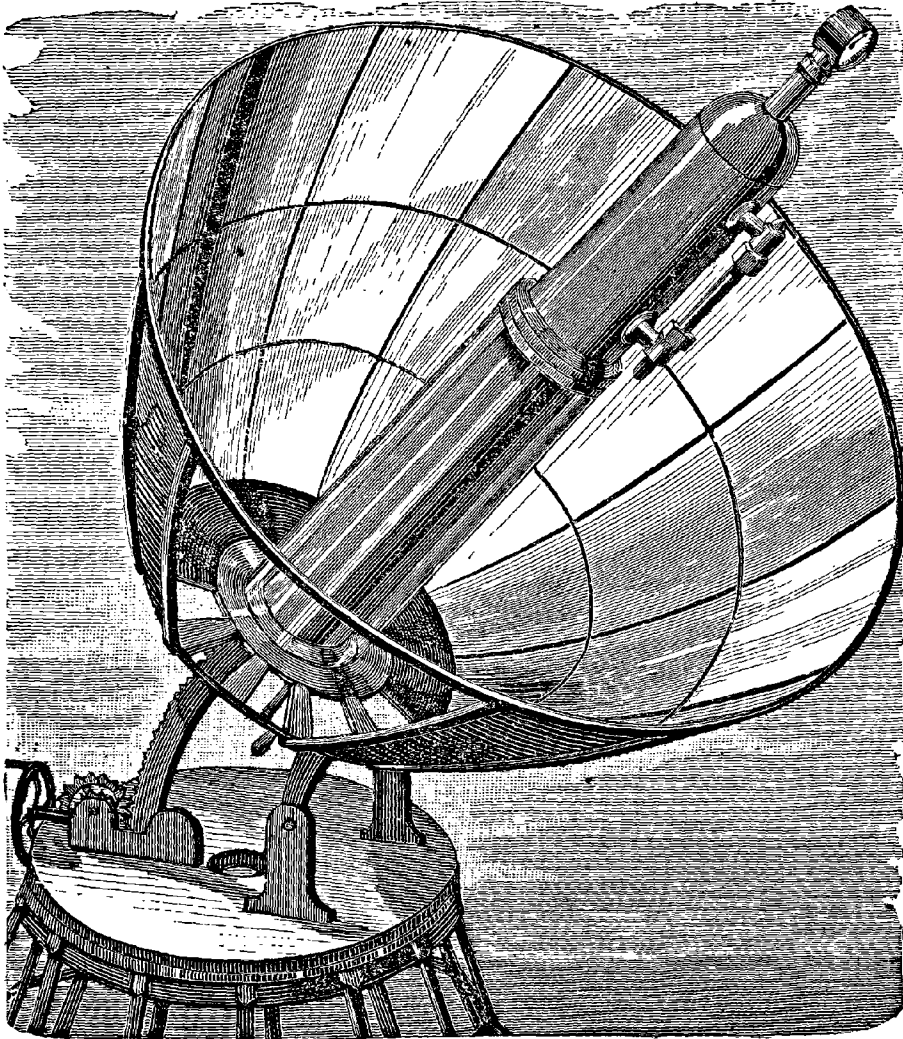
La nature de la source de chaleur qui rayonne sur le corps a une influence très marquée sur le pouvoir absorbant. Aussi les expériences sont-elles faites successivement avec une lampe de Locatelli, un fil de platine incandescent, le cube de Leslie, une plaque de cuivre chauffée à 160°, etc.

On a remarqué, à la suite de ces expériences, qu'en général le pouvoir absorbant d'un même corps augmente à mesure que la température de la source est moins élevée.



Une observation fournie par les phénomènes naturels confirme ce fait important.

Tout le monde a remarqué que la neige fond beaucoup plus vite



Chaudière solaire de M. Mouchot (page 504).

dans le voisinage des arbres, à l'ombre, qu'en rase campagne, en plein soleil. Cela tient à ce que les branches, échauffées par le soleil, constituent une source de radiations obscures à basse température et, par suite, beaucoup plus absorbantes que les rayons directs du soleil.

**POUVOIR RÉFLECTEUR DES CORPS POUR LA CHALEUR.** — Le *pouvoir réflecteur* d'un corps est le *rapport entre la quantité de chaleur rayonnante qu'il reçoit et celle qu'il réfléchit dans le même temps.*

Pour déterminer ce rapport, on opère de la manière suivante (*fig. 263*) : En un point R de la règle de l'appareil de Melloni, ci-dessus décrit, se trouve un support portant une plate-forme divisée P. Une seconde règle RT mobile, à charnière autour de l'axe du support, porte l'appareil thermoscopique E. Sur la plate-forme P, on place une plaque de la substance S à étudier, et on dirige la règle mobile RT de façon que les rayons émis par la lampe L

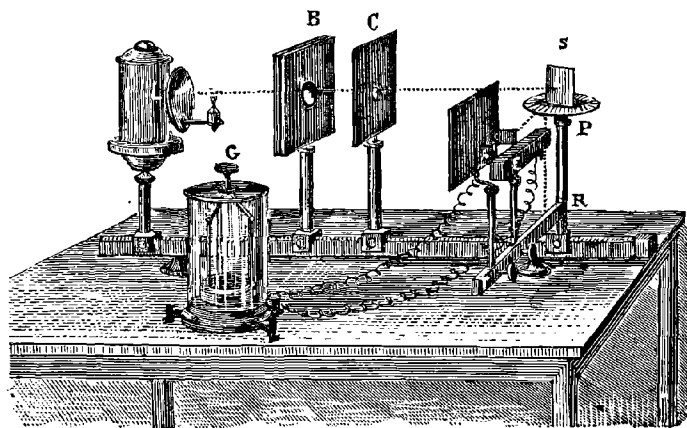


Fig. 263. — MESURE DU POUVOIR RÉFLECTEUR DES CORPS

viennent aboutir à l'ouverture de la pile, après leur réflexion sur la plaque, formant ainsi la ligne LSE. Le rapport entre l'intensité obtenue en E et celle obtenue directement en S, rapport constaté par le galvanomètre G, donne la mesure du pouvoir réflecteur.

Des expériences faites par Melloni, La Provostaye, Desains, il résulte que, pour le pouvoir réflecteur, comme pour le pouvoir rayonnant et pour le pouvoir absorbant, la source de chaleur a quelque influence, de même encore que l'angle d'incidence, dont le maximum de réflexion a lieu vers l'incidence de  $70^{\circ}$  à  $75^{\circ}$ , pour les métaux et les surfaces polies. Ainsi, le pouvoir réflecteur de l'argent poli qui est de 0,97 pour les rayons de la lampe de Locatelli, tombe à 0,92 pour les rayons solaires.

On voit que le pouvoir réflecteur de l'argent poli est extrêmement considérable. Comme il résulte d'ailleurs d'expériences comparatives très nombreuses, que, dans les radiations à la fois lumineuses et calorifiques, la chaleur et la lumière se réfléchissent en égale proportion, on comprend

tout l'avantage que présentent les miroirs argentés employés depuis quelque temps dans la construction des télescopes.

Il a été constaté cependant que les surfaces en cuivre poli sont encore celles pour lesquelles le thermomètre de Leslie ou le galvanomètre de l'appareil de Melloni accusent les plus hautes températures. Ce métal a donc le plus grand pouvoir réflecteur. C'est pourquoi il a été pris comme point de comparaison. Voici le tableau des pouvoirs réflecteurs de quelques corps :

Cuivre jaune poli.....	100	Zinc.....	81
Plaqué d'argent.....	97	Étain en feuilles.....	80
Or.....	95	Platine poli.....	80
Laiton.....	93	Fer.....	77
Argent.....	90	Acier.....	70
Métal des miroirs.....	86	Plomb.....	60
Étain.....	85	Verre.....	10
Platine bruni.....	83	Noir de fumée.....	0

On voit, d'après ce tableau, que le pouvoir réflecteur est en raison inverse des pouvoirs émissif et absorbant. Il est évident, en effet, que moins un corps absorbe de chaleur rayonnante, plus il en réfléchit, et réciproquement.

**POUVOIR DIFFUSIF DES CORPS POUR LA CHALEUR.** — On entend par *pouvoir diffusif* d'un corps son pouvoir d'une réflexion irrégulière de chaleur, réflexion dont l'irrégularité est produite, sans doute, par la multitude des aspérités qui se rencontrent à la surface des corps les plus polis. La *diffusion* se constate facilement au moyen de l'appareil de Melloni. Si, comme dans les expériences sur les pouvoirs réflecteurs, on fait réfléchir un faisceau calorifique sur une plaque enduite d'une matière présentant une surface non polie, on obtiendra une déviation du galvanomètre, dans quelque position que l'on place la pile au devant de la plaque. Ainsi s'explique l'intensité de la chaleur que l'on éprouve dans le voisinage d'un mur blanc éclairé par le soleil, lors même qu'on serait à l'abri des radiations directes.

**DIATHERMANÉITÉ ET ATHERMANÉITÉ.** — Parmi les corps, les uns se laissent traverser par les rayons calorifiques et sont dits *diathermanes* (du grec *dia*, à travers; *thermé*, chaleur); les autres ne les laissent pas passer et sont dits *athermanes* (du grec *a*, privatif; *thermé*, chaleur).

Ce fut Pictet qui, le premier, constata l'élévation de température d'un thermomètre séparé de la source de chaleur par une lame transparente. On objecta aussitôt que cette élévation de température provenait de l'échauffement de la lame qui rayonnait ensuite sur le thermomètre. Prévost réfuta cette objection en interposant une nappe d'eau ou une plaque de glace entre la source de chaleur et le thermomètre. Delaroché poursuivit ces expériences ; mais c'est Melloni, grâce à sa pile thermoscopique, qui put apporter à cette partie de la physique les résultats précis dont la science lui est redevable.

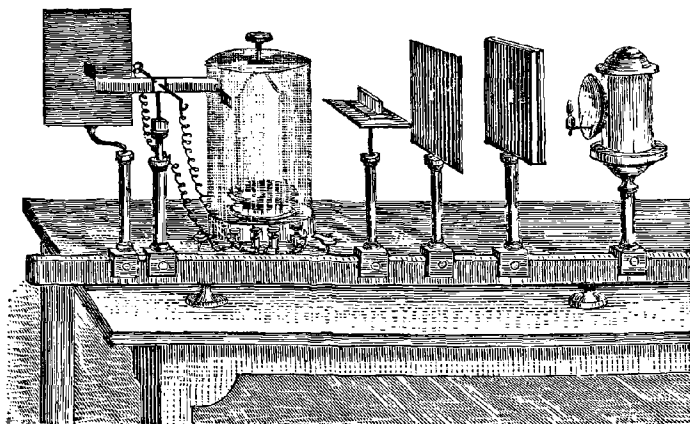


Fig. 264. — MESURE DU POUVOIR DIATHERMIQUE.

Melloni ne se contenta pas de faire des expériences avec le verre, il opéra, rapporte M. Hoeffler, sur trente-six substances différentes, réduites en lames d'égale épaisseur, d'un peu plus de deux millimètres et demi, et sur vingt-huit liquides d'une épaisseur de couche plus forte. Il plaça chacune de ces substances sur la route des rayons calorifiques émanés successivement de quatre sources de chaleur différentes, à savoir : un vase rempli d'eau bouillante, une lame de cuivre chauffée à 400°, du platine incandescent et une lampe de Locatelli (*fig. 264*). Chacune de ces sources était disposée à des distances telles de l'appareil thermométrique, qu'elles y produisaient toutes le même effet sans l'écran formé par la substance étudiée, c'est-à-dire que la source de chaleur la plus intense était la plus éloignée, la plus faible la plus rapprochée, tandis que les deux autres se trouvaient à des distances intermédiaires. Cette disposition permettait de considérer les *quantités* de chaleur qui arrivaient à l'appareil thermoscopique comme *égales*, mais comme de qualités différentes, puisqu'elles ne provenaient pas d'une seule et même source. Or,

aucune des substances interposées comme écran ne se trouve, sauf une seule, transmettre la même proportion de chaleur rayonnante. Ainsi, pendant que le carbure de soufre en transmettait 63 pour 100, l'eau n'en laissait passer que 11 pour 100. Le sel gemme eut seul la propriété de transmettre toujours la même proportion (environ 92 pour 100) de tous les rayons de chaleur, de quelque source qu'ils émanassent. De là, la conclusion que les rayons de chaleur se comportent comme les rayons de lumière, qui passent plus facilement les uns que les autres à travers des écrans diversement colorés. Le sel gemme est, pour les rayons calorifiques, ce qu'un milieu incolore, tel qu'une lame de verre, est pour les rayons lumineux. « Si notre tact, ajoutait l'habile observateur, était aussi sensible » que notre œil, il est probable que, de même que les rayons de lumière » différents que nous désignons sous le nom de couleurs, les rayons de » chaleur différents nous procureraient aussi des impressions différentes. » Nous sommes, pour la chaleur, ce que seraient pour la lumière ceux » qui ne discerneraient pas les couleurs et ne seraient affectés que par » le plus ou moins d'intensité des rayons lumineux. » Les physiiciens se sont accordés depuis sur la cause qui nous empêche de voir les radiations obscures ; il faudrait les chercher dans les humeurs de l'œil, où ces radiations viennent s'éteindre.

Poursuivant ses expériences, Melloni trouva que les substances qui laissent passer le mieux la lumière ne sont pas celles qui transmettent le mieux la chaleur. Ainsi l'eau, les cristaux d'alun et de sulfate calcaire, quoique bien transparents, ne laissent passer qu'une très petite quantité de chaleur, tandis que le mica noir, complètement opaque, peut, en lames très minces, transmettre de 40 à 60 pour 100 des rayons calorifiques émanés d'une source d'alcool.

Enfin Melloni est parvenu à déterminer la diathermanéité propre à un grand nombre de substances, en mettant simultanément deux ou plusieurs écrans sur la route des mêmes rayons calorifiques ; et, de même qu'un verre bleu mis sur le parcours des rayons lumineux sortis d'un verre rouge n'en transmet aucun, parce que les rayons transmissibles par chacun des deux verres ne sont pas les mêmes, de même aussi, démontra-t-il, les rayons calorifiques sortis d'une lame d'alun ne traversent pas une lame de sulfate calcaire, tandis qu'ils passent facilement à travers une autre substance. En opposant ainsi les écrans de différentes substances les uns aux autres, Melloni réussit à déterminer leur diathermanéité relative, et il montra que, comme pour la lumière, on peut avoir, pour la chaleur, des lentilles et des prismes, avec cette différence qu'il faut, pour les fabriquer, employer le sel gemme au lieu de verre.

Les découvertes de Melloni ont été exposées et développées par Masson, Jamin, Tyndall, La Provostaye et Desains. M. Tyndall imagina une méthode très sensible pour mesurer les absorptions de la chaleur par différents gaz, c'est-à-dire leur athermanéité; et il conclut de ses recherches, que cette faculté d'absorption n'existe pas dans les gaz simples ni dans leurs mélanges, tels que l'air; qu'elle est, au contraire, très énergique dans l'oxyde d'azote, contenant les mêmes éléments que l'air et presque dans les mêmes proportions; enfin qu'elle dépend de la constitution moléculaire. Il remarqua aussi que les liquides les moins diathermanes, c'est-à-dire qui absorbent le plus de chaleur, donnent les vapeurs les plus absorbantes; que, par conséquent, l'eau étant le liquide le moins diathermane, la vapeur aqueuse doit être la plus absorbante des vapeurs.

L'importance de ce fait, en météorologie, ne lui échappa point; il montra qu'il suffit de la présence d'un demi-centième de vapeur d'eau, dans une épaisseur de quatre à cinq mètres d'atmosphère, pour que tous les rayons venus du sol y soient arrêtés. Il faisait, à cet effet, passer un faisceau calorifique dans un tube contenant de l'air sec: l'aiguille du galvanomètre de l'appareil de Melloni déviait d'une certaine quantité. A l'aide d'une source de chaleur agissant en sens contraire, l'aiguille revenait au zéro. En laissant alors arriver de la vapeur d'eau ou de l'air humide, l'aiguille continue sa marche en arrière, de manière à accuser une diminution de chaleur transmise.

De là il concluait que c'était la vapeur d'eau, toujours contenue dans l'atmosphère, qui affaiblit les rayons solaires directs, et aussi que les rayons calorifiques émanés par la terre maintiennent à une température plus élevée les couches basses de l'atmosphère. « En considérant, dit-il, la terre comme une source de chaleur, on pourra admettre comme certain que » 10 au moins pour 100 de la chaleur qu'elle tend à rayonner dans l'espace » sont interceptés par les dix premiers pieds d'air humide qui entourent » sa surface. Si l'on enlevait à l'air, en contact avec la terre, la vapeur » d'eau qu'il contient, il se ferait, à la surface du sol, une déperdition de » chaleur semblable à celle qui a lieu à de grandes hauteurs; car l'air » lui-même se comporte comme le vide, relativement à la transmission » de la chaleur rayonnante. »

**APPLICATIONS DIVERSES DES PRINCIPES DE LA CHALEUR RAYONNANTE.** — Nous réunirons, dans le chapitre consacré à la *Météorologie*, les applications des principes de la dilatation des corps et ceux de la chaleur rayonnante aux grands phénomènes physiques, tels que la formation de la rosée, des gelées blanches, des vents, etc.

Dans les circonstances ordinaires de la vie, nous voyons les jardiniers peindre en noir les murs de leurs espaliers, afin que les rayons solaires soient absorbés et que le mur, échauffé, rayonne ensuite de la chaleur obscure vers les fruits; ceux-ci reçoivent ainsi à la fois cette chaleur et celle qui vient directement du soleil. Dans les fonderies, les ouvriers regardent la coulée de métal incandescent à travers des plaques de verre. Il n'y a que les rayons lumineux qui atteignent leurs yeux, et ils sont les moins ardents. Ce sont surtout les paupières qu'il faut ainsi préserver; l'œil lui-même est moins exposé, car ses liquides arrêtent les rayons obscurs et empêchent le fond de l'œil d'être brûlé. Dans nos serres, sous les cloches de nos jardins, la température de l'air est beaucoup plus élevée que celle de l'air extérieur, parce que la chaleur lumineuse du soleil traverse facilement le verre et est absorbée par la terre et la plante, tandis que la chaleur obscure que celles-ci rayonnent ne peut à son tour traverser le verre et reste confinée. Ainsi s'explique la chaleur accablante que l'on éprouve sous les vitrages de nos gares, de certains salons d'exposition, et aussi de quelques ateliers, où l'on a sacrifié l'hygiène des ouvriers à certaines considérations, souvent bien futiles.

« Les naturalistes, dit Bernardin de Saint-Pierre dans ses *Études de la nature*, regardent les couleurs comme des accidents. Mais si nous considérons les usages généraux où les emploie la nature, nous serons persuadés qu'il n'y a pas sur les rochers une seule nuance placée en vain. La nature emploie, au nord, la couleur blanche, pour augmenter la lumière et la chaleur du soleil. La plupart des terres y sont blanchâtres ou d'un gris clair. Les rochers, les sables y sont remplis de mica et de parties spéculaires. De plus, la blancheur des neiges qui les couvrent en hiver, et les parties vitreuses et cristallines de leurs glaces sont très propres à y affaiblir l'action du froid, en y réfléchissant la lumière et la chaleur de la manière la plus avantageuse. Les troncs des bouleaux qui y composent la plus grande partie des forêts ont l'écorce blanche comme du papier. Dans quelques endroits même, la terre est tapissée de végétaux tout blancs. Dans la partie orientale des hautes montagnes qui séparent la Suède de la Norvège, exposée à la plus grande rigueur du froid, il y a une forêt épaisse, et singulière en ce que le pin qui y croît est rendu noir par une espèce de lichen filamenteux qui y pend en abondance, tandis que la terre est couverte, partout aux environs, d'un lichen blanc, qui imite la neige par son éclat. La nature y donne la même couleur à la plupart des animaux, comme aux ours blancs, aux loups, aux perdrix, aux lièvres, aux hermines; les autres y blanchissent sensiblement en hiver, tels que les renards et les écureuils, qui sont roux en été et petit-gris en hiver. Si

nous considérons même la figure filiforme de leurs poils, leur vernis et leur transparence, nous verrions qu'ils sont formés de la manière la plus propre à réfléchir et à réfranger les rayons lumineux. On n'en doit pas considérer la blancheur comme une dégénération ou un affaiblissement de l'animal, ainsi que l'ont fait les naturalistes, par rapport aux cheveux des hommes qui blanchissent dans la vieillesse; car il n'y a rien de si touffu que la plupart de ces animaux, ni rien de si vigoureux que les animaux qui les portent.

» La nature, au contraire, a coloré de rouge, de bleu et de teintes sombres et noires, les terres, les végétaux, les animaux, et même les hommes qui habitent la zone torride, pour y éteindre les feux de l'atmosphère brûlante qui les environne (1). Les terres et les sables de la plus grande partie de l'Afrique, située entre les tropiques, sont d'un rouge brun, et les rochers en sont noirs. Les îles de France et de Bourbon, qui sont sur les lisières de cette zone, ont, en général, cette nuance. J'y ai vu des poules et des perroquets dont non seulement le plumage, mais la peau était teinte en noir. J'y ai vu aussi des poissons tout noirs, parmi les espèces qui vivent à fleur d'eau, telles que les vieilles et les raies. Comme les animaux blanchissent en hiver, au nord, à mesure que le soleil s'en éloigne, ceux du midi se colorent de teintes foncées, à mesure que le soleil s'approche d'eux.

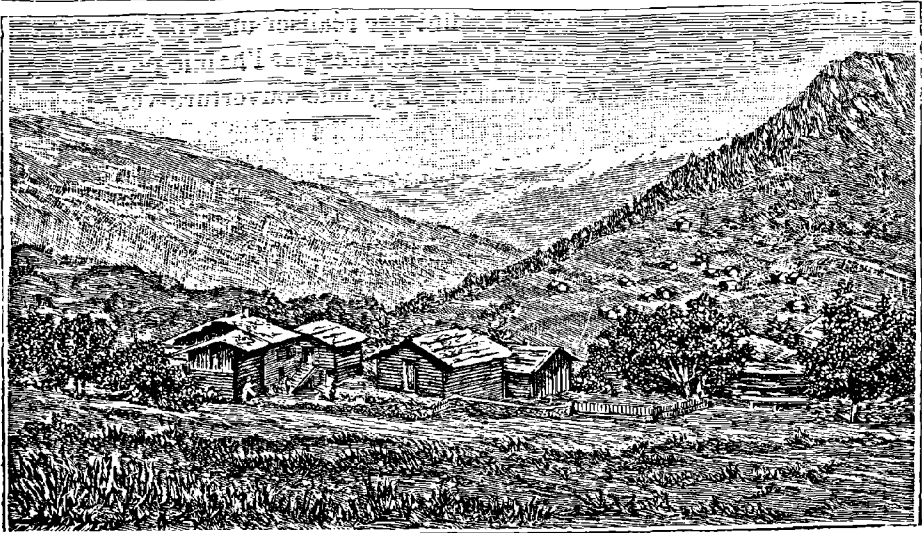
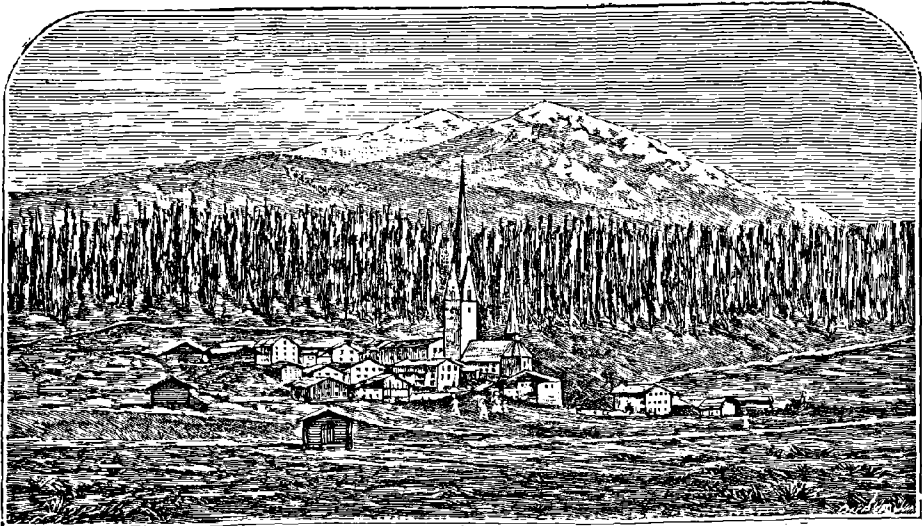
» Il y a encore ceci de très remarquable et de conséquent à l'emploi que la nature fait de ses couleurs au nord et au midi; c'est que par tout pays, la partie du corps d'un animal qui est la plus blanche, est le ventre, parce qu'il faut plus de chaleur au ventre pour la digestion et les autres fonctions; et, au contraire, la tête est partout la plus fortement colorée, surtout dans les pays chauds, parce que cette partie a plus besoin de fraîcheur dans l'économie animale... »

**CHAUDIÈRE SOLAIRE.** — M. Mouchot, professeur de physique au collège de Tours, a imaginé une curieuse application, réellement industrielle, de la chaleur solaire à la mécanique. Certes, l'on avait songé, depuis longtemps, à utiliser la radiation solaire pour obtenir des températures élevées. La couleur noire possédant, à l'inverse de la couleur blanche, la propriété d'absorber le calorique, en employant, dans la fabrication d'un récipient, un métal noir pour emmagasiner de la chaleur, et un métal blanc pour la rassembler et la projeter sur le noir, on était sûr

(1) Comme l'absorption des rayons solaires pourrait être trop forte et empêcher que l'émission de sa propre chaleur qui le refroidit fût abondante, une sueur huileuse lubrifie la peau du nègre, afin que les rayons soient fortement réfléchis à sa surface.



d'obtenir une chaleur très grande. L'eau contenue dans un récipient de cette sorte entre en ébullition au bout de très peu de temps, surtout si l'on entoure le récipient d'une sorte d'abat-jour en métal blanc et poli.



Vue des villages de Davos-Dorfli et Davos-Platz (Suisse) [page 508].

Les rayons du soleil sont réfléchis par ce miroir et tombent sur le récipient noir qui les absorbe. B. de Saussure faisait cuire ainsi de la viande dans les Alpes; plus d'un physicien s'est amusé, depuis, à préparer son café ou son thé à la chaleur solaire pendant ses excursions dans les Alpes.

Il faut même remonter très haut pour retrouver l'application de la chaleur du soleil à la production des températures élevées : Plutarque, à propos de l'entretien du feu sacré par les vestales, nous apprend qu'au temps de Numa Pompilius on n'ignorait pas ce procédé.

« Et si d'aventure, dit-il, ce feu vient à faillir, comme à Athènes s'éteignit la sainte lampe du temps de la tyrannie d'Aristion, et à la ville de Delphes lorsque le temple d'Apollon fut brûlé par les Mèdes, et aussi à Rome du temps de la guerre contre le roi Mithridate et du temps des guerres civiles, quand le feu et l'autel furent ensemble consumés, les pontifes disent qu'il ne le faut pas rallumer d'un autre feu matériel, mais en faire un tout neuf, en le tirant de la flamme pure des rayons du soleil, ce qu'ils font de la manière suivante : Ils ont un vase creux formé avec le côté d'un triangle ayant un angle droit et deux jambes égales, de sorte que de tous les endroits de son tour et de sa circonférence il va aboutissant à un même point ; puis ils inclinent ce vase vers le soleil rayonnant, de telle sorte que les rayons allumés s'en vont, de tous côtés, s'unir et s'assembler au centre du vase. Là, ils subtilisent l'air si fortement qu'il s'enflamme ; et quand on en approche quelque matière aride et sèche, le feu y prend de suite... »

M. Mouchot a repris l'idée ancienne, et, après quinze années de tâtonnements et d'expériences, il a fini par réaliser un type satisfaisant.

Voici brièvement les dispositions adoptées par l'habile physicien :

Imaginez un abat-jour tournant sa grande ouverture vers le soleil (*fig.* page 497). Il a 2<sup>m</sup>,60 de diamètre en haut, 1 mètre en bas ; la surface d'insolation est, par conséquent, de 4 mètres carrés. L'abat-jour en tronc de cône forme un angle de 45 degrés, la forme la plus convenable pour bien rassembler les rayons et les renvoyer sur le récipient à échauffer. La paroi intérieure ou réfléchissante de l'abat-jour est plaquée d'argent, mais pourrait être tout aussi bien en laiton poli. Ce réflecteur circulaire n'est pas d'une seule pièce ; il est formé de douze secteurs qui glissent à coulisse dans un châssis de fer et que l'on peut facilement enlever pour le nettoyer. L'abat-jour repose sur un disque de fonte qui sert également de support à la chaudière. Le récipient-chaudière a la hauteur de l'abat-jour ; il est en cuivre noirci extérieurement et se compose de deux parois concentriques en forme de cloche. La paroi extérieure a 0<sup>m</sup>,80 de hauteur ; la paroi intérieure 0<sup>m</sup>,50. Les diamètres respectifs sont 28 et 22 centimètres. L'eau est versée entre ces deux parois, de manière à constituer un cylindre annulaire de 0<sup>m</sup>,03 d'épaisseur. Le volume du liquide n'excède pas 20 litres, pour laisser dix litres environ à la chambre de vapeur. De la base du récipient part un tuyau ; c'est le tuyau d'alimentation d'eau ; à la partie supérieure, un autre tuyau, c'est le tuyau de vapeur sur lequel

on greffe les appareils de sûreté. Enfin, entre la chaudière et l'abat-jour réflecteur se place une cloche de verre de 0<sup>m</sup>,85 de haut sur 0<sup>m</sup>,40 de large et de 0<sup>m</sup>,005 d'épaisseur.

La chaudière est donc sous cloche.

Ce n'est pas tout cependant. Le soleil se déplace, et au bout d'une demi-heure, les rayons, au lieu de tomber sur l'appareil, tomberaient à côté; il faut que tout le système tourne de 15 degrés par heure autour d'un axe parallèle à l'axe du monde et s'incline graduellement sur cet axe, selon la déclinaison du soleil. M. Mouchot a satisfait très simplement à cette condition en installant l'appareil sur une tige solide, inclinée à l'horizon, et formant avec lui un angle égal à la latitude du lieu. A l'aide d'une vis sans fin, un simple coup de manivelle, donné toutes les demi-heures, fait pivoter la chaudière de l'angle voulu. Tous les huit jours, un autre coup de manivelle incline un peu la chaudière, qui s'appuie sur la tige mobile à l'aide de tourillons; la chaudière est ainsi obligée de se présenter sans cesse au soleil, quelle que soit l'époque de l'année. Le mouvement horaire d'orient en occident pourrait même devenir automatique sans beaucoup de dépense. Tel est le système.

Avec cet appareil, M. Mouchot vaporise 5 litres d'eau par heure, ce qui répond à un débit de vapeur de 140 litres par minute; il a pu mettre en marche un moteur de Behrens, lequel a fait marcher à grande vitesse une pompe élévatoire. Il a suffi de faire arrêter la vapeur de l'appareil dans un fourneau surmonté d'un alambic pour distiller 5 litres de vin en un quart d'heure. Cette même vapeur cuisait en abondance les légumes, la viande, etc. En somme on évalue que cet appareil peut emprunter au soleil, sous notre latitude, de 8 à 10 calories par minute et par mètre carré. Un cheval-vapeur consomme environ 20 litres d'eau. La surface de chauffe ordinaire dans une chaudière est d'environ 1 mètre carré à 1 mètre carré 1/2 avec un approvisionnement de 2 à 3 kilogrammes de houille en moyenne pour les bonnes machines. La chaudière de M. Mouchot vaporise 5 litres par heure avec une surface de chauffe de 3 mètres carrés; c'est inférieur, à la vérité, à ce que nous obtenons avec la houille; mais, en revanche, les rayons solaires ne coûtent absolument rien, et c'est, en pareille matière, l'argument décisif. D'ailleurs le rendement croîtrait avec les dimensions de l'appareil.

Il est possible que les chaudières solaires restent, pour notre latitude, un simple objet de curiosité. Le soleil est très capricieux sous notre climat; mais il est des contrées où le ciel reste longtemps pur et où la radiation solaire conserve sans cesse une énergie considérable. Dans ces régions, où précisément le charbon est très cher en général, les chau-

dières et les machines solaires pourraient être utilisées dans d'excellentes conditions.

**APPLICATION AUX CLIMATS.** — Sur une haute montagne, le sol, à la surface et à quelques décimètres de profondeur, s'échauffe plus que l'air, tandis que le contraire a lieu dans les plaines peu élevées au-dessus de la mer. Ce phénomène exerce une grande influence sur la géographie physique des hautes montagnes. Il relève la ligne des neiges éternelles dont la fusion est due principalement à la chaleur de la terre sous-jacente ; car, dans ces hautes régions, les neiges fondent en dessous, et elles déterminent le glissement de ces champs de neige qui forment les avalanches du printemps des pentes gazonnées. Cet échauffement influe surtout sur la station des plantes de montagnes, et, en particulier, des plantes alpines, et cela nous explique la variété d'espèces végétales et le nombre d'individus qui couvrent le sol à la limite même des neiges éternelles. Quelquefois, sous une couche superficielle de neige glacée, on est surpris de trouver des plantes fleuries. Dans les Alpes, les plantes sont chauffées par le sol plus que par l'air ; favorisées par une vive lumière, préservées des froids accidentels par les couches récentes de neige, sans cesse humectées par les nuages ou arrosées par les eaux qui s'écoulent des neiges fondantes, également sensibles d'ailleurs au froid et à la chaleur, elles ne peuvent supporter que des températures comprises entre 0° et 15° environ. Aussi leur culture dans les jardins exige-t-elle des soins assez minutieux.

M. Frankland, le savant chimiste de la Société royale de Londres, a transmis, il y a quelques années, à l'Académie des sciences, des observations très intéressantes. On ne croirait pas volontiers, sans preuves, qu'il existe en pleine Suisse, à plus de 1,500 mètres d'altitude, et en plein hiver, un climat assez doux pour que les touristes puissent déjeuner dehors en tenue d'été. Il en est cependant ainsi, et, par une contradiction apparente assez singulière, alors que le climat du pays dont nous parlons est froid en été, il devient chaud et hospitalier en hiver. Il s'agit des villages de Davos-Dorfli et Davos-Platz, situés dans la vallée de Pratigatüi, canton des Grisons (1).

Fait singulier : la montagne est couverte d'un épais manteau de neige, et les poitrinaires, à qui l'on conseille le séjour de ce village, peuvent se promener au milieu d'une atmosphère tiède. Comment expliquer ce climat bizarre qui permet au voyageur de se promener, comme à Nice,

(1) De Parville, *Ubi supra*.

à la température des orangers, quand, autour de lui, s'étale un épais manteau de neige ?

Parce que la radiation solaire est d'autant plus énergique que la transmission des rayons est moins gênée par son passage à travers une grande masse d'air. Aussi, plus on s'élève plus le soleil darde des rayons chauds. La chaleur n'a pas été absorbée en haut autant que s'il lui avait fallu traverser les basses régions atmosphériques. Tous les touristes savent que les coups de soleil sont bien plus à craindre en montagne qu'en plaine. La vapeur d'eau jouit de la propriété d'absorber les rayons calorifiques au plus haut degré; elle fait écran à la radiation solaire, qui augmente ou diminue singulièrement, suivant la quantité de vapeur d'eau que contient l'air... Avec l'air humide, inutile de se munir d'ombrelle; avec de l'air sec, il faut se défier de l'énergie de la radiation. Le thermomètre, exposé au soleil, monte beaucoup plus par un ciel pur et une atmosphère sèche que par un temps humide. Ajoutons que l'air peut être très humide, bien que le ciel paraisse très clair et très pur.

Or, à Davos, l'air est particulièrement sec; la neige a solidifié l'humidité; le soleil est impuissant à fondre cette neige. Les rayons parviennent sans obstacle jusqu'au sol et élèvent la température en raison du pouvoir d'absorption calorifique du corps qu'ils touchent. Aussi, dès le lever de l'astre, on est directement chauffé par ses rayons. Le même effet avait été très nettement constaté par M. Desains, en 1809, au Rigi-Kulm. La température est glaciale avant le lever du jour. Dès que l'astre apparaît, on peut retirer son pardessus, la chaleur devient immédiatement printanière.

La réflexion des rayons par la neige contribue encore à la douceur des climats. M. Dufour a montré, en juin 1873, qu'une grande partie de la chaleur directe envoyée sur le lac de Genève, entre Lausanne et Vevey, est réfléchi par la surface de l'eau comme par un miroir. La proportion peut dépasser 0,50 quand le soleil est bas à l'horizon. Cette chaleur vient élever la température du rivage; on peut s'expliquer aussi de cette manière la facilité si grande avec laquelle on gagne des coups de soleil quand on navigue sur les grandes rivières et sur les lacs.

L'écart énorme de température que l'on remarque dans certaines contrées pendant la nuit et le jour n'a pas d'autre origine que la faculté de radiation de la chaleur à travers une atmosphère dépourvue de vapeur d'eau. Dans l'Afrique méridionale, dans le désert même, le thermomètre descend, pendant la nuit, au-dessous de zéro : on recueille de la glace, et, pendant le jour, il monte jusqu'à 96° et 98° au soleil. M. Hooker, dans son *Journal de l'Himalaya*, dit : « A 7,400 pieds, l'effet moyen des rayons de

soleil sur la boule *noircie* d'un thermomètre est de 125°; à 13,000 pieds, en janvier, il est de 130°. Dans l'Australie centrale, selon M. Jevons, les fluctuations de la température sont énormément accrues. Le thermomètre peut s'élever à l'ombre à 115°, et au soleil à 140° et même à 150°. Ne nous plaignons donc pas trop des températures de 30° que nous supportons accidentellement sous nos latitudes. L'écart dépend évidemment de la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'air. Ainsi, à Greenwich, l'ascension moyenne du thermomètre ne dépasse pas 17°; dans l'intérieur de l'Afrique, l'écart journalier atteint assez souvent 100°. A Greenwich et à Paris, nous sommes protégés par la vapeur d'eau qui nous abrite contre la radiation et la déperdition; dans le désert, l'air sec laisse circuler le calorique, et l'on est soumis brusquement aux influences calorifiques extrêmes.

**CLIMAT LOCAL.** — La croissance et la belle venue des arbres de nos bois dépend, en grande partie, des circonstances climatériques. En culture, on entend par *climat* non seulement la température moyenne, mais encore les températures *extrêmes*, puisque quelques degrés de plus pendant l'hiver suffisent pour faire mourir un arbre, et quelques degrés de plus en été suffisent pour activer considérablement la végétation. On conçoit donc aussi que les brouillards, les gelées, les variations brusques d'humidité, etc., sont des éléments indispensables pour la détermination du climat. On doit donc définir le climat d'un lieu *l'ensemble des phénomènes calorifiques et météorologiques qui s'y produisent et dont l'influence est salutaire ou nuisible à la végétation.*

Outre la division générale en *climats géographiques*, il faut donc s'intéresser aux changements que, dans chaque climat, la température subit sous l'influence de phénomènes météorologiques qui se produisent d'habitude dans un lieu donné. Cela forme le *climat local*.

Le climat local est soumis à quatre influences principales : l'*altitude*, la *configuration*, l'*exposition* et les *abris*.

1° *Altitude.* Lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, la température décroît à peu près progressivement; ce fait a été démontré par Gay-Lussac et constaté depuis par tous les aéronautes. La principale raison de ce fait paraît être la propriété qu'a l'air d'être très *diathermane* pour la chaleur solaire, et beaucoup moins pour la chaleur obscure que renvoie la terre. Les rayons calorifiques traversent donc sans s'y arrêter toute l'atmosphère et viennent échauffer le sol. La terre, ainsi échauffée, envoie sa chaleur aux objets environnants, et cette chaleur obscure s'accumule dans les régions inférieures de l'atmosphère. A cette cause principale du décroissement de la température à mesure qu'on s'élève dans l'air, ajoutons

le rayonnement qui augmente avec la hauteur du lieu où l'on se trouve.

2° La *configuration* terrestre a une large part dans les influences qui modifient le climat local. Elle nous conduit à distinguer les climats de *plaines, de montagnes, de coteaux.*

Le climat de plaines est, en général, plus constant et moins rigoureux que celui des montagnes. La nature du sol et l'état de sa superficie sont des éléments de la plus haute importance dans la question de la détermination du climat d'un pays. Tout le monde sait, en effet qu'un terrain compact et humide augmente la rudesse d'un climat, et on a pu constater combien les déboisements modifient la température moyenne de toute une contrée. Les eaux, les forêts, en exhalant de l'humidité dans l'atmosphère ambiante, tempèrent la chaleur en été; de plus, les masses des bois adoucissent la rigueur de l'hiver en s'opposant au rayonnement terrestre et en arrêtant l'action des vents. Le voisinage des mers influe aussi sur la constance du climat. La vapeur d'eau qui se dégage constamment, et dont la température est à peu près invariable, charge l'air d'humidité et se met en équilibre de chaleur avec lui. Des brises régulières, des ouragans très fréquents sont des phénomènes qui se produisent habituellement dans les contrées voisines de la mer et qui fixent la physionomie de leur climat. La plupart de nos grands arbres se développent et réussissent parfaitement dans les plaines. Le chêne rouvre, le hêtre, l'orme, le frêne, le robinier faux acacia, y sont surtout cultivés avec succès, et les tissus de ces bois sont bien lignifiés.

Le climat des montagnes, dont le caractère est une grande variabilité dans la température et la quantité d'humidité, n'est pas le même selon que l'on considère les trois situations qui le distinguent, c'est-à-dire les vallées, les versants, les plateaux.

Dans les vallées, la chaleur, entretenue par les rayons du soleil réfléchis sur les versants des montagnes, devient très forte, grâce au calme de l'atmosphère. Les cours d'eau qui arrosent le fond des vallées sont la source de l'humidité qui sature l'air et des brouillards fréquents dont il est chargé. Ces brouillards ont une influence très fâcheuse sur la végétation. Ils privent les arbres de la lumière qui leur est indispensable. D'autre part, chacun sait que les phénomènes météorologiques, tels que le serein, les gelées printanières, etc., sont très fréquents dans les vallées. Or ces phénomènes apportent de grandes perturbations dans la constitution des arbres délicats, en particulier de nos arbres fruitiers, dont les bourgeons ne peuvent supporter les gelées. Le climat des vallées est très favorable aux arbres de nos forêts dont l'organisation est plus vigoureuse. Le frêne, par exemple, y réussit à merveille.

Le climat des plateaux dépend principalement de leur élévation au-dessus du niveau de la mer. A de grandes hauteurs, la température est très basse, par la raison indiquée en parlant de l'altitude. Les nuages qui baignent le sommet des montagnes sont la source abondante de l'humidité dont l'air est chargé, et qui se dissipe tout à coup, emportée par un coup de vent. Ces variations brusques d'humidité, jointes aux phénomènes météorologiques, tels que la rosée, le givre, qui se produisent d'habitude sur les plateaux des montagnes, sont très funestes à la végétation.

Le climat des versants tient le milieu entre celui des vallées et celui des plateaux ; cela veut dire que, si le point spécial du versant dont on veut connaître le climat est, par exemple, plus voisin de la vallée que du sommet de la montagne, les phénomènes climatériques qui s'y produisent seront ceux des régions inférieures ; leur intensité sera seulement affaiblie. Dans la région moyenne des versants, le climat est des plus favorables à la végétation, quoique la chaleur y soit moins forte que dans le fond des vallées. Une des causes principales est que la lumière du soleil y arrive sans obstacle et qu'elle y exerce, par conséquent, ses merveilleux effets. Aussi presque tous les arbres de nos forêts, quoique n'atteignant pas des dimensions considérables, se plaisent sur les versants des montagnes.

Le climat des coteaux participe à la fois du climat des plaines et de celui des montagnes. Il est très favorable à la belle venue des arbres ; le chêne yeuse, le charme et surtout le châtaignier y prospèrent à merveille.

L'*exposition* est un élément très important à considérer dans la question du climat local. Les phénomènes météorologiques sont très différents, selon que le lieu dont on veut déterminer le climat est tourné vers tel ou tel point du ciel.

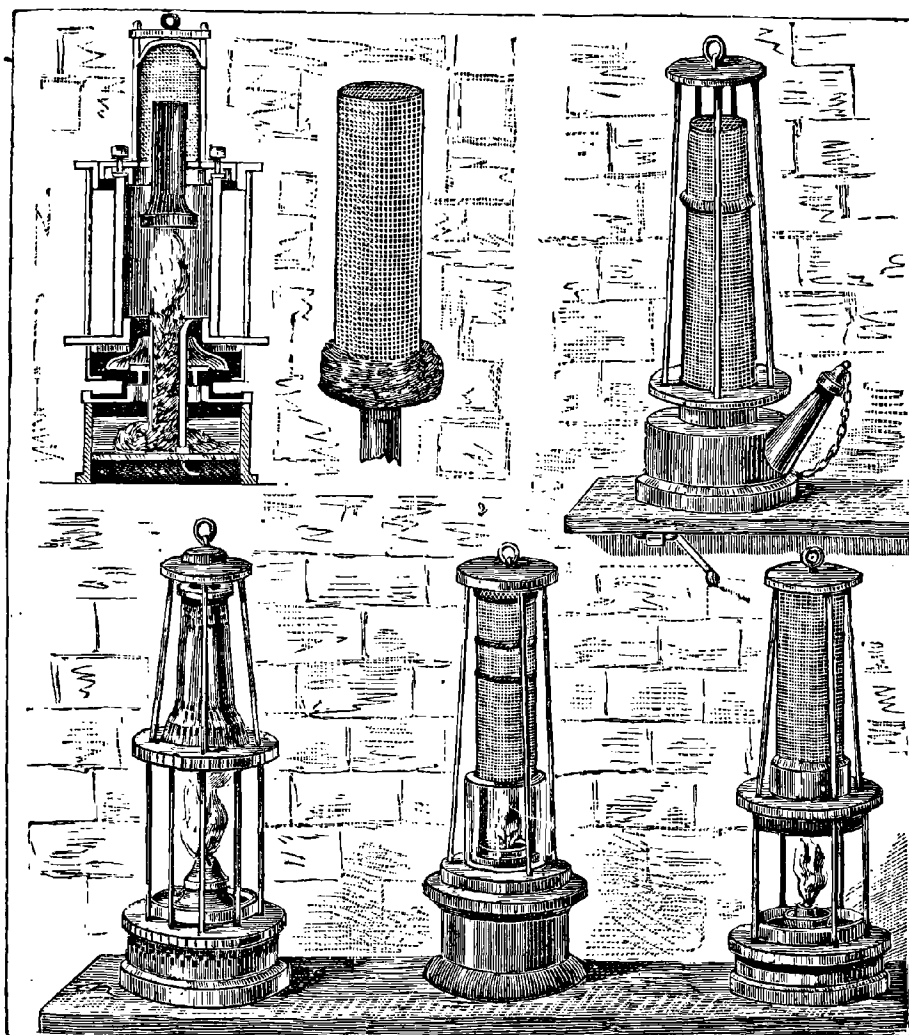
Au nord, les rayons du soleil n'ont aucune action directe. Ils arrivent considérablement affaiblis par de nombreuses réflexions qui les ont modifiés ; de plus, les vents du nord, quoique peu violents, sont toujours rigoureux. Il en résulte qu'à cette exposition, la température est froide, et par suite la végétation tardive. Cette circonstance est très favorable aux bourgeons délicats, qui alors n'ont rien à craindre des gelées printanières. Cette exposition convient à tous les arbres de nos forêts.

A l'est, le climat présente à peu près les mêmes caractères qu'au nord. Cependant la température y est moins froide et l'atmosphère parfaitement sèche. Cette exposition est, comme la précédente, très favorable à la prompte croissance des bois.

Le caractère principal du climat de l'ouest est une température



chaude due aux rayons du soleil de l'après-midi, au moment où ils ont toute leur intensité. Des vents fréquents, toujours chargés d'humidité, adoucissent, par leur passage, la chaleur de l'atmosphère; mais leur



Lampes de sûreté des mineurs (page 520).

violence excessive rend la culture des bois très difficile à cette exposition. Les arbres qui ne sont pas déracinés ou brisés acquièrent une grande solidité dans leurs tissus; mais leur croissance est tourmentée, et leurs formes, chétives et contournées, les rendent impropres à certains usages.

L'exposition du sud a beaucoup d'analogie avec celle de l'ouest; cependant elle est encore plus défavorable à la végétation, par ce motif que les vents qui soufflent au midi, toujours très chauds et très secs, loin de tempérer la chaleur, la rendent excessive. A cette exposition, les arbres sont toujours victimes des gelées printanières; aussi leur accroissement est très lent, leurs formes sont petites et ils n'arrivent jamais à une grande hauteur.

4° Les *abris* ont une grande influence sur le climat local, quels qu'ils soient : abris naturels, tels que montagnes, forêts; abris artificiels, tels que murs, agglomérations de bâtiments, etc. Ils empêchent l'action des vents, si funeste aux arbres; ils arrêtent la production de la rosée et des gelées, en mettant un obstacle au rayonnement des objets vers les espaces planétaires (1).

**RÉFRACTION.** — Grâce à l'appareil de Melloni, il a été constaté que la chaleur, comme la lumière, et aussi comme le son, subissait les lois de la *réfraction*, c'est-à-dire qu'un rayon calorifique, en traversant une substance diathermane, éprouve une déviation, un changement de direction, variable selon la substance traversée. De même, les rayons calorifiques sont de différentes espèces, comme les rayons lumineux. L'identité de la lumière et de la chaleur étant une chose admise, comme nous le verrons ci-après, nous étudierons la réfraction de la chaleur en nous occupant de la réfraction de la lumière.

## CHAPITRE V

### PROPAGATION DE LA CHALEUR CONDUCTIBILITÉ

**CONDUCTIBILITÉ.** — Une observation journalière permet de reconnaître qu'un corps quelconque, étant soumis à l'action de la chaleur dans une de ses parties, les autres parties s'échauffent progressivement jusqu'à

(1) Léopold Giraud, professeur à l'École forestière.

ce que le corps tout entier soit parvenu à la même température. Depuis un temps immémorial, on sait aussi que cette transmission de la chaleur ne se fait pas de la même façon dans tous les corps. Si l'on plonge une cuiller d'argent et une cuiller de fer dans un liquide bouillant, on s'aperçoit que le manche de la cuiller d'argent est bien plus vivement échauffé que le manche de la cuiller de fer. Ce n'est cependant qu'à partir du XVII<sup>e</sup> siècle qu'on a sérieusement étudié ces phénomènes, après avoir donné le nom de *conductibilité* à cette propriété des corps de propager la chaleur de proche en proche dans leur intérieur.

En vérité, la science n'est pas encore assez avancée pour expliquer le mouvement exécuté par les molécules de la matière quand elles subissent l'influence de la chaleur : si on le connaissait, on pourrait probablement calculer les lois de la propagation de la chaleur, comme on a calculé celles de la transmission de la lumière et du son. Toutefois, l'*hypothèse* de Fourier (1), bien qu'elle ne soit encore qu'une *hypothèse*, constitue une *théorie de la conductibilité* assez probable. Partant de la loi de Newton (page 494), il admet qu'une molécule s'échauffe quand elle a absorbé une radiation, et qu'alors elle rayonne autour d'elle. Chaque molécule échauffée rayonne vers les molécules voisines, qui agissent de même à l'égard des suivantes ; et il arrive un moment où chacune d'elles reçoit une quantité de chaleur égale à celle qu'elle perd, soit par le rayonnement sur les molécules voisines, soit, quand elle est près de la surface, par le rayonnement vers l'extérieur, c'est-à-dire par *conductibilité extérieure*. La *conductibilité* ne serait donc qu'une des conséquences du *rayonnement*.

**CONDUCTIBILITÉ DES CORPS SOLIDES.** — Newton, un des premiers, imagina d'échauffer des corps de même dimension pour mesurer le temps qu'ils employaient à passer d'une température donnée à une autre température. Franklin chauffait, par un bout, des prismes de même dimension, et il observait à quelle distance de l'origine ils avaient la même température, ou quelle longueur de chaque prisme était contenue entre deux températures données. Les deux expériences habituellement faites dans les cabinets de physique pour démontrer la conductibilité différente des corps sont les suivantes :

(1) FOURIER (Jean-Baptiste-Joseph), mathématicien, physicien et administrateur distingué (1768-1830). Élevé par les bénédictins, il était destiné à être moine : il préféra devenir un savant. Dès 1795, il était professeur à l'École polytechnique, fit partie de l'expédition d'Égypte avec les savants envoyés par l'Institut. Il resta préfet de l'Isère de 1802 à 1815, entra à l'Académie des sciences en 1817 et en devint secrétaire perpétuel. Il fit aussi partie de l'Académie française. Ses travaux sur la *chaleur* forment son principal titre de gloire.

L'appareil d'Ingenhousz (1), construit d'après l'idée de Franklin (fig. 265), se compose d'une boîte rectangulaire en cuivre ou en fer-blanc, à laquelle sont adaptées, à l'aide de tubulures et de bouchons, des tiges de diverses substances, qui pénètrent de quelques millimètres dans la caisse et sont recouvertes de cire ordinaire, qui fond à 61°. Si l'on verse de l'eau à 100° dans la caisse, on voit la cire fondre sur les tiges à une distance plus ou moins grande de la paroi, ce qui indique le degré de conductibilité de la substance dont sont formées les tiges.

L'autre expérience (fig. 266) consiste à placer des barres de corps solides différents, bout à bout, au-dessus d'une lampe à alcool. Sur ces barres, on fait adhérer, avec de la cire, des billes de bois. On voit alors les billes tomber successivement à partir du point échauffé, et, selon les métaux dont sont formées les barres, le nombre des billes tombées est plus ou moins grand, ce qui prouve que, dans l'une ou l'autre des barres, la chaleur se propage plus loin, c'est-à-dire que tel ou tel corps est meilleur conducteur de la chaleur que tel ou tel autre.

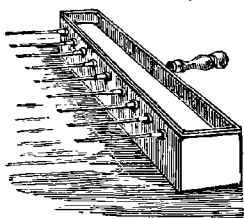


Fig. 265. — APPAREIL  
D'INGENHOUSZ.

De ces expériences, il résulte que, si l'on exprime par 1,000 le degré de conductibilité de l'or, le métal le meilleur conducteur de la chaleur, on aura :

Or,	1,000	Fer,	374	Marbre,	24
Platine,	981	Zinc,	363	Porcelaine,	12
Argent,	973	Étain,	304	Terre de brique,	11
Cuivre,	898	Plomb,	179	Verre,	8

On peut constater ainsi que les métaux sont les meilleurs conducteurs de la chaleur; qu'après eux viennent les pierres, l'argile, le sable, le verre; et après eux, le bois. Ainsi s'expliquent des faits très connus. Que l'on touche une plaque de métal, elle semblera plus froide que le marbre, le marbre plus froid que le bois, quoique plaque de métal, marbre ou bois, placés dans les mêmes conditions, soient réellement à la même température. En effet, la main, étant à une température supérieure à celle du corps touché, il y a de la chaleur cédée par voie de conducti-

(1) INGENHOUSZ (Jean), médecin et physicien hollandais (1730-1799). Outre divers ouvrages de médecine, il a publié de nombreux travaux relatifs à l'électricité et au magnétisme. Il combattit vivement Mesmer, expliquant les phénomènes du magnétisme par l'action des aimants. Étant allé en Angleterre pour étudier la méthode d'inoculation, il y séjourna longtemps et revint y mourir, quoiqu'il fût resté trente ans à Vienne, en qualité de médecin de l'empereur d'Autriche et de sa famille.

bilité, et plus est grande la conductibilité du corps touché par la main, plus vive est l'impression de froid ressentie.

Mayer a fait des observations multipliées sur la capacité conductrice du bois : en prenant l'eau pour unité, il a trouvé pour le bois de pommier 2,740, de prunier 3,25, de poirier 3,82, de sapin 3,89, de tilleul 3,90. Toutefois, ces chiffres ont été quelque peu modifiés depuis par les expériences de MM. Biot, Despretz, Pécelet, Langebert, Wiedmann et Franz.

*Remarque.* — Il ne faut pas confondre, dans les expériences précédentes, la rapidité avec laquelle un corps conduit la chaleur avec l'intensité de son échauffement. La conductibilité détermine seule l'intensité de l'échauffement, tandis que la rapidité de l'échauffement dépend d'une autre propriété des corps que nous étudierons ci-après, la *chaleur spécifique*. Ainsi la cire fondra plus vite, dans l'expérience d'Ingenhousz, sur la tige de bismuth que sur la tige de fer ; mais elle fondra moins avant sur la tige. De même, dans l'autre

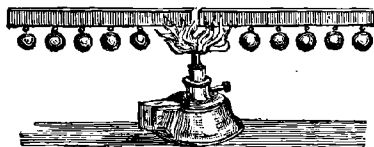


Fig. 266.

CONDUCTIBILITÉ DES SOLIDES.

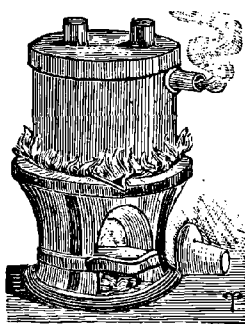


Fig. 267.

CONDUCTIBILITÉ  
DU FER ET DU BISMUTH.

expérience, les billes tomberont plus tôt d'une tige de bismuth que d'une tige de fer ; mais les dernières billes de la tige de bismuth tomberont après celles qu'on aura placées sur la tige de fer. Il faut considérer, pour déterminer le pouvoir conducteur, la distance du point d'où la dernière bille se détache à l'extrémité chauffée et non la rapidité de la chute.

Une expérience concluante démontre ce fait :

Que l'on place deux petits cylindres, l'un de fer, l'autre de bismuth (*fig. 267*), sur un vase plein d'eau bouillante, après avoir enduit de la même quantité de cire la face supérieure. La cire fond sur le bismuth avant d'avoir fondu sur le fer ; mais si ces cylindres étaient très longs, la cire fondrait encore sur le cylindre de fer, tandis qu'elle ne fondrait plus sur le cylindre de bismuth.

**CONDUCTIBILITÉ DES CORPS LIQUIDES.** — Pendant longtemps, en constatant que la masse d'un liquide contenu dans un vase s'échauffait graduellement, on avait cru que les liquides étaient conducteurs de la chaleur. Rumford démontra le contraire. Au fond d'un tube de verre (*fig. 268*), il plaçait de la glace, puis il versait de l'eau par-dessus. Si, avec une lampe à alcool, placée vers le milieu du tube, au-dessus de la glace,

il chauffait l'eau, celle-ci arrivait facilement à l'ébullition, sans que la glace fondit. L'échauffement d'un liquide n'a lieu rapidement, en effet, que lorsqu'il est chauffé par la partie inférieure, et ce n'est point par *conducti-*

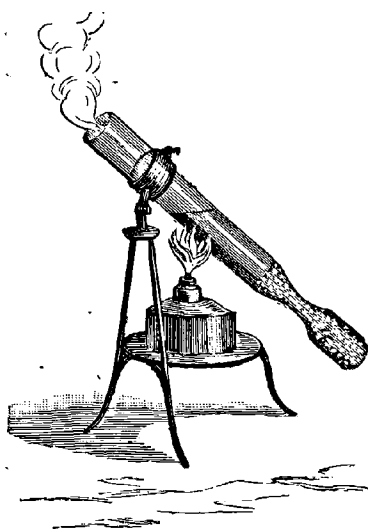


Fig. 268.

EXPÉRIENCE DE RUMFORD.

*bilité*, mais en vertu du phénomène connu sous le nom de *convection* (page 451). On peut s'assurer de l'existence des courants ainsi établis en mettant dans le liquide échauffé un corps léger, tel que de la sciure de bois, que l'on voit aller et venir de bas en haut et de haut en bas.

Cependant, d'autres physiciens, Thompson, Pictet, Murray, Nicholson, ont combattu la conclusion de Rumford comme trop absolue. De nos jours, M. Gripon a montré que le mercure possède une conductibilité comparable à celle des autres métaux, et M. Despretz, de son côté, a prouvé, par une expérience concluante, que l'eau a une faible conductibilité. Il chauffait de l'eau contenue dans un vase cylindrique en bois (*fig. 269*),

en faisant traverser continuellement, par un courant d'eau bouillante,

une boîte métallique placée à sa partie supérieure. Des thermomètres traversaient le vase de bois à différentes hauteurs, et il observa que les températures décroissaient de haut en bas, quoique très lentement. Il fallut une trentaine d'heures pour que les thermomètres acquissent un excès stationnaire les uns sur les autres. Il fut même calculé que ces excès formaient une progression géométrique, et il constata qu'à partir du sixième thermomètre, il n'y avait pas d'échauffement appréciable.

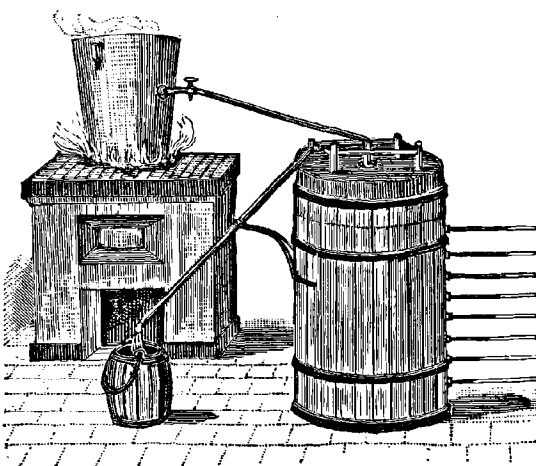


Fig. 269. — EXPÉRIENCE DE DESPRETZ.

**CONDUCTIBILITÉ DES GAZ.** — Les gaz sont très mauvais conducteurs

de la chaleur. Il est très difficile de faire des épreuves directes sur leurs degrés de différence de conductibilité, parce qu'il est à peu près impossible de se mettre à l'abri des effets de la convection et du rayonnement direct; mais les exemples d'application journalière ont démontré jusqu'à l'évidence leur conductibilité à peu près nulle.

Tout le monde connaît l'expérience de Rumford. Sur un fromage à la glace placé dans un plat, il versait des œufs bien battus, comme pour une omelette; puis il recouvrait le tout d'un four de campagne bien chaud et chargé de charbons. Les œufs prenaient, cuisaient et formaient une omelette brûlante, au milieu de laquelle on retrouvait le fromage glacé n'ayant rien perdu de sa fraîcheur. L'air, emprisonné dans l'écume des œufs, avait empêché, par son faible pouvoir conducteur, la chaleur du four de pénétrer jusqu'au fromage.

Toutefois, en 1860, M. Magnus parvint à démontrer que la conductibilité de l'hydrogène est supérieure à celle des autres gaz. Cela est tout à fait en rapport avec ce que les chimistes pensent de la nature de ce gaz, qu'ils considèrent comme une sorte de métal gazeux (1).

**APPLICATIONS DE L'INÉGALE CONDUCTIBILITÉ DES CORPS. — LAMPES DES MINEURS.** — Les anciens, raconte M. Hoeffler, avaient entrepris d'immenses travaux pour l'exploitation des richesses métallurgiques des Pyrénées et de l'Espagne; mais, arrivés à une certaine profondeur du sol, ils se voyaient forcés de s'arrêter, soit à cause des gaz irrespirables, soit à cause des eaux qu'ils rencontraient. Impuissants à vaincre ces obstacles, les ouvriers mineurs du moyen âge abandonnèrent ces anciennes mines, sur lesquelles on avait répandu beaucoup de contes superstitieux, conformément à l'esprit du temps. « La principale raison pour laquelle la plupart des mines de France et d'Allemagne sont abandonnées, dit un auteur de l'époque, tient à l'existence des *esprits métalliques* qui sont fourrés en icelles. Ces esprits se présentent, les uns en forme de chevaux de légèrè encolure et d'un fier regard, qui, de leur souffle et hennissement, tuent les pauvres mineurs. Il y en a d'autres qui sont en figure d'ouvriers affublés d'un froc noir, qui enlèvent les ouvrants jusqu'au haut de la mine, puis les laissent tomber de haut en bas. Les *follets* ou *kobalts* ne sont pas si dangereux; ils paraissent en forme et habit d'ouvriers, étant de deux pieds trois pouces de hauteur; ils vont et viennent par la mine; ils montent et descendent et font toute contenance de travailler... On compte six espèces desdits esprits, desquels les plus infestes sont ceux

(1) Voir notre *Chimie*, au chapitre consacré à l'*hydrogène*.

qui ont ce capuchon noir, engendrés d'une humeur mauvaise et grossière... »

Nous avons dit (page 475) que le meilleur procédé, pour exorciser ces démons et les rendre impuissants, était une bonne ventilation des mines et l'emploi de la *lampe Davy*.

Cette lampe de sûreté est basée sur la conductibilité des toiles métalliques.

Dès 1660, Kunckel avait signalé cette propriété des toiles métalliques. « Lorsqu'on interpose, dit-il, entre la flamme et le métal qu'elle fait fondre, une gaze métallique, l'action de la flamme est suspendue. »

En effet, si l'on pose une toile métallique sur la flamme d'une bougie ou d'un bec de gaz, cette flamme se trouve interceptée; le métal, par son pouvoir conducteur du calorique, refroidit les gaz et les empêche de brûler. On peut mettre ainsi sur une toile métallique un morceau de papier renfermant de la poudre à canon, déposer le tout sur la flamme d'une bougie, sans déterminer l'inflammation de la poudre. C'est donc en ayant l'idée d'enfermer la lumière d'une lampe derrière un pareil grillage, que le célèbre chimiste H. Davy trouva le moyen d'éclairer les mines, envahies par le *grisou*, sans que l'inflammation pût se transmettre au gaz.

La forme des *lampes de sûreté* a beaucoup varié depuis H. Davy; mais elles se composent principalement (*fig.* à la page 513) de trois parties : 1° un réservoir contenant 160 grammes d'huile, qui peuvent suffire à dix heures de travail; 2° une enveloppe imperméable à la flamme; 3° une cage qui sert à fixer l'enveloppe sur le réservoir et à garantir celle-ci de tout choc.

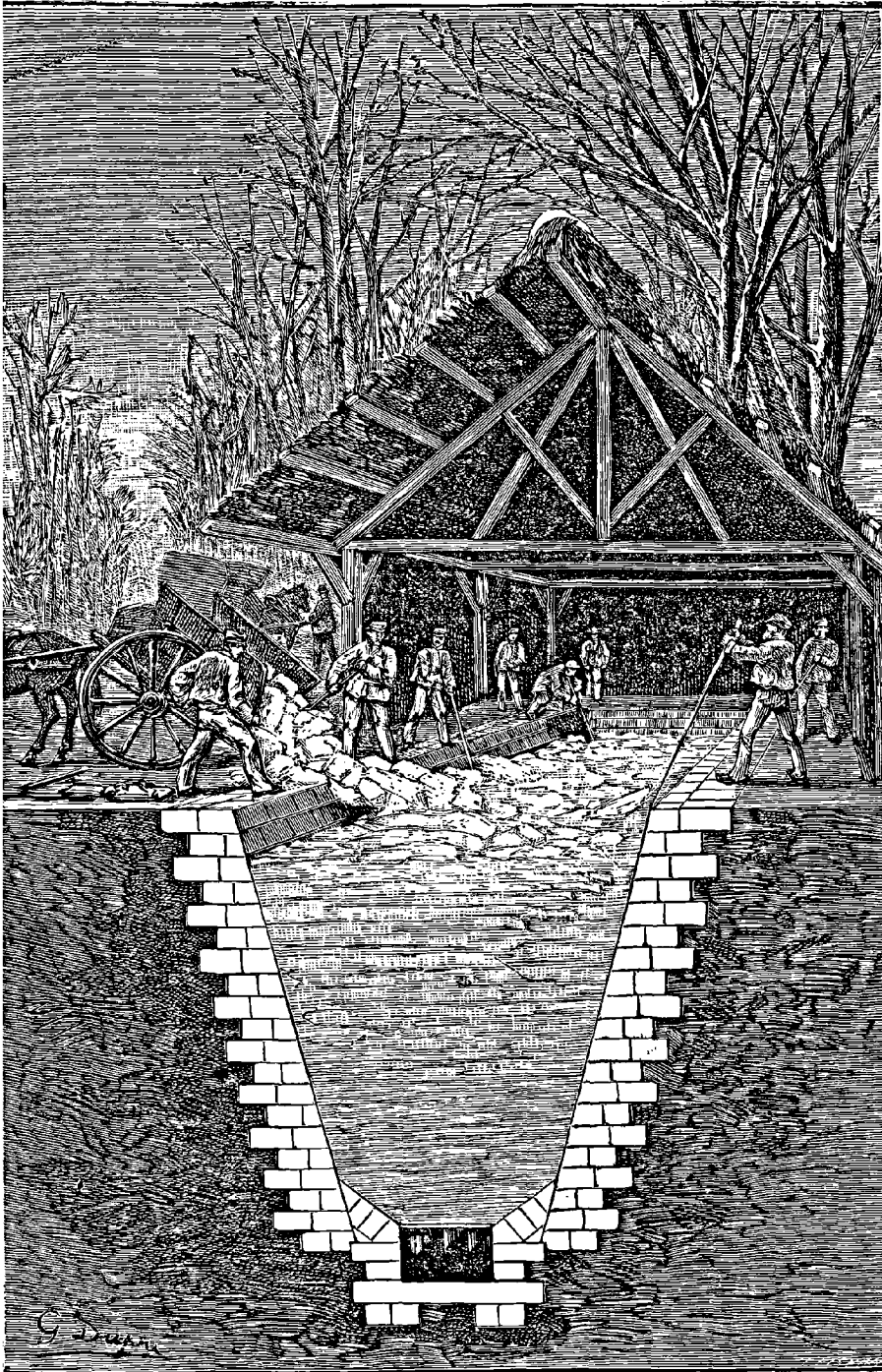
L'enveloppe en toile ou gaze métallique contient 144 ouvertures rectangulaires par centimètre carré. C'est en laiton ou en fer qu'elle est faite. Le fil métallique peut avoir de  $\frac{1}{4}$  à  $\frac{1}{6}$  de millimètre de diamètre. Dans le haut du cylindre, la toile est double, de telle sorte que si l'une d'elles est altérée par l'action de la flamme, il reste encore une fermeture de sûreté.

Le porte-mèche de la lampe est muni d'une ouverture rectangulaire, dans laquelle on peut engager un fil de fer, recourbé à son extrémité, pour lever ou baisser la mèche. Ce fil de fer traverse le réservoir, au moyen d'un tube soudé aux plaques du dessus et du dessous du réservoir.

Une lampe de sûreté indique, à chaque instant, au mineur l'état de l'atmosphère des galeries, et l'avertit ainsi du moment où il doit se retirer. En effet, dès que le *grisou* se mêle à l'air dans les plus petites proportions, l'ouvrier s'en aperçoit aisément à l'augmentation du volume de la flamme



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Glacière du bois de Boulogne (page 524).

Liv. 66.



de la lampe. Quand le gaz forme le douzième du volume de l'air, l'enveloppe se remplit d'une flamme bleue très faible, au milieu de laquelle on distingue la flamme de la mèche. Celle-ci n'est plus visible aussitôt que le gaz forme le cinquième ou le sixième de l'air, le cylindre étant rempli par une flamme très éclatante du mélange combustible qui prend feu. Enfin, quand la proportion du grisou est considérable, qu'il forme, par exemple, le tiers du volume de l'air, la lampe s'éteint complètement.

Si l'on a soin de placer autour ou au-dessus de la mèche, plusieurs fils de platine roulés en spirale, et de 3/10 de millimètre environ d'épaisseur, la lampe peut encore, dans ce dernier cas, rendre des services au mineur. En effet, aussitôt qu'elle est éteinte, le platine se montre incandescent, par suite de la propriété qu'il possède de déterminer la combustion des gaz inflammables au contact de l'air. Il conserve cet état, en répandant une clarté assez intense, tant qu'il y a de l'air dans les galeries. Le mineur a le temps de fuir ces lieux, guidé par cette lumière nouvelle.

M. Combes, ingénieur des mines, a modifié avantageusement, en 1845, le modèle primitif de Davy, et les lampes déjà perfectionnées par Roberts, le baron Dumesnil, l'ingénieur belge Mueseler, Dubrulle, etc. Dans cet appareil, la lampe est enfermée dans une enveloppe de cristal, surmontée d'une enveloppe en gaze métallique. L'air nécessaire à la combustion entre par des trous percés circulairement dans le rebord en saillie du couvercle du réservoir à huile, et, avant de pénétrer dans l'enveloppe de cristal, cet air traverse une ou deux rondelles superposées de toile métallique ; les gaz brûlés s'élèvent, suivant l'axe de la lampe, dans une cheminée en cuivre, arrivent dans l'enveloppe métallique et se répandent finalement dans l'atmosphère. La lampe de M. Combes est plus sûre et beaucoup plus éclairante que toutes celles qui ont été proposées.

**APPAREILS D'ALDINI.** — Le chevalier Aldini, physicien italien, a imaginé une application, non moins utile que brillante, des propriétés des toiles métalliques. Elle consiste dans un appareil propre à garantir les pompiers de l'action des flammes dans les incendies. Cet appareil préservateur se compose de deux vêtements : l'un, en tissu épais d'amiante ou de laine, rendu incombustible au moyen d'une dissolution saline ; l'autre, en toile métallique de fil de fer, recouvrant le premier. Le pompier, revêtu de ces deux tissus, peut supporter, pendant un certain temps, l'action des flammes sans en ressentir les funestes effets, puisque le tissu métallique extérieur refroidit ces flammes, et que l'amiante et la laine ne transmettent que très faiblement la chaleur, en raison de leur faible conductibilité.

Armé de ces deux enveloppes, Aldini s'est exposé, le premier, au contact des flammes les plus ardentes. Les nombreuses expériences faites en Italie, puis à Gênes et à Paris, ont prouvé l'efficacité relative de ses appareils ; aussi, dans sa séance publique du 26 juillet 1830, l'Académie des sciences a-t-elle donné à l'ingénieur inventeur une somme de 8,000 francs, à titre d'encouragement.

Depuis 1838, d'autres applications des toiles métalliques ont été faites. M. Maratuch a eu l'idée de les employer contre les feux de cheminée. Pour cela, il établit, à l'entrée du tuyau des cheminées, un châssis portant une toile métallique, qui arrête complètement les feux les plus intenses. Dans la plupart des théâtres, un rideau de gaze métallique sépare de même la scène de la salle, en cas d'incendie.

**CONSTRUCTION DES GLACIÈRES.** — Les principes de la conductibilité de la chaleur des corps ont des applications journalières. Ainsi, pour que nous soyons préservés du froid en hiver, et aussi de la chaleur en été, les murs de nos habitations doivent être bien plus épais, s'ils sont en pierre, que s'ils sont en briques, et encore plus s'ils sont en bois, parce que la pierre conduit mieux la chaleur que la brique, et celle-ci mieux que le bois. De même, le sol de nos appartements est de plus en plus froid, s'il est recouvert de tapis de laine, ou en parquet, ou en carreaux. L'air, étant très mauvais conducteur de la chaleur, constitue une enveloppe très chaude. C'est pourquoi, dans les pays froids, beaucoup d'habitations ont des murs formés de planches épaisses, constituant une double paroi que l'on remplit de sciure de bois, de paille hachée, de mousse sèche, de copeaux. L'air, emprisonné dans les interstices, forme, avec ces matières, un ensemble très peu perméable à la chaleur, très mauvais conducteur.

Si l'on place à une chambre une double fenêtre, l'air, ne se renouvelant pas entre ces deux cloisons, empêche, bien mieux qu'un mur épais, la chaleur intérieure de s'échapper, et le froid extérieur de pénétrer. Ces doubles vitrages sont employés principalement dans les serres, dont les plantes ont besoin de lumière en même temps que de chaleur.

Les *glacières* sont construites en se basant sur la faible conductibilité pour la chaleur, du sol, des briques et des matières divisées. Ce sont des caves profondes, dont les parois intérieures sont en briques, et dans lesquelles on met, pendant l'hiver, pour s'en servir aux époques de grande chaleur, des morceaux de glace. Après avoir rempli la glacière, on y verse de l'eau, un jour de forte gelée, ce qui forme sur le tout une couche de glace isolante, puis on entasse de la paille, de la laine hachée par-dessus cette dernière couche. Un toit de chaume, des arbres, préservent, par leur

ombre, la glacière des rayons du soleil, et achèvent de la rendre tout à fait imperméable à la chaleur du soleil (*fig.* à la page 521).

Il y a quelques années, un physicien italien proposa un perfectionnement dans la construction des glacières. Partant de ce principe qu'une couche d'air, renfermée entre deux parois, est le meilleur des corps isolants du calorique, il proposait de construire les glacières en leur donnant une double enceinte de murs, dans toute la partie qui s'élève au-dessus du sol, et aussi une double voûte. Il conseille, quant à la forme, de construire l'enceinte intérieure à parois obliques, de manière que sa circonférence aille se rétrécissant un peu de haut en bas, afin que la masse entière de la glace puisse occuper toute l'étendue de la glacière. L'espace vide entre les deux murs devra être d'environ 0<sup>m</sup>,16 dans la partie inférieure, se réduisant à 0<sup>m</sup>,08 dans le haut, et les deux murs seront rattachés au moyen de pierres d'attente. Les ouvertures, destinées à mettre la glace ou à la retirer, seront comme à l'ordinaire, si ce n'est qu'il est mieux de les fermer d'une double porte, dont celle qui sert le plus souvent formera, à l'intérieur, un corridor séparé de la couche d'air par une cloison. L'auteur conseille, de plus, de maintenir blanche la surface externe de la première enceinte, et sombre et lisse la face interne de la seconde, en vertu des lois sur les pouvoirs émissif et réflecteur. Enfin, il recommande de bien nettoyer les blocs de glace à conserver; car le bois, la terre, les cailloux, etc., agissent comme conducteurs du calorique, et, par leur contact, facilitent la fusion de la glace. Ce procédé de construction est très bon, surtout dans les pays où le sol pierreux ou marécageux ne permet pas le creusement économique et le maintien des puits.

On sait à quels précieux usages sert la glace pendant l'été : la conservation des viandes, l'art culinaire, la médecine. Dès la plus haute antiquité, on s'est ingénié à trouver des procédés pour s'en procurer.

Les Romains, raconte M. G. Tissandier, dans son livre *De l'eau*, savaient conserver les neiges et les glaces dans des caves disposées comme nos glacières, et l'eau de neige était pour eux une boisson estimée. La nuit, des chariots couverts de paille amenaient, dans l'ancienne capitale du monde, la neige des Apennins; des galères transportaient en Italie la glace de Sicile, bien préférable à toute autre, au dire des gastronomes d'alors, parce qu'elle se formait à côté des cratères brûlants où bouillonne la lave. Un temple avait été dressé pour conserver la neige pendant l'été, et les prêtres de Vulcain tiraient de son débit un bénéfice énorme. Les prêtres chrétiens, plus tard, conservèrent ce précieux et religieux usage; et, à la fin du siècle dernier, l'évêque de Catane, soucieux des intérêts matériels, autant que des intérêts moraux de ses fidèles, trou-

vait 20,000 francs de revenu par an dans l'exploitation d'un amas de neige qu'il possédait sur l'Etna.

Aujourd'hui, comme du temps des Grecs, le Caucase et l'Oural alimentent l'Orient ; la glace, emballée dans des étoffes de feutre, enveloppée dans de la paille, se transporte à dos de cheval. En France, la consommation de la glace n'est pas encore considérable ; mais, aux États-Unis, elle atteint d'énormes proportions. Recueillie pendant l'hiver sur les lacs immenses du Canada, elle est taillée comme la pierre, au moyen de scies, et transportée aux Antilles, au Cap, aux Indes et jusqu'en Australie. La seule ville de Boston consomme par an 100,000 tonnes de glace, et 4,000 ouvriers sont attachés à cette branche de commerce. La Norvège est la glacière de l'Europe, elle en fournit aux pays du midi et souvent à Paris, quand l'hiver a été trop clément parmi nous, et que nos glaciers, entre autres celle du bois de Boulogne, ne suffisent pas à la consommation.

Nous verrons ci-après comment on produit artificiellement de la glace.

**APPLICATIONS DIVERSES.** — C'est en vertu des principes de la conductibilité des corps pour la chaleur, que l'on entoure d'osier les manches des cafetières, que l'on donne des manches de bois aux théières, que les poignées des fers à repasser sont formées de laine hachée, enveloppée dans un morceau de peau.

Pour déboucher un flacon dont le bouchon adhère trop fortement au goulot, il suffit de chauffer le goulot. Celui-ci se dilate, mais le verre étant très mauvais conducteur, la chaleur ne pénètre pas jusqu'au bouchon, et celui-ci, ne se dilatant pas, devient plus petit que le goulot.

Les calorifères en métal chauffent fortement, mais se refroidissent vite, les métaux étant bons conducteurs ; le contraire arrive pour les poêles en faïence, ce corps étant mauvais conducteur.

Enfin le choix de nos vêtements, pour lequel nous avons dû tenir compte des pouvoirs rayonnant, émissif, absorbant, s'appuie encore sur les principes de la conductibilité : la nature nous l'indique par les plumages ou les fourrures des animaux. Les plumes des oiseaux, formées d'une substance sans conductibilité, retiennent entre leurs rangs pressés et leurs innombrables menus filaments, un grand volume d'air dont le déplacement est impossible. Ce n'est pas encore assez pour les oiseaux des régions très froides. Sous leur plumage est une seconde enveloppe, d'un duvet tellement fin, tellement divisé et subdivisé, qu'on lui a donné

un nom spécial, celui d'édredon. Or ce qu'il s'agit d'empêcher, c'est la déperdition de la chaleur des corps ; rien ne peut y être plus propre qu'une enveloppe renfermant une grande quantité d'air : aussi l'édredon est-il la matière la plus précieuse pour nous garantir du froid.

D'après les expériences de Rumford, voici dans quel ordre se rangent les diverses substances qui servent à fabriquer nos vêtements, au point de vue de leur propre conductibilité : soie tordue, coton ou laine, laine de brebis, taffetas, soie écruë, poil de castor, édredon, poil de lièvre. Les tissus de soie sont, de plus, d'une structure plus serrée que ceux de laine ; ils sont donc, d'abord comme meilleurs conducteurs, inférieurs à ceux de laine, et ensuite, parce qu'ils renferment moins d'air. L'expérience journalière confirme ces résultats : chacun sait que les vêtements de drap sont ceux qui préservent le mieux contre le froid, parce qu'ils s'opposent au passage de la chaleur du corps, et aussi contre la chaleur, en été, parce qu'ils empêchent mieux la chaleur extérieure de pénétrer jusqu'à notre corps.

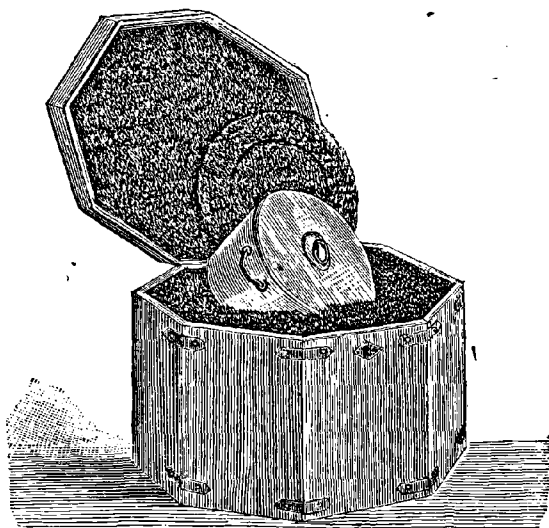


Fig. 270. — CONSERVATEUR DU CALORIQUE.

**CONSERVATEUR DU CALORIQUE.** — Il y a une vingtaine d'années, on inventa un appareil très commode, peu connu depuis cependant, en dehors des cabinets de physique, et qui, s'appuyant sur le défaut de conductibilité du feutre, de la sciure de bois, du poil de lièvre, etc., semblait appelé à un grand succès, à cause de son utilité dans l'économie domestique. Cet appareil, que l'inventeur, M. Maire, appelait le *conservateur du calorique*, est une sorte d'étouffoir entièrement formé de feutre, et autres substances non conductrices du calorique (*fig. 270*). Dans un vase ordinaire, il faut quatre ou cinq heures de feu et de soins pour amener soit la viande, soit les légumes secs à un état de cuisson convenable. Avec le *conservateur du calorique*, il n'en est pas ainsi : on met sur le feu, dans une marmite bien close, la viande ou les légumes qu'on veut faire cuire, et on la place dans l'appareil, où le contenu achève de cuire *sans feu*, la

chaleur acquise s'y conservant pendant longtemps. Dans une expérience publique, une marmite contenant 23 litres d'eau en ébullition fut placée dans un appareil conservateur, et, au bout de vingt-quatre heures, cette eau avait encore 52 degrés de chaleur. Ainsi, avec cet appareil, il y a non seulement économie de combustible et de temps, mais encore une sécurité plus grande pour les personnes qui sont obligées de s'absenter en laissant du feu chez elles. Quant à la viande et aux légumes cuits de cette manière, ils acquièrent une saveur bien plus grande que par le mode de cuisson ordinaire.

## CHAPITRE VI

### CHANGEMENT DANS L'ÉTAT DES CORPS

#### 1° FUSION ET SOLIDIFICATION

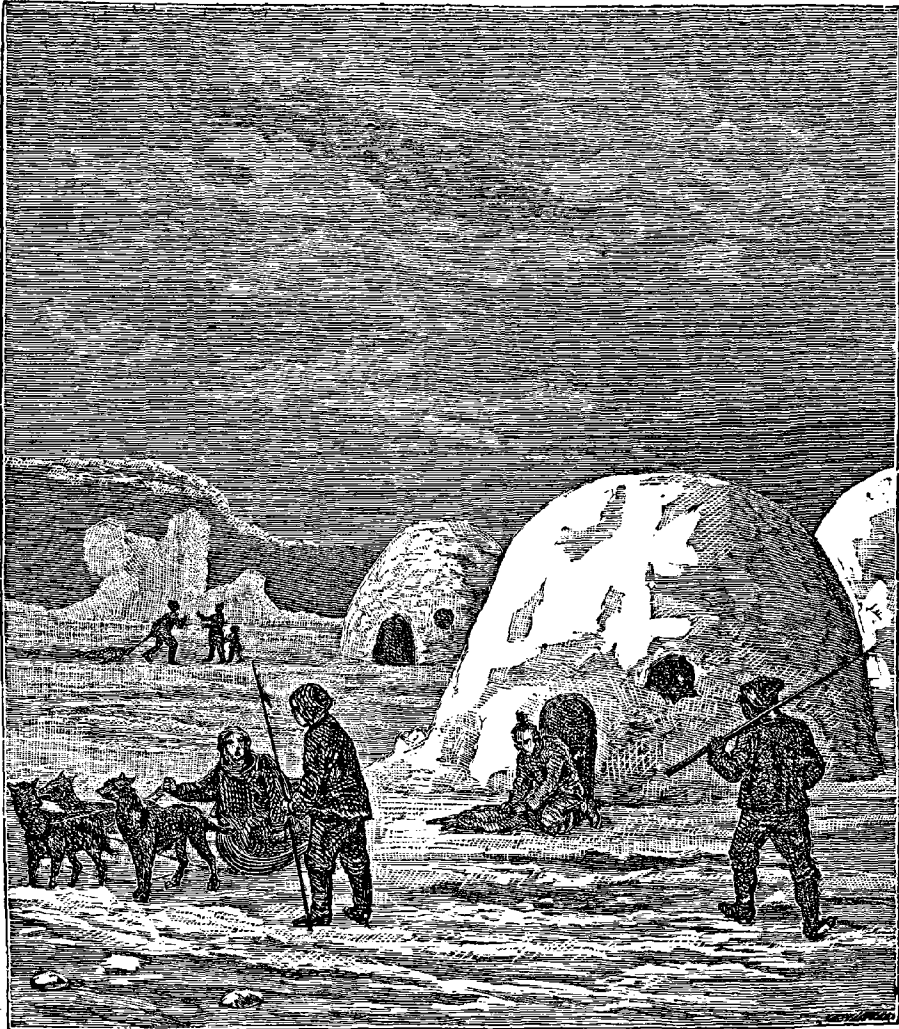
**FUSIBILITÉ DES CORPS.** — Nous avons dit, en parlant des divers états de la matière (p. 28), que *tous les corps* peuvent se présenter successivement à l'état solide, à l'état liquide, ou à l'état gazeux. Dans ce chapitre, nous étudierons les lois qui président au passage des corps solides à l'état liquide et à leur retour à l'état solide; le chapitre suivant sera consacré à l'étude des lois relatives à leur passage à l'état gazeux, puis inversement, de l'état gazeux à l'état liquide.

Nous avons dit que l'état liquide d'un corps était dû à la faiblesse de cohésion des molécules qui le constituent, et que la chaleur était une des causes principales qui produisent cette faiblesse de cohésion. Cette propriété des corps, sous l'influence de la chaleur, est appelée *fusibilité*, et l'état des corps, ainsi modifié, est dit la *fusion* de ce corps.

Tous les corps jouissent de cette propriété. Quelques-uns ont été regardés longtemps comme *infusibles*, et on les désignait sous le nom de *corps réfractaires*; mais c'était une erreur: ces corps exigent seulement, pour entrer en fusion, une température plus élevée que celle de nos foyers, et on ne les liquéfie qu'à l'aide du chalumeau à gaz oxyhydrogéné de M. Sainte-Claire-Deville (p. 397), ou d'une pile électrique. Le charbon



seul, jusqu'à présent, a résisté à toutes les tentatives faites pour le liquéfier; mais cela tient seulement à l'impuissance de nos moyens et ne peut altérer la généralité du principe.



Les Esquimaux habitent des maisons de glace, qu'ils nomment *iglous* (page 536).

Quelques corps : le bois, la gomme arabique, le papier, les qs, la laine, par exemple, se décomposent avant de fondre. Ce n'est point qu'ils soient infusibles; ils se liquéfient à une certaine température, si on empêche la décomposition qui précède la liquéfaction. Ainsi le chevalier de Hall a

pu liquéfier du marbre. Ordinairement cette matière, composée de chaux et d'acide carbonique (1), soumise à l'action de la chaleur, se décompose : l'acide carbonique se dégage et la chaux reste ; pour éviter cela, Hall enfermait du marbre dans un canon de fusil hermétiquement fermé par des bouchons à vis, et le soumettait à un feu ardent. L'acide carbonique se dégageait, mais, étant emprisonné, il exerçait une pression sur le morceau de marbre non encore altéré, il maintenait ainsi l'union de ses éléments et ce marbre se liquéfiait.

Nous avons dit également (p. 28) que certains corps, avant d'atteindre l'état liquide, passent par certains états intermédiaires, pendant lesquels ils présentent une consistance pâteuse plus ou moins liquide. Généralement, le passage de l'état solide à l'état liquide est brusque. Le verre étant un des quelques corps qui passent par des états intermédiaires (et c'est même là ce qui est la base fondamentale du travail auquel on le soumet), on a donné à ces états intermédiaires de fusion le nom de *fusion vitreuse*.

**LOIS DE LA FUSION. — CHALEUR LATENTE.** — Le phénomène de la fusion est constamment soumis aux deux lois suivantes :

1° *La température à laquelle s'opère la fusion est invariable pour chaque corps ;*

2° *La température d'un corps en fusion reste invariable pendant toute la durée de la fusion.*

Ces deux lois se vérifient expérimentalement en plongeant plusieurs fois un thermomètre dans le corps soumis à la fusion. On voit alors que, dans quelques circonstances que l'on se place, le thermomètre indique toujours le même degré, au moment où la fusion des corps commence, et aussi que, tant que toutes les parties de ce corps ne sont pas fondues, le thermomètre indique la même température.

Des expériences relatives à la première de ces deux lois, on a pu préciser pour tous les corps le degré de température à laquelle ils se liquéfient, c'est-à-dire leur *point de fusion*.

Un tableau exact des points de fusion de tous les corps serait fort utile ; car, pour constater si un corps est pur, il suffit de le faire fondre et de vérifier si le *point de fusion* est bien exact.

De plus, la connaissance du point de fusion des métaux permet de ne pas s'exposer à porter ces corps à une température à laquelle le vase qui les contient viendrait à fondre ; mais cette recherche est fort

(1) Voir notre *Chimie. Du CALCIUM et de ses composés.*

difficile, surtout pour les corps qui ne fondent qu'à des températures très élevées.

Nous donnons le *Tableau des points de fusion de divers corps*, d'après les expériences les plus récentes :

NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉ- RATURE.	NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉ- RATURE.	NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉ- RATURE.
Acide stéarique .....	70°	Colophane.....	135°	Or (au titre de la Monnaie)..	1130°
Acier (le plus fusible)..	1300	Cuivre.....	1050	Palladium .....	1700
Acier (le moins fusible).	1400	Cuivre jaune .....	1015	Paraffine .....	43,7
Aluminium .....	600	Étain .....	228	Phosphore.....	44,2
Antimoine.....	425	Fer doux français .....	1500	Platine.....	1900
Argent pur.....	1022	Fer martelé anglais.....	1600	Plomb.....	322
Arsenic métallique.....	210	Fonte manganésée.....	1250	Potassium.....	58
Benzine.....	7	Fonte de fer.....	1050 à 1200	Rubidium.....	38,5
Beurre.....	33	Glace.....	0	Sélénium.....	217
Bismuth.....	246	Graisse de mouton.....	51	Sodium.....	90
Blanc de baleine.....	49	Huile d'olive.....	2,5	Soufre.....	114,5
Bronze.....	900	Huile de palme.....	29	Sperma ceti.....	49
Cadmium.....	360	Indium.....	334	Stéarine.....	61
Campbre de Bornéo.....	195	Iode.....	107	Succin.....	268
Campbre du Japon.....	175	Lithium.....	180	Sucre de canne.....	160
Caoutchouc.....	120	Magnésium.....	410	Sucre de raisin.....	100
Chlorate de potasse.....	334	Mercurc.....	— 39,5	Suif.....	33
Chlorure d'iode.....	17,5	Naphtaline.....	78	Tellure.....	525
Bichlorure de zinc.....	250	Nickel.....	1800	Thallium.....	200
Cire jaune.....	76,2	Or.....	1250	Urée.....	120
Cire blanche.....	68,7			Zinc.....	410

Pour expliquer la deuxième loi de fusion des corps, les anciens physiiciens, qui assimilaient la chaleur à un fluide très subtil, appelaient *calorique latent* (du latin *latere*, cacher) la portion de ce fluide qui agissait sur le corps sans influencer sur le thermomètre. Ils supposaient que la chaleur fournie par le foyer, et qui semblait disparaître, puisque le thermomètre n'accusait pas sa présence, était absorbée par le corps entrant en fusion. D'après les idées modernes et plus rationnelles sur la nature de la chaleur, on admet que la chaleur produite par le foyer disparaît, parce qu'elle se change en la somme de travail mécanique nécessaire pour modifier l'attraction, existant entre les molécules du solide, et produire la liquéfaction (page 404).

Dans son *Histoire de la physique*, M. Hoeffler donne des détails fort curieux sur ce point.

» On a lieu de s'étonner, dit-il, qu'aucun physicien n'ait expliqué, pendant longtemps, pourquoi la température reste invariable, quelle que soit la quantité de chaleur qu'on applique à la glace fondante ou à l'eau bouillante.

Ce n'est qu'en 1762 qu'un physicien chimiste, Black (1), essaya le premier de se rendre compte de ce singulier phénomène. Black demanda d'abord, en interrogeant la nature, pourquoi la glace se fond si lentement par l'action de la chaleur. Une première expérience lui apprit que, pendant que l'eau à 0° s'élève à la température de 7° (Fahrenheit), la même quantité de glace, également à 0° exige, quoique soumise à la même chaleur que l'eau, un temps 21 fois plus long pour arriver à la même température de 7°, soit  $7° \times 21 = 147°$ , et qu'il y a, par conséquent, 140 degrés de chaleur absorbés, que le thermomètre n'indique pas (2). Pour mieux s'assurer de l'absorption ou du recel de la chaleur, Black mêla ensemble des quantités égales d'eau chaude et d'eau froide; la température du mélange se trouva être exactement la moyenne entre les températures de l'eau chaude et de l'eau froide. Il fit ensuite d'autres expériences pour montrer que, quand on fait fondre de la glace dans une égale quantité d'eau (à 176° Fahrenheit), le mélange qui en résulte est à peu près à la température de la glace fondante. Cette quantité considérable de chaleur, qui disparaît ainsi et que le thermomètre n'indique point, reçut de Black le nom de *chaleur latente*.

Black fit le même genre d'expériences pour l'eau bouillante: il démontra que, pendant la *vaporisation* (page 567), il y a une grande quantité de chaleur d'absorbée, laquelle n'est point accusée par le thermomètre, et qu'il arrive ici ce qui se passe pendant la liquéfaction des corps solides. « De même que la glace, combinée avec une certaine quantité de chaleur constitue, dit-il, l'eau, ainsi l'eau combinée avec une certaine quantité de chaleur, constitue la vapeur. » On voit que, pour Black, la chaleur latente est de la *chaleur de combinaison*.

Bien des hypothèses ont été émises depuis Black sur la chaleur latente. Crawford suppose que les corps acquièrent plus de capacité pour contenir le calorique au moment où ils passent d'un état à l'autre. Lavoisier démontra que cette hypothèse était inadmissible; mais son opinion à lui-même était erronée.

Laplace (3), le premier, donna une explication du phénomène, telle

(1) BLACK (Joseph), né à Bordeaux de parents écossais (1728-1799), professeur de médecine et de chimie à Glasgow. Nous retrouverons souvent son nom dans notre *Chimie*. Sa patience et sa sagacité l'ont fait surnommer le *Nestor de la révolution chimique*. Élève du célèbre médecin Cullen, il eut la gloire d'être le maître de l'illustre James Watt.

(2) L'échelle du thermomètre Fahrenheit ayant subi des changements fréquents, il est difficile de convertir exactement les degrés du thermomètre de Black en degrés centigrades. On admet aujourd'hui que la glace exige pour se fondre autant de chaleur qu'il en faudrait pour élever son poids d'eau de 0° à 79° centigrades, ou pour élever de 1° centigrade 79 fois le même poids d'eau. (Voir ci-après le chapitre IX, *Calorimétrie*.)

(3) LAPLACE (Pierre-Simon, marquis de), un des plus grands mathématiciens de France (1749-

que nous l'admettons aujourd'hui : « Les molécules de l'eau, dit-il, en parlant de la fusion des glaces, ont entre elles, dans l'état de glace, une position différente que dans l'état de fluidité ; or, si l'on imagine une masse d'eau à une température au-dessous de zéro, et que, par une agitation quelconque, on dérègle la position de ses molécules, on conçoit que, dans cette variété de mouvement, quelques-unes d'entre elles doivent tendre à se rencontrer dans la position nécessaire pour former la glace, et, puisque cette position est une de celles où la chaleur est en équilibre, elles pourront la prendre, si la chaleur qui les écarte se répand assez promptement sur les molécules voisines, en sorte que l'état de fluidité de l'eau sera d'autant moins *ferme* que sa température sera plus abaissée au-dessous de zéro. » Puis, généralisant cette manière de voir, Laplace ajoute : « Dans un système de corps animés par des forces quelconques, il y a souvent plusieurs états d'équilibre ; ainsi un parallépipède rectangle, soumis à l'action de la pesanteur, sera en équilibre sur chacune de ses faces ; on peut l'y concevoir encore en le posant sur un de ses angles, pourvu que la verticale qui passe par son centre de gravité rencontre le sommet de cet angle ; mais cet état d'équilibre diffère des précédents en ce qu'il n'est point ferme, la plus légère secousse pouvant le détruire. Cela posé, imaginons en contact deux corps de température différente ; il est visible que la chaleur ne peut se mettre en équilibre que d'une seule manière, savoir : en se répandant dans les deux corps, de sorte que leur température soit la même ; mais si, par une augmentation ou une diminution de chaleur, les corps peuvent changer d'état, il existe alors plusieurs états d'équilibre ou de chaleur. »

Enfin le grand physicien-géomètre essaya, l'un des premiers, de rattacher cette physique moléculaire aux lois générales du mouvement. Voici ses expressions : elles méritent d'être reproduites :

« Dans tous les mouvements dans lesquels il n'y a point de changement brusque, il existe une loi générale que les géomètres ont désignée sous le nom de *principe de la conservation des forces vives* ; cette loi consiste en ce que, dans un système de corps qui agissent les uns sur les autres d'une manière quelconque, la force vive, c'est-à-dire la somme des produits de chaque masse par le carré de la vitesse est constante. Si les corps sont animés par des forces accélératrices, la force vive est égale à ce

1827). A dix-neuf ans, il était déjà professeur de mathématiques dans une école militaire, et, par de savants Mémoires, obtint la protection de d'Alembert. Il fut successivement examinateur de l'école d'artillerie, professeur à l'École normale, membre de l'Institut. Après le 18 brumaire, il fut ministre de l'Intérieur, puis président du Sénat. La Restauration le créa pair de France et académicien. On lui doit surtout la vulgarisation du système de Newton sur la gravitation universelle et de savants ouvrages de mathématiques et de mécanique céleste.

qu'elle était à l'origine du mouvement, plus à la somme des masses multipliées par les carrés des vitesses dues à l'action des forces accélératrices. La chaleur est la force vive qui résulte des mouvements insensibles des molécules d'un corps : elle est la somme des produits de la masse de chaque molécule par le carré de sa vitesse. »

Laplace fait observer que ce n'est là sans doute qu'une hypothèse, au même titre que celle qui assimile le calorique à un fluide, mais qu'il sera facile de faire rentrer la seconde hypothèse dans la première, en changeant les mots de « *chaleur vive, chaleur combinée et chaleur dégagée*, par ceux de *force vive, perte* (absorption), de *force vive et augmentation* (réapparition) *de force vive* ».

**APPLICATION DES LOIS DE LA FUSION.** — La température d'un corps en fusion restant invariable pendant toute la durée de la fusion, ou, en d'autres termes, toute la chaleur communiquée à un corps qui commence à se fondre étant entièrement consommée par le travail de fusion, on comprend que, selon qu'il s'agit d'une substance ou d'une autre, la chaleur de fusion doit être en plus ou moins grande quantité. Or, de tous les corps solides, la glace est celui dont la chaleur de fusion est la plus grande de beaucoup, c'est-à-dire que la glace est le corps le plus difficile à fondre.

C'est pourquoi bien peu fondées sont les accusations de négligence ou d'apathie adressées aux administrations municipales lorsque, pendant de longs jours, la neige gelée encombre nos rues. « C'est cependant si simple, s'écrie-t-on, de se débarrasser de la neige. Les bras manquent, les tombereaux sont en petit nombre ? Qu'à cela ne tienne ! A-t-on jamais vu la neige résister au feu ? Aux grands maux les grands remèdes : il faut vaincre à tout prix, et traiter la neige par la vapeur, par le feu ! » Et les conseillers, qui ne sont pas les payeurs, se demandent encore comment on ne fait pas place nette à coups de jets de vapeur.

Il serait bien commode, en effet, comme on le dit, de n'avoir qu'à promener quelques locomobiles dans les rues, projetant leurs vapeurs sur la neige et la faisant fondre. Le moyen est séduisant et même très pratique, lorsqu'on ne connaît la neige que de vue. En est-il de même en réalité ?

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, il faut beaucoup plus de chaleur pour fondre de la neige que du plomb. La neige, pour passer à l'état liquide, a besoin de 79,25 calories (voir ci-après *Calorimétrie*, ch. IX). Il est vrai que l'eau, pour se convertir en vapeur, nécessite environ 8 fois davantage. Un kilogramme de vapeur, à la pression de 3 à 5 atmosphères, renferme environ 650 calories. Il semble donc clair, de prime abord, qu'avec

un kilogramme de vapeur le premier venu fera fondre 8 kilogrammes de neige. On se trompe. Pour que ce résultat fût atteint, il faudrait que toute la chaleur contenue dans la vapeur fût assez complaisante pour passer intégralement dans la neige, au gré de l'expérimentateur; mais la vapeur elle-même, en se détendant au sortir de la chaudière, se refroidit sensiblement. Aussi les 650 calories contenues dans l'eau sont-elles déjà en partie dissipées quand le jet vient frapper la neige. Il était bon, cependant, de se renseigner directement sur la fraction de chaleur réellement utilisée pour la fusion. L'expérience a été faite sous la direction des ingénieurs de la ville de Paris. La vapeur était fournie par une chaudière de 3 chevaux-vapeur, et prise sur le dôme, au moyen d'un boyau terminé par une lance d'arrosage. Avec ce dispositif, il était facile de diriger le jet sur la neige étalée au milieu de la chaussée ou ramassée en tas. On pesa la neige expérimentée, et, comme vérification, l'eau fondue; on évalua la vapeur dépensée par la quantité d'eau d'alimentation qu'il fallait introduire dans le générateur pour rétablir le niveau primitif.

La moyenne de six expériences, assez concordantes entre elles, a donné les chiffres suivants: Durée effective de l'arrosage à la vapeur, 2 h. 54 m.; somme de temps passé à régénérer la pression perdue, 2 h. 26 m.; temps total de travail produit par la chaudière, 5 h. 20 m.; eau vaporisée, 321 litres; poids de neige fondue, 1,038 kilogrammes.

Ainsi ce n'est pas 8 kilogr. de neige que fond, en pratique, 1 kilogr. de vapeur à 4 atmosphères, mais bien seulement 3 kilogr. 23. On perd presque 5 pour utiliser 3; le rendement n'est pas même de 50 pour 100. Voilà pour l'effet utile de la vapeur; maintenant, et le matériel? et la durée de l'opération? et la dépense?

Les locomobiles, qui ne condensent pas, brûlent normalement 5<sup>kil.</sup> 50 de charbon par heure et par cheval-vapeur. Les 85 chevaux-vapeur que possède la ville de Paris consommeraient, pendant leur travail effectif de 14 heures, 67,000 kilogr. à 35 francs, soit 2,345 francs. Il faut ajouter à ce chiffre, pour 23 machines, 16 heures de mécanicien, y compris le temps d'allumage, à 50 centimes l'heure, 16 heures de chauffeur à 40 centimes, 14 heures de manœuvre pour la lance à 30 centimes, soit 427 fr. 80; total définitif 2,272 francs, sans compter cependant les balayeurs, le transport des machines, leur amortissement, etc. Le plaisir irréalisable de débayer la neige à la vapeur coûterait plus de 22 centimes par mètre carré.

Il va sans dire qu'il faudrait, dans tous les cas, avec ce procédé, supporter, tout autant, la neige sous les pieds jusqu'au dégel. Autrement, la vapeur projetée sur un point produirait de l'eau qui se congèlerait plus loin ou même sur place. Toute locomobile à fondre la neige deviendrait

une machine à faire du verglas. Et, au bois de Boulogne, au lac des patineurs, on l'a employée comme telle.

Donc, en y mettant la meilleure volonté possible, on est obligé de conclure que tous les partisans de la vapeur réunis n'avanceront jamais d'une heure le moment de la fonte des neiges.

Les exemples de la lenteur avec laquelle fond la glace sont nombreux et curieux.

Dans l'hiver de 1740, rapporte M. Tissandier, on construisit à Saint-Pétersbourg, avec les glaçons de la Néva, un palais dans lequel on donna des fêtes. Évidemment une grande quantité de chaleur était accumulée à l'intérieur, et elle fondait peu à peu la superficie des murs ; mais la fusion était très lente, de sorte que les murs, suffisamment épais, résistèrent pendant longtemps. On fit aussi avec de la glace des canons de quatre pouces d'épaisseur, et on lança des boulets de fer, sans que les canons fussent fondus ou brisés par l'explosion de la poudre.

Les Esquimaux habitent des maisons de glace, qu'ils nomment *iglous* et dont le mobilier lui-même est de glace. Ils coupent des blocs qu'ils détachent avec une scie à main. Le voyageur Hall en décrit une qu'il habita longtemps. La première assise se composait de dix-sept blocs, ayant chacun 1 mètre de long, 0<sup>m</sup>,50 de large et 0<sup>m</sup>,16 d'épaisseur. Tous ces rangs s'inclinaient ensuite, de manière à former un dôme où, lorsqu'ils eurent posé la clef de voûte, les maçons étaient enfermés. Un trou carré fut pratiqué dans la muraille, on passait par cette ouverture les blocs à mesure qu'ils étaient taillés. Ces blocs de neige, coupés menu menu par des hommes, étaient piétinés par des femmes et arrivaient à composer une seule masse très dure. C'était la plate-forme intérieure qui devait servir de table, de couchette et de banc. De petites masses semblables formèrent la cheminée, et le feu du foyer ne put les faire fondre.

La lenteur de fusion de la glace peut recevoir une application journalière. Nous allons dire tout à l'heure que la dilatation de la glace est capable de produire des effets désastreux, entre autres briser les conduits d'eau, décomposer les substances organiques. Or, pour préserver ces corps de la gelée, il suffit de les envelopper de linges mouillés et d'entretenir l'eau qui les imprègne. Le corps ainsi enveloppé ne se refroidira pas au-dessous de zéro, à quelque température qu'il soit soumis. L'eau formera lentement de petits glaçons sur le linge, en dégageant sans cesse de la chaleur. De même, une couche de glace à la surface d'un corps est très efficace contre la chaleur ; tant que la couche n'est pas absolument fondue la température du corps ne pourra s'élever au-dessus de 0°.



**DISSOLUTION.** — Le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide se fait aussi sous une autre influence que celle de la chaleur directe; elle se fait par l'action d'un liquide. Un morceau de sucre ou de sel mis



Les Icebergs (page 544).

dans l'eau, par exemple, *fond*. Ce phénomène porte le nom de *dissolution*. Il est dû évidemment à un travail moléculaire, sinon semblable, au moins analogue à celui de la fusion, et, conséquemment, il donne lieu à une consommation, à une disparition d'une certaine quantité de chaleur.

Nous verrons tout à l'heure, en parlant des moyens employés pour la fabrication artificielle de la glace, que l'on utilise pour cet objet l'abaissement de température, quelquefois fort grand, produit par une *dissolution*.

**SOLIDIFICATION.** — La *solidification* ou *congélation*, qui est l'inverse de la fusion, c'est-à-dire le passage d'un corps de l'état liquide à l'état solide, en abaissant progressivement sa température, est soumise à deux lois, réciproques des lois de la fusion :

1° *La température à laquelle un corps se solidifie est invariable pour chaque corps.*

2° *La température d'un corps qui se solidifie reste invariable pendant toute la durée de la solidification.*

Ces deux lois se vérifient expérimentalement, comme celles relatives à la fusion des corps, en maintenant un thermomètre dans les corps soumis à la solidification.

Tous les corps subissent le changement d'état dont nous parlons par l'abaissement graduel de la température; cependant quelques-uns, comme l'alcool absolu, le sulfure de carbone, l'éther, n'ont pu encore être solidifiés; mais, de même que les corps dits réfractaires à la fusion, il faut accuser de l'insuccès des tentatives faites pour les solidifier l'imperfection seule des moyens dont la science dispose encore aujourd'hui. Le phénomène de solidification, comme celui de fusion, s'applique à tous les corps.

De même, pour tous les corps, la température de congélation est la même que celle de la fusion; ainsi, on peut indifféremment dire que l'eau se *congèle* à 0° ou que la glace *fond* à 0°.

**SURFUSION.** — Quelquefois cependant la température à laquelle la solidification d'un corps commence est notablement inférieure à son point de fusion; ce phénomène, qui ne se produit que dans des circonstances *tout exceptionnelles*, a reçu le nom de *surfusion*. L'étain, le phosphore, l'eau sont les corps chez lesquels on peut observer ce phénomène exceptionnel. Mais il est nécessaire que le liquide soit maintenu dans des vases très étroits, qu'il soit en petite quantité, que l'abaissement de la température soit très lent, et surtout qu'il soit préservé de toute agitation. Le moindre choc en effet, le contact d'une portion du solide qui doit se former, l'introduction d'un morceau de glace, par exemple, détermine une solidification immédiate.

A ce moment, un thermomètre plongé dans le liquide en expérience

remonte jusqu'à la température du point de fusion; et cela est très explicable. Le retour des molécules à la position qui convient à l'état solide a nécessité un travail intérieur qui a produit de la chaleur, en quantité évidemment égale à celle disparue dans la fusion, puisqu'elle correspond à un même travail exécuté en sens inverse.

**CRISTALLISATION.** — Toutes les fois que dans un corps, dont la *cohésion* a été détruite par la chaleur, celle-ci cesse de faire son action, la première force reprend son empire, et dès lors les molécules, d'abord très écartées

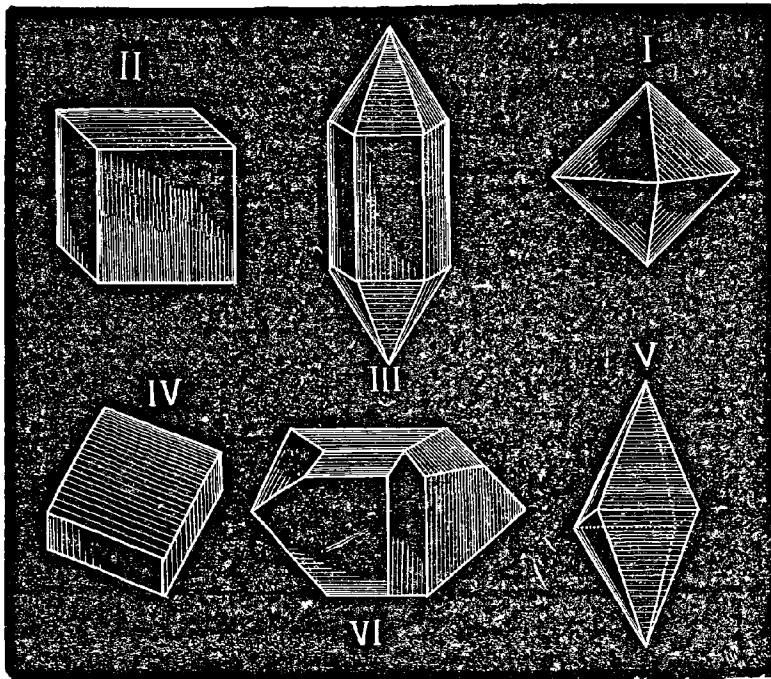


Fig. 271. — CRISTALLISATION.

les unes des autres, se rapprochent, s'accroissent par les faces qui se conviennent le mieux, si le refroidissement se fait lentement, et elles produisent alors des solides réguliers terminés par des faces planes. Ces solides, d'une forme symétrique et constante, ont reçu le nom général de *cristaux*, quelle que soit la substance qui en ait fourni les matériaux. Le phénomène particulier de solidification qui les a produits a reçu le nom de *cristallisation*. On dit qu'un corps *cristallise* quand les molécules se groupent de manière à donner naissance à des figures régulières et déterminées (fig. 271) telles que le *cube* pour le sel gemme (I), l'*octaèdre* pour l'alun

(II), le *prisme à six pans bipyramidé* pour le cristal de roche (III), le *rhomboèdre obtus* pour le spath d'Islande (IV), l'*octaèdre* (V) ou des *prismes obliques à base rhombe* (VI) pour le soufre. On étudie, en chimie, les différentes cristallisations des corps; cela forme d'ailleurs une branche spéciale des sciences naturelles, appelée *cristallographie*.

Quand le retour à l'état solide s'effectue d'une manière brusque, instantanée, les molécules n'ayant pas le temps de se grouper systématiquement, les corps ne peuvent affecter des formes géométriques; ils apparaissent alors en grains, en poussière plus ou moins fine; dans ce cas, ils sont dits *amorphes* (du grec *a*, privatif; *morphé*, forme).

La *cristallisation*, qui s'obtient par fusion, s'obtient également par *dissolution*, c'est-à-dire en laissant dissoudre le corps dans un liquide, et en faisant ensuite évaporer le liquide. C'est ainsi que l'on opère pour faire cristalliser le sucre candi et pour obtenir le sel (page 571).

Ce second procédé de cristallisation, appelé le procédé par la *voie humide*, est surtout employé lorsque la proportion de matière solide qu'un liquide contient en dissolution est supérieure à celle que ce liquide peut normalement contenir, c'est-à-dire lorsqu'il est *sursaturé*. Cette proportion varie suivant la température, et généralement elle augmente avec celle-ci.

#### CHANGEMENT DE VOLUME AU MOMENT DE LA SOLIDIFICATION. —

Lorsqu'un corps passe de l'état liquide à l'état solide, il y a diminution de volume, contraction, puisque c'est sous l'influence du froid que le corps se solidifie. Cependant nous avons fait remarquer (page 448) que l'eau faisait exception à la règle générale de dilatation et de contraction des corps. D'autres substances, l'antimoine, le bismuth, l'argent, la fonte, comme la glace, augmentent également de volume en se solidifiant. Cette circonstance rend la fonte très propre au moulage; car elle lui permet de pénétrer complètement dans tous les détails du moule en sable fin, dans lequel on coule le métal fondu, et d'en reproduire les détails les plus délicats.

Pour la glace, cette dilatation est considérable; elle est d'environ  $\frac{1}{14}$ ; elle se produit d'ailleurs avec une force mécanique extrêmement intense, irrésistible, capable de briser les substances les plus solides. Les membres de l'Académie *del Cimento*, de Florence, virent crever, dans une expérience, une boule de cuivre si épaisse que Musschenbroek évalua à 13,800 kilogrammes l'effort nécessaire pour la rompre. Le dicton : *geler à pierre fendre* exprime un fait réel, dont les constructeurs se préoc-

cupent. Ils appellent *pierres gelives* les pierres qui peuvent se briser par l'action des gelées, et, pour reconnaître ces pierres, ils les plongent dans une dissolution de sulfate de soude. La pierre de mauvaise qualité se fendille, lorsqu'elle est retirée de la dissolution, par l'effet de la dilatation du liquide, qui se cristallise.

Le major d'artillerie Williams a fait, à Québec, sur cet objet, une suite d'expériences, répétées dans tous les cours de physique. Il remplit d'eau une boule de 30 centimètres de diamètre, la ferma hermétiquement avec un tampon de bois, puis l'exposa au dehors. La température était de 28° au-dessous de zéro. L'eau se gela; le tampon fut lancé à plus de 100 mètres, et il se forma un mamelon de glace de plus de 20 centimètres. Une autre fois, la boule se fendit circulairement, en laissant sortir une lame de glace circulaire.

Ces efforts prodigieux expliquent les dégradations qu'éprouvent les tuyaux de conduite et les corps de pompe, la fracture des vases à col étroit, l'altération des matières organiques par les fortes gelées. On sait que les viandes, les fruits gelés deviennent mous, flasques et faciles à se putréfier, lorsqu'ils sont dégelés. On conçoit très bien encore les ravages que produit la gelée sur les végétaux, au moment où ils sont gorgés de sève.

Il importe de se prémunir contre ces graves inconvénients de la gelée : il ne faut pas oublier de vider les vases de verre, les fontaines de grès, à l'approche des froids rigoureux; il faut soustraire les tuyaux de conduite au contact de l'air, en les entourant de corps peu conducteurs de la chaleur, tels que du sable ou du charbon. Lorsqu'on établit des conduites d'eau avec des tuyaux en plomb, il faut choisir de préférence ceux qui sont tirés à la filière, parce qu'ils ont le grand avantage, sur les tuyaux soudés, de se dilater également et de pouvoir céder, sans rompre, à l'effort qui s'exerce sur eux.

D'après la dilatation qu'éprouve la glace, il est évident que celle-ci est moins dense que l'eau, et que, en vertu du principe d'Archimède (page 210), elle doit flotter à la surface des eaux. En effet, dans les mers polaires, on rencontre des amas de glace flottante, qu'on nomme *champs de glace*, même des montagnes de glace, connues sous le nom de *icebergs*, et surnageant sur la mer (page 537).

Un voyageur américain célèbre, Charles-Francis Hall, décrit ainsi ces masses flottantes :

« J'aperçus, dans le lointain, un *iceberg*, l'objet de mes rêves! Sa hauteur pouvait être de cinquante mètres, et ces cinquante mètres, que l'on voyait au-dessus de l'eau, ne constituaient qu'une faible portion de

la montagne, dont la partie immergée était sept ou huit fois plus considérable. Depuis des années, l'un de mes plus vifs désirs était de voir un de ces monts flottants ; l'idée que je m'en étais faite se trouvait dépassée. Le soir, nous en étions plus près ; on aurait dit une montagne d'albâtre posée sur la mer, qui était d'un bleu sombre. Vers dix heures, le navire était sur la même ligne que l'énorme glaçon... Plus loin, les icebergs se voyaient en grand nombre et souvent excitaient la surprise. L'un d'eux surtout m'étonna par sa hauteur et par sa forme. A vrai dire, il n'y a pas deux icebergs qui se ressemblent, et pas un qui ait longtemps le même aspect.

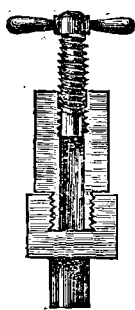


Fig. 272.

EXPÉRIENCE  
DE M. MOUSSON.

Un de ces monts avait une large ceinture dont les raies étaient obliques. Un autre rappela d'abord les ruines d'une église ; peu de temps après, il était changé en un éléphant, portant deux énormes tours et posant sur les débris d'une montagne d'albâtre, d'où s'élevaient de nombreux piliers. Impossible de ne pas qualifier de gothique l'apparition suivante : un rang d'arcades en ogive, surmonté d'un amas de frises, de corniches, de moulures et de flèches heureusement distribuées.

» Non seulement les icebergs sont variés et de forme changeante, mais ils ne gardent pas longtemps la même position. Le mouvement des glaces est aussi mystérieux que l'influence du pôle magnétique. On voit des icebergs s'approcher et s'éloigner les uns des autres avec une grâce, une noblesse, qui rappellent les allures des nobles danseurs d'autrefois. »

**INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LE POINT DE FUSION.** — La pression extérieure a une certaine influence sur le point de fusion. Ce fait, longtemps ignoré, a été mis en lumière, pour la première fois, par M. W. Thomson, en se servant d'un appareil analogue au piézomètre d'Erstedt (page 45), et plus récemment par M. Mousson, qui a prouvé que de grandes pressions pouvaient abaisser le terme de la congélation.

M. Mousson se sert d'un prisme en acier (*fig. 272*) percé d'un canal dans toute sa longueur. L'une des extrémités est fermée par un bouchon conique, fortement assujéti à l'aide d'une vis ; de l'autre côté, une sorte de piston en acier, fileté supérieurement, peut s'avancer dans la cavité. On renverse l'appareil, et, par l'ouverture inférieure, on introduit de l'eau récemment bouillie et un petit index métallique, qui naturellement gagne le fond du liquide. On fait congeler la masse, on adapte le bouchon conique, et, après avoir redressé l'appareil, on le porte dans un mélange réfrigérant de 18° à 20° au-dessous de zéro. A l'aide d'un levier agissant

sur le piston, on comprime ensuite très fortement la glace. M. Mousson évalue la pression absolue, dans quelques-unes de ses expériences, à plusieurs milliers d'atmosphères. En faisant cesser la pression, l'eau se congèle, et, en enlevant le bouchon, on trouve l'index métallique en contact immédiat avec lui. On en conclut que, naturellement, la glace a dû fondre; car, sans cela, l'index n'aurait pu descendre au fond de la cavité.

**REGÉLATION.** — Des observations précédentes, découle l'explication de quelques-unes des propriétés de la glace.

Elle est *glissante*, parce qu'un corps placé sur elle détermine, par sa pression, la formation d'une pellicule liquide, qui agit à la manière d'un corps *lubrifiant*; car l'eau a une puissance très grande pour diminuer les frottements. Cette puissance *lubrifiante* de l'eau a été constatée par de nombreuses expériences; entre les organes frottants des machines, elle a un pouvoir de près de cent fois plus grand que l'huile; un chemin de fer d'essai, établi à La Jonchère, dans lequel le roulement est remplacé par le glissement de patins sur des rails plats, avec interposition d'une lame d'eau, prouve le pouvoir lubrifiant de l'eau, et c'est cette lame d'eau lubrifiante qui, nous le répétons, rend la glace glissante, lorsqu'un corps a, par sa pression sur elle, formé une lame liquide.

La *regélation* s'explique de la même façon. On appelle de ce nom la propriété qu'ont deux morceaux de glace, appliqués par deux surfaces tant soit peu étendues l'un contre l'autre, de se souder aux points de contact pour ne former qu'un seul morceau.

Ces deux propriétés particulières à la glace se trouvent réunies dans la théorie des glaciers :

« La fusion de la neige sur les montagnes est toujours incomplète. Au-dessus d'une certaine limite, qu'on appelle « la ligne des neiges, » règnent les glaces éternelles. Plus bas, la chaleur, toujours prédominante, fait fondre complètement la neige formée par les froids de l'hiver. Mais si, au-dessus de cette ligne-limite, il y avait chaque année une accumulation de neige, les montagnes se chargeraient, à travers les siècles, d'un poids énorme; si la couche de neige s'accroissait seulement d'un mètre en une année, le dépôt, qui aurait pris naissance depuis dix-huit siècles, serait de 1,800 mètres. Et si, au lieu de remonter les temps historiques, on comptait à partir des âges géologiques, on arriverait à assigner à la couche de neige qui charge les épaules de nos montagnes, une hauteur prodigieuse. Aucun amoncellement de ce genre ne peut avoir lieu, et il n'est pas possible que le soleil entasse, sur les chaînes des montagnes, l'eau qu'il ravit sans cesse à l'océan.

» Par quel mécanisme les cimes des montagnes sont-elles débarrassées de l'excès de neige qui les écrase sous son poids? Des blocs immenses de neige, des glaciers formidables se détachent parfois et forment des avalanches qui se précipitent dans la vallée, où ils retournent à l'état liquide; mais ce mouvement brusque et accidentel n'est pas le seul dont est doué le glacier. Il descend la pente des montagnes lentement et progressivement: tandis que sa partie supérieure est située dans le domaine des glaces, au-dessus de la ligne des neiges, son pied touche les régions plus chaudes, où la neige est constamment fondue par l'action de la chaleur. »

On sait comment on peut agglomérer les flocons de neige, en les comprimant dans la main, et comment on peut les rendre durs, en les soumettant à une forte pression. La boule de neige est de la glace en voie de formation. La glace elle-même est capable de céder à la pression qu'on lui fait subir, et si, par conséquent, une couche épaisse de neige s'étend sur une couche de glace, celle-ci, supportant le poids de la neige qui la recouvre, sera pressée, comprimée; et si elle est située sur une pente, elle ne résistera pas longtemps à la force qui la pousse, et elle descendra lentement. Ce mouvement a lieu constamment le long des pentes des montagnes chargées de neige; le glacier glisse sur le versant où il a pris naissance, il atteint les régions plus chaudes, où il se convertit en eau. Entre la neige et le glacier se trouve le *nevé*. Le *nevé* est de la glace en voie de formation; c'est de la neige agglomérée, solide et opaque, qui se trouve dans toutes les montagnes.

Les glaciers sont doués d'une propriété singulière, souvent remarquée par les touristes: ils se moulent dans les canaux où ils se meuvent, et pénètrent dans les anfractuosités du sol; ils reproduisent extérieurement la forme du sol sur lequel ils reposent; on dirait une masse visqueuse, un amas de mélasse ou de cire molle, qui, sans être liquide, est mou, et prend l'empreinte exacte de la couche solide de terre ou de vase qui la supporte. Le glacier s'aplatit, s'élargit, se rétrécit, s'étend comme du caoutchouc, et son centre marche toujours plus rapidement que ses côtés amincis...

La *regélation* nous donne l'explication de ce fait. C'est à Faraday que l'on doit l'expérience première de la regélation; mais c'est à M. Tyndall qu'on en doit l'explication, appuyée par d'autres expériences intéressantes: « Un jour chaud d'été, dit le savant Anglais, je suis entré dans » une boutique du Strand; des fragments de glace étaient exposés dans » un bassin sur la fenêtre, et, avec la permission du marchand, prenant » à la main et tenant suspendu le morceau le plus élevé, je m'en suis



» servi pour entraîner tous les autres morceaux hors du plat. Quoique le  
 » thermomètre, en ce moment, marquât 30°, les morceaux de glace s'étaient  
 » soudés à leur point de jonction. »



L'appareil vole en éclats et un des fragments va briser les jambes et le corps  
 du préparateur Hervy (page 563).

La régélation de la glace s'effectue même au sein de l'eau chaude ;  
 deux fragments distincts, accolés l'un à l'autre au sein d'un liquide aussi  
 chaud que la main peut le supporter, tenus comprimés pendant quelques  
 secondes, se gèlent et s'agglomèrent en dépit de la chaleur. C'est en vertu

de cette régélation de la glace que les habitants des montagnes, sans être initiés aux théories de la physique, traversent des crevasses profondes sur des ponts de neige. En marchant avec précaution sur le pont façonné par les flocons agglomérés, on en détermine la soudure, et la masse prend alors, sous le jeu de la régélation, une dureté et une rigidité capables de supporter un grand poids. Certains guides, en Suisse, ne craignent pas de traverser ainsi, sur des ponts de neige, des gouffres très profonds, et si vous les voyez jamais à l'œuvre, cessez de vous effrayer, rappelez-vous la régélation de la glace...

« On comprend sans doute à présent comment un glacier s'engage à travers les défilés des Alpes, s'introduit dans les excavations du sol, pénètre dans les gorges étroites, se courbe et se replie sur le dos des montagnes, se modèle sur les rives de la vallée, se moule dans les sillons qui s'y trouvent, se prête au mouvement de toutes les parties, s'enfonce dans le crevassement des roches..... La glace, dans son mouvement, use et polit les surfaces où elle glisse : sa base inférieure est remplie de cailloux qui jouent le rôle des fragments durs adhérents au papier de verre; le sol est fissuré légèrement par ces petites pierres qui marchent lentement avec le glacier; il est raboté ou poli suivant sa nature. Quand le glacier a cessé d'exister, quand il est converti en eau sous l'action de la chaleur solaire, il laisse sur le lieu de son existence des traces incontestables de son passage, et le terrain qui l'a vu naître est couvert des empreintes qu'il y a gravées (1). »

## CHAPITRE VII

### CHANGEMENT DANS L'ÉTAT DES CORPS

#### 2° VAPORISATION

**VAPORISATION.** — La *vaporisation* est le passage d'un corps solide ou liquide à l'état de vapeur. Elle prend le nom d'*évaporation* quand elle a lieu seulement par la surface libre du corps. Elle prend le nom d'*ébul-*

(1) Gaston Tissandier, *De l'eau*.

*lition* quand la vapeur se dégage rapidement en bulles tumultueuses, qui, prenant naissance dans la masse d'un liquide, viennent éclater à sa surface.

Nous étudierons successivement ces deux ordres de phénomènes.

La vaporisation des corps, particulièrement des liquides, sous l'influence de la chaleur, est un fait connu de temps immémorial ; mais les physiciens essayèrent en vain de l'expliquer. L'explication donnée par Descartes est purement imaginaire ; mais elle est assez singulière pour que nous la reproduisions.

« Il y a, dit-il, une matière subtile dans les pores, étant plus fort agitée une fois que l'autre, soit par la présence du soleil, soit par telle autre cause... Ainsi que la poussière d'une campagne se soulève, quand elle est seulement agitée par les pieds de quelque passant ; car encore que les grains de cette poussière soient beaucoup plus gros et plus pesants que les particules du corps vaporisé, ils ne laissent pas pour cela de prendre leur cours vers le ciel, ce qui doit empêcher qu'on s'étonne de ce que l'action du soleil élève assez haut les particules de la matière, dont se composent les vapeurs et les exhalaisons. » (*Des Météores*, discours II.)

Dechâles réfuta cette opinion du célèbre philosophe ; mais les physiciens, partisans des qualités occultes de la matière, expliquaient la force ascensionnelle de l'eau à l'état de vapeur, en imaginant une légèreté positive, qui, se combinant avec les atomes, avait pour effet de rendre les corps plus légers que l'air. Leroy (1) présenta une théorie moins idéale de l'évaporation, qui eut pendant longtemps une certaine autorité. Il regardait l'air comme le dissolvant des liquides, et il cherchait à prouver que l'air a la faculté de dissoudre l'eau et de la convertir en fluide élastique, comme l'eau dissout les sels et les fait passer de l'état solide à l'état liquide. Cette théorie régna parmi les physiciens jusqu'au moment où Dalton (2) montra, par une série d'expériences très ingénieuses, que les vapeurs ne sont pas une dissolution des liquides dans l'air ; que les molécules de ceux-ci, dégagées par la vaporisation, se distribuent, dans l'espace occupé par l'air ou par tout autre gaz, absolument de la même

(1) LEROY (Charles), professeur de physique médicale à Montpellier (1726-1779). Il était fils de Leroy (Jean-Baptiste), mort en 1800, qui s'est particulièrement occupé des phénomènes électriques.

(2) DALTON (Jean), physicien et chimiste anglais (1766-1844), un des plus grands savants dont puisse s'enorgueillir l'Angleterre. Il professa les mathématiques et les sciences physiques à Manchester, où il passa sa vie. Il a publié des travaux sur les fluides élastiques, des *Observations météorologiques* et un *Système de philosophie chimique*. Il fut membre de la Société royale de Londres et de l'Institut de France. Sa statue, par Chantrey, est placée à l'entrée de l'institution royale de Manchester.

manière qu'elles se distribuent dans le vide, et que, dans cette circonstance, elles exercent, les unes à l'égard des autres, la même action dans les gaz que dans le vide.

**ÉVAPORATION.** — L'*évaporation*, nous l'avons dit, est le passage d'un corps à l'état de vapeur, seulement par la surface libre du corps. Que l'on place, par un froid très vif, un peu de neige dans une assiette, celle-ci disparaîtra promptement sans se fondre : effet d'évaporation. Dans un bocal de verre bien bouché, un morceau de camphre dégage des vapeurs, qui vont ensuite se déposer en petits cristaux sur les parois les plus élevées : le camphre s'est évaporé. Si vous débouchez le flacon, vous sentez une odeur très forte, qui provient évidemment des parcelles de camphre en vapeur, qui viennent rencontrer l'organe de l'odorat. Avec un morceau d'iode, substance brune, d'une odeur particulière, on aperçoit facilement l'évaporation, parce que les vapeurs de ce corps sont d'un magnifique violet.

Les liquides, bien plus que les solides, présentent des exemples d'évaporation. Nous donnerons, à la fin de ce chapitre, diverses applications pratiques de l'évaporation de l'eau. Quelques-uns, tels que l'eau, l'esprit-de-vin, et surtout l'éther, le chloroforme, s'évaporent en présence de l'air seulement, et, pour cela, sont appelés *corps volatils* ; d'autres, au contraire, ont besoin d'une élévation de température plus ou moins grande pour la production du phénomène, ce sont les corps *fixes*. Dans tous les cas, l'élévation de la température active, dans tous les corps, le phénomène dont il s'agit, et quand on fait *sécher* un corps devant le feu, on utilise précisément cette propriété de la chaleur de rendre plus rapide l'évaporation.

**VAPEURS, GAZ.** — Il n'y a, en réalité, aucune différence entre les mots *gaz* et *vapeur*. L'une et l'autre de ces expressions servent à désigner les corps dans l'état spécial que nous avons désigné (page 28). Une vapeur, c'est toujours le gaz dans lequel se transforme un corps par l'évaporation. Cependant, on se sert plus particulièrement du mot *vapeur* quand il s'agit de corps qui sont habituellement à l'état solide ou liquide, et du mot *gaz* pour ceux qui, sauf des cas exceptionnels, sont ordinairement à l'état aériforme. D'ailleurs, quelques gaz n'ont pu encore être obtenus sous une autre forme ; mais, en théorie, ils ne sont que les vapeurs d'un corps solide ou liquide. De plus, les *vapeurs* se distinguent des *gaz* par la facilité avec laquelle elles repassent à l'état liquide, soit par un abaissement de température, soit par un accroissement de pression.

**FORMATION DES VAPEURS DANS LE VIDE.** — La pression atmosphérique présente un certain obstacle au passage des liquides à l'état de vapeur; voilà pourquoi un liquide, simplement exposé à l'air, se volatilise lentement. Dans le vide, au contraire, sa vaporisation est instantanée, parce que la force élastique des vapeurs ne rencontre aucune résistance. Pour le démontrer, on se sert de l'appareil connu sous le nom de *baromètre à vapeur*. Cet appareil se compose de plusieurs tubes barométriques A, B, C, D (*fig. 273*), qu'on remplit de mercure et qu'on fait plonger, les uns à côté des autres, dans une cuve de mercure. Un de ces tubes, A, reste à l'état de baromètre ordinaire, c'est-à-dire que le mercure reste sec. Dans le tube B on a introduit quelques gouttes d'eau, dans le tube C quelques gouttes d'alcool, dans le tube D quelques gouttes d'éther. On voit aussitôt que le liquide pénètre dans le vide barométrique, que le mercure s'abaisse en *b*, en *c*, en *d*, dans chacun des tubes. Ce n'est pas certainement le poids du liquide introduit qui cause cet abaissement du mercure, puisque ce poids est une fraction très petite du liquide déplacé; c'est que, pour chaque liquide, il y a eu, par évaporation, production instantanée de vapeur, dont la force élastique a refoulé le mercure; et comme la dépression est plus grande dans un tube que dans l'autre, on conclut qu'à température égale, la force élastique de la vapeur d'éther, par exemple, est plus grande que celle de la vapeur d'alcool, et ainsi des autres. Une échelle, divisée en millimètres, indique les différentes dépressions, et, conséquemment, la force élastique de chacune des vapeurs en expérience.

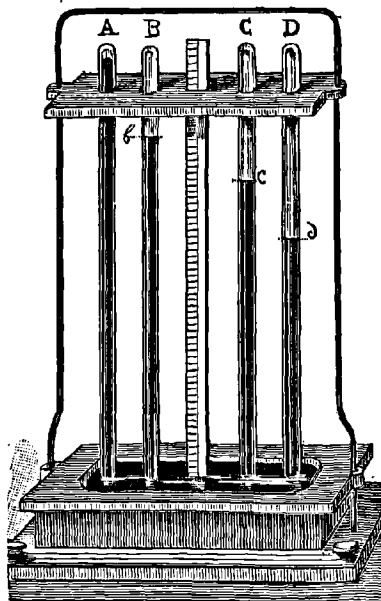


FIG. 273. — BAROMÈTRE A VAPEUR.

**FORCE ÉLASTIQUE DES VAPEURS. — TENSION MAXIMA. — SATURATION.**

— Pour démontrer la formation instantanée de la vapeur dans le vide, nous nous sommes appuyé sur la pression produite sur le mercure par la force élastique de la vapeur; c'est, en effet, l'*expansibilité* ou la force élastique, qui est la propriété caractéristique des gaz (page 28). Une autre expérience rend manifeste cette force élastique. Un ballon B, de verre (*fig. 274*), a

une garniture supérieure en métal, présentant deux ouvertures : l'une, munie du robinet R, communique avec une machine pneumatique ; l'autre, S, met le ballon en communication avec le manomètre à air libre, M. Le vide étant fait dans le ballon, le mercure des deux branches A et C est à peu près au même niveau, la différence ne provenant que de la très petite

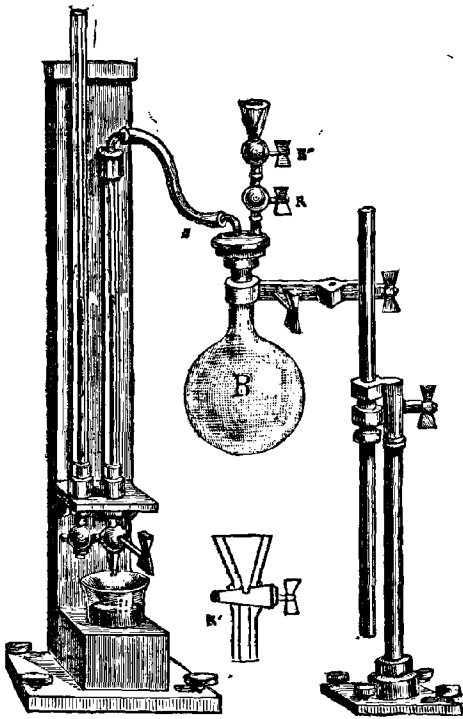


Fig. 274.

FORMATION DES VAPEURS DANS LE VIDE.

quantité représentant la force élastique de l'air laissé par la machine pneumatique. Le robinet R étant fermé, on introduit par le robinet R', dont la clef n'est point percée de part en part, mais qui présente seulement une cavité, une certaine quantité de liquide dans le ballon, sans mettre celui-ci en communication avec l'air. Pour cela, on remplit l'entonnoir du liquide choisi, on ouvre le robinet R et l'on tourne la clef de R'. A mesure qu'un peu de liquide est introduit dans le ballon, la colonne de mercure s'abaisse dans la branche C du manomètre, ce qui indique un accroissement de force élastique ; et, comme on n'aperçoit aucune trace du liquide introduit dans le ballon, il faut en conclure que le liquide introduit s'est vaporisé, et que c'est la force élastique de la vapeur produite qui influe sur le manomètre.

Cependant cet accroissement de pression n'est point illimité. Dans l'expérience faite avec le baromètre à vapeur, par exemple, il peut arriver ou que l'on aura ajouté assez de liquide volatil pour qu'il en reste après la production de la vapeur, ou bien que la formation de la vapeur s'arrêtera faute de liquide. Dans le premier cas, on dit par abréviation que la vapeur est saturée, ce qui veut dire que l'espace où se trouve la vapeur en est saturé, qu'il y a saturation.

Dans cette circonstance, la vapeur a atteint le point où son élasticité est la plus forte, point que l'on désigne sous le nom de *tension maxima*. Une nouvelle compression aurait pour seul effet de faire passer à l'état liquide une portion de la vapeur.

On fait l'expérience avec un baromètre plongeant dans une cuvette profonde, analogue à celui dont on se sert pour la loi de Mariotte (*fig. 136*, page 283). On introduit dans le tube une quantité d'éther, liquide très volatil, suffisante pour qu'au-dessus du mercure il en reste une couche d'un centimètre environ à l'état liquide, la chambre barométrique étant saturée de vapeur. On note alors la hauteur du mercure dans le tube, au-dessus du niveau du mercure dans la cuvette. Cela fait, si on enfonce le tube dans la cuvette, afin d'augmenter la pression sur la vapeur, ou si on le soulève afin de la diminuer, on observe que *la hauteur de la colonne mercurielle, au-dessus du niveau extérieur, reste la même*. Dans le premier cas, l'espace occupé par la vapeur diminue et la couche d'éther augmente, parce qu'une partie de la vapeur repasse à l'état liquide; dans le second cas, le contraire a lieu : ce qui prouve que la force élastique d'une vapeur saturée, ou mieux, d'une vapeur saturant un espace donné et en contact avec son liquide générateur, reste invariable, quelle que soit la pression, pourvu que la température demeure constante.

Si la quantité de liquide était insuffisante pour qu'il en restât un excès après sa vaporisation, on verrait alors, en soulevant et en abaissant successivement le tube, la tension ou la force élastique de la vapeur varier en raison inverse de son volume; ce qui démontre que la force élastique d'une vapeur *non saturée* est soumise, comme les gaz proprement dits, à la loi de Mariotte (page 279).

**INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA TENSION MAXIMA.** — La température exerce une grande influence sur la tension maxima d'une vapeur quelconque. Pour s'en assurer, il suffit de considérer un baromètre à vapeur, contenant le même liquide. Le niveau du mercure est le même dans tous les tubes, si la température est la même, et si la vapeur est, dans chacun d'eux, en contact avec un excès de liquide. Mais si on élève la température, le niveau du mercure s'abaisse rapidement; si on abaisse la température, le niveau du mercure s'élève.

Faraday (1), ayant mis du mercure dans un flacon maintenu à la température de 0°, suspendit au-dessous du bouchon une feuille d'or; celle-ci blanchit aussitôt, ce qui indiquait que les vapeurs du mercure l'attaquaient; mais, ayant abaissé la température, la feuille d'or resta intacte, preuve que la tension maxima du mercure était devenue nulle.

(1) FARADAY (Michel), physicien anglais (1791-1867). Fils d'un pauvre forgeron de Newington-Butts, près de Londres, ouvrier lui-même, il s'est élevé, par son travail et son génie, au rang d'un des plus éminents savants du monde. Il débuta dans la science par être le préparateur du célèbre H. Davy. Ses travaux sur la liquéfaction des gaz et sur l'électro-magnétisme ont puissamment contribué aux progrès de la chimie et de la physique.

Lorsqu'un récipient est saturé de vapeur et que les différents points ne sont pas à la même température, la vapeur tend à prendre en chaque point une tension différente; mais l'équilibre ne peut exister qu'autant que la tension est partout la même, et alors *la force élastique dans le récipient a pour valeur la tension maxima qui correspond au point le plus froid*. Ce principe porte le nom de *principe de la paroi froide*.

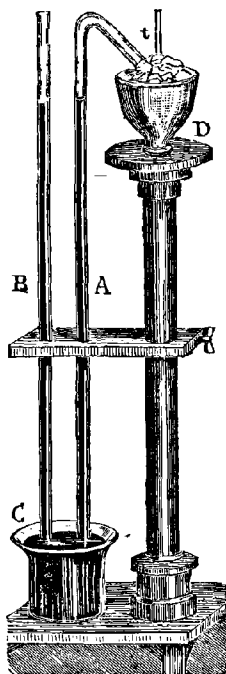


Fig. 275. — APPAREIL DE GAY-LUSSAC.

Mesure de la tension maxima au-dessous de 0°.

**TENSION MAXIMA DE LA VAPEUR D'EAU.** — La connaissance de la tension maxima de la vapeur d'eau est très importante, non seulement au point de vue théorique, mais aussi au point de vue pratique. C'est, en effet, cette tension qui constitue la force motrice dans les machines à vapeur, et dès lors, il est essentiel, pour les constructeurs de ces appareils, de connaître exactement les diverses températures où ceux-ci pourront être portés, la valeur exacte de la force qui les met en jeu, afin d'en déduire le degré de résistance qu'ils doivent offrir.

Voici les principaux procédés pour mesurer cette tension maxima.

1° *Tension maxima des vapeurs au-dessous de 0°.* — Pour mesurer la force élastique de la vapeur d'eau à une température inférieure à 0°, Gay-Lussac imagina un appareil (*fig. 275*) composé de deux tubes barométriques A et B, pleins de mercure, ayant une même cuvette C. Le tube B, droit et parfaitement purgé d'air, et d'humidité, est destiné à mesurer la pression atmosphérique; le tube A se recourbe à son extrémité supérieure de sorte que la chambre barométrique plonge dans un mélange réfrigérant D, dans lequel est placé un thermomètre *t*. Or, le liquide contenu au-dessus du mercure distille, et se rend dans la région froide; l'on remarque alors que le niveau du mercure dans ce tube A descend d'une quantité, qui varie avec la température du mé-

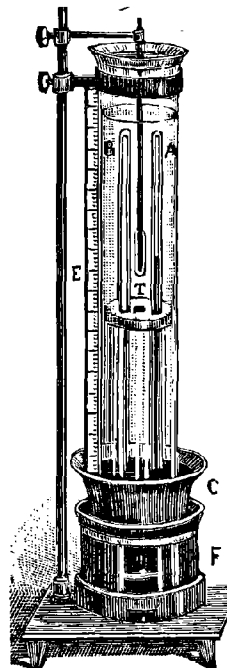


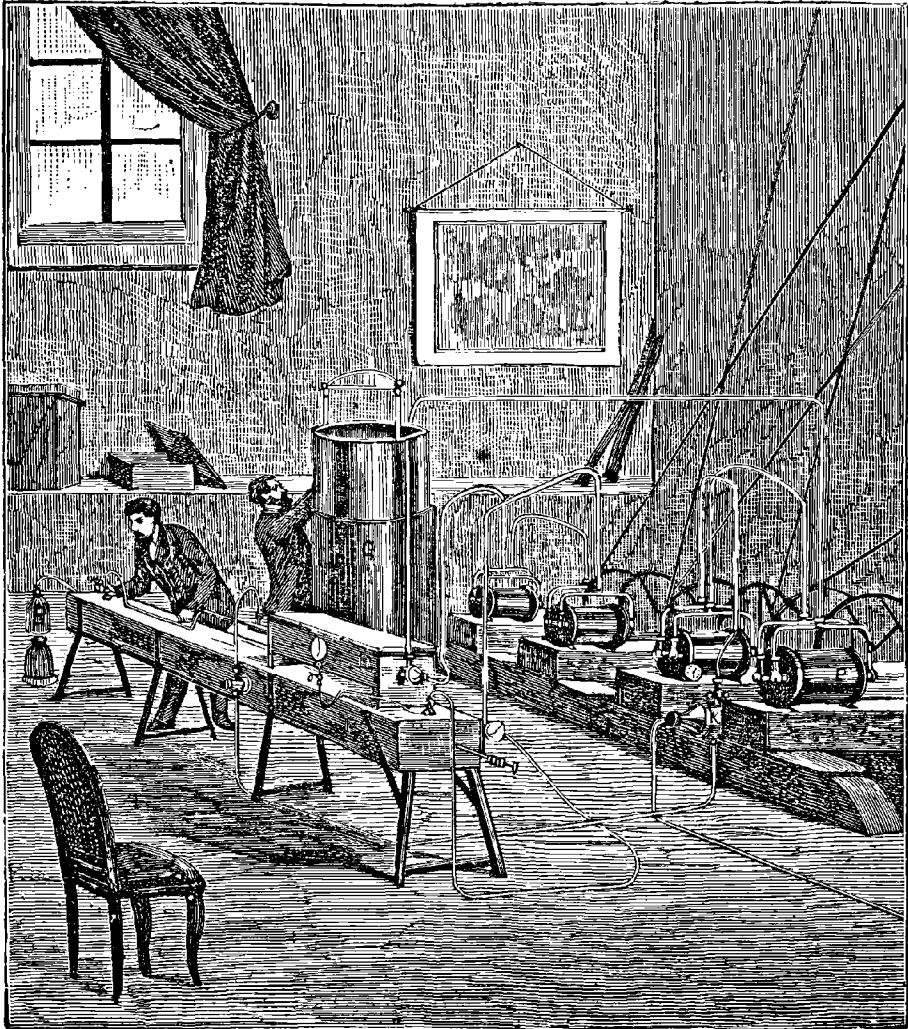
Fig. 276.

APPAREIL DE DALTON.

Mesure de la tension maxima de 0° à 100°.



lange frigorifique. A  $0^{\circ}$  la dépression est de  $4^{\text{mm}},60$ , à  $10^{\circ}$  de  $1^{\text{mm}},96$ , à  $20^{\circ}$  de  $0^{\text{mm}},84$ , à  $30^{\circ}$  de  $0^{\text{mm}},30$ , etc. Ces dépressions dépendent nécessairement de la tension de la vapeur dans les chambres barométriques,



Appareil de M. Pictet, pour la liquéfaction des gaz (page 566).

et servent ainsi à mesurer la tension maxima correspondant à une température donnée.

2° *Tension maxima des vapeurs entre  $0^{\circ}$  et  $100^{\circ}$ . Procédé de Dalton.* — L'appareil de Dalton, quelque peu modifié par Gay-Lussac, se

compose (*fig. 276*) de deux tubes barométriques A et B plongeant dans une cuve de fer C pleine de mercure, placée sur un fourneau F. Le tube barométrique B est absolument vide d'air et d'humidité ; dans le tube A, au contraire, est une petite quantité d'eau. Les deux tubes sont plongés dans un cylindre de verre plein d'eau, au milieu duquel est placé un thermomètre T, qui donne la température du liquide. En chauffant graduellement la cuvette de mercure, et conséquemment celle du cylindre, l'eau contenue dans le tube A se vaporise, et à mesure que la tension de sa vapeur augmente, le mercure descend. Une échelle graduée E, placée sur le côté de l'appareil, marque la différence de pression entre le mercure du tube A et celui du tube B, et, en réduisant à 0° la hauteur du mercure dans le tube B, les différences de niveau du mercure des deux tubes donnent les différences de pression. C'est par ce procédé que Dalton put donner, le premier, une table des forces élastiques de la vapeur d'eau depuis 0° jusqu'à 100°.

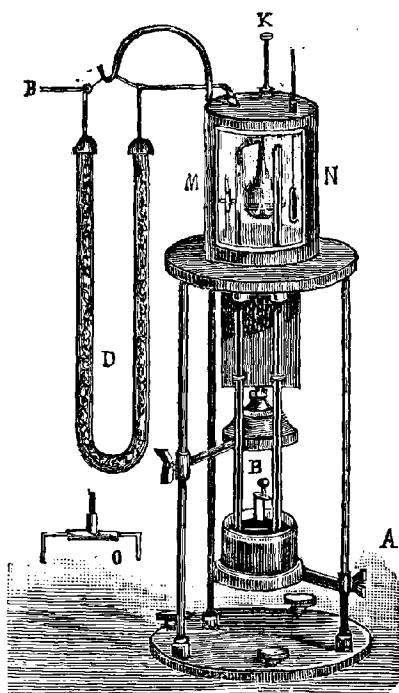


Fig. 277.— APPAREIL DE REGNAULT.

Mesure de la tension maxima de 0° à 100°.

Le cylindre de verre est remplacé (*fig. 277*) par un manchon de métal MN dont le fond supporte deux tubes qui peuvent recevoir l'extrémité supérieure des deux baromètres A et B, maintenus par deux tirants de caoutchouc. Le baromètre à vapeur B communique avec un globe *a* par le moyen d'un autre tube de cuivre à trois branches, représenté en O sur la gravure. La troisième branche de ce tube supporte un nouveau tube qui aboutit à un cylindre recourbé D, en verre, plein de pierre ponce, lequel communique encore en *b* avec une machine pneumatique.

Dans le ballon *a* on introduit une certaine quantité d'eau, dont une portion se vaporise dans le baromètre B, en chauffant légèrement le globe. En faisant le vide avec la machine pneumatique, l'eau se distillera continuellement du globe *a* et du baromètre vers le tube D, où les vapeurs

se condensent. Lorsqu'on a ainsi vaporisé une partie de l'eau, on conçoit que tout l'air a été chassé de l'appareil; on soude alors à la lampe le tube capillaire qui unit B au tube à trois branches. Le tube B, fermé, contient néanmoins encore une petite quantité d'eau; on fait alors l'expérience comme avec l'appareil de Dalton.

L'avantage de cette disposition de l'appareil de M. Regnault est que l'eau du manchon, occupant une moins grande hauteur, sa température

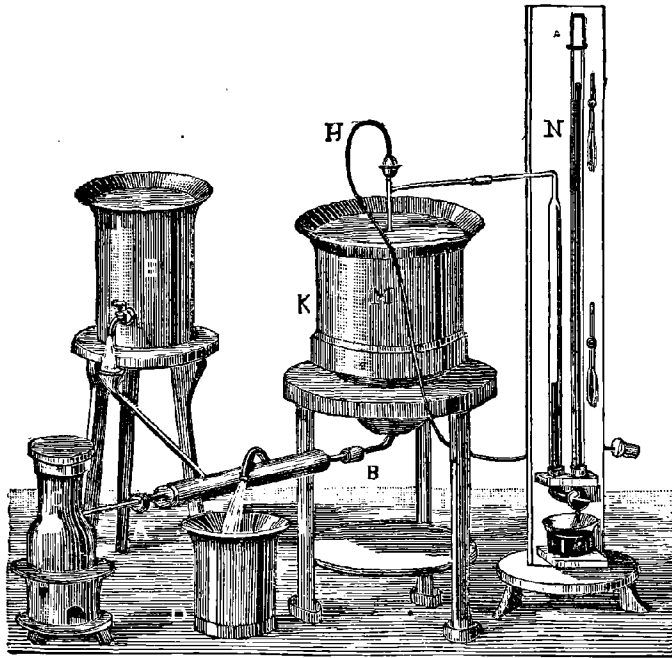


Fig. 278. — APPAREIL DE LABORATOIRE DE M. REGNAULT.

Tension maxima des vapeurs au-dessus de 100°.

est plus uniforme. Un agitateur K, placé au milieu, mêle d'ailleurs constamment les différentes couches du liquide; de plus, une face en verre, à travers laquelle on relève les niveaux, permet de vérifier ceux-ci, sans l'erreur de réfraction possible avec l'appareil de Dalton, parce que les tubes barométriques y sont vissés sur une surface plane.

3° *Tension maxima des vapeurs au-dessus de 100°.* — La mesure des tensions de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100° présente un intérêt tel que, en 1828, le gouvernement français nomma une commission spéciale, dont Arago et Dulong faisaient partie, pour étudier cette question. Ces deux physiciens firent un grand nombre d'observations également espacées entre 100° et 242°, et qui correspondaient

à des pressions comprises entre 1 et 24 atmosphères. Il resta quelques doutes sur l'exactitude des dernières mesures, à cause de la mauvaise construction de la chaudière, qui laissait échapper l'eau. En 1830, le gouvernement des États-Unis fit reprendre le travail de la commission française : les physiciens américains copièrent servilement les appareils des physiciens français, procédèrent de même, et cependant ils trouvèrent d'énormes différences avec les résultats obtenus. Il était nécessaire de faire de nouvelles recherches ; en 1844, Regnault proposa un nouveau procédé avec lequel il put arriver à la plus grande exactitude. Nous avons donné (page 281) une gravure représentant l'installation en grand de ces appareils au Collège de France ; nous allons décrire en détail la manière dont il opérât dans le laboratoire.

Le grand physicien portait à l'ébullition, sous une pression connue, de l'eau enfermée dans un vase, et il mesurait la température à laquelle cette eau entrait en ébullition. Ces pressions étaient la valeur de la tension maxima pour la température correspondante.

Dans un vase de cuivre C (*fig.* 278), il enfermait le liquide destiné à être transformé en vapeur, et, pour indiquer la température de ce liquide porté à l'ébullition et sa valeur, quatre tubes de fer, fermés à leur partie inférieure, pleins d'huile et renfermant des thermomètres, plongent à différentes profondeurs dans le vase. Un tube AB part du vase et va aboutir à un ballon de verre M, contenant de l'air comprimé ou dilaté, maintenu à une température constante par un bain d'eau K, et communiquant par un tube avec un manomètre à air libre N, et par un autre en caoutchouc HP avec une machine pneumatique ou avec une machine de compression, selon que l'on veut raréfier ou comprimer l'air contenu dans le ballon M. Un manchon D, dans lequel circule un courant réfrigérant que fournit le réservoir E, enveloppe le tube AB.

En chauffant lentement l'eau du vase C, l'eau entre en ébullition à une température d'autant plus inférieure à 100° que l'air est plus raréfié, c'est-à-dire que la pression est plus faible, et ce, en vertu d'un principe que nous verrons ci-après dans le chapitre relatif à l'ébullition. Or, les vapeurs se condensant dans le tube AB, refroidi d'une manière constante, la pression d'abord indiquée par le manomètre ne varie pas, et pour cette même pression la tension maxima de la vapeur pendant l'ébullition est donc égale à la pression exercée sur le liquide.

En regardant d'un côté le manomètre, et de l'autre les thermomètres, on détermine ainsi la tension de la vapeur à une température connue.

Nous donnons la mesure des tensions maxima, obtenues par M. Regnault au moyen des procédés ci-dessus. La multiplicité de ses expé-

riences et l'extrême précision des moyens employés par lui, présentant un caractère particulier d'autorité, semblent avoir donné aujourd'hui des résultats indiscutables.

*Tension maxima de la vapeur d'eau à différentes températures d'après M. Regnault.*

TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.	TENSIONS en atmosphères.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.	TENSIONS en atmosphères.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.	TENSIONS en atmosphères.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.	TENSIONS en atmosphères.
- 320	0,320		450	71,391		134*	2235,92	3,008	189*	9237,95	12,125
- 30	0,386		50	91,982		135	2353,73		190	9442,70	
- 25	0,605		55	117,478		139,3	2645,38	3 1/2	192,1	9907,61	13
- 20	0,927		60	148,791		140	2717,63		195	10519,63	14
- 15	1,398		65	186,945		144	3040,28	4	198,8	11395,26	15
- 10	2,093		70	233,092		145	3125,55		199	11147,46	15,062
- 5	3,113		75	288,517		148,3	3397,96	4 1/2	200	11688,96	
- 3	3,642		80	354,643		150	3581,23		201,9	12006,12	16
- 2	3,943		85	433,041		152,2	3780,37	5	204,9	12869,18	17
- 1	4,257		90	525,450		155	4088,56		205	12955,66	
0	4,600		95	633,778		159,3	4534,36	6	207,7	13612,41	18
+ 1	4,94		100	760,00	1	160	4651,62		210	14324,80	19
5	6,534		105	906,410		165	5274,54	7	213	15197,48	19,997
10	9,165		110	1075,37		170	5961,66		215	15801,33	21
15	12,099		111,7	1113,09	1 1/2	171	6107,19	8,036	217,9	16687,19	22
20	17,291		115	1269,41		175	6717,43	9	220	17390,36	23
25	23,550		120	1491,28	2	180	7546,39	9,929	222,0	18058,64	24
30	31,548		121	1539,25	2,025	184,5	8359,32	11	224,8	18746,07	25
33,5	37,481	1/2	125	1743,88		185	8453,23		225	19097,04	25,125
35	41,827		127,8	1854,32	2 1/2	188,4	9131,28	12	230	20926,40	
40	54,806		130	2030,28							

**MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.** — Nous venons de dire ci-dessus ce que l'on désigne plus particulièrement sous le nom de *gaz* et sous le nom de *vapeurs*. Le mélange de ces deux corps est soumis aux deux lois suivantes, démontrées au moyen d'un appareil imaginé par Gay-Lussac.

1° *Un espace étant donné, la tension et, par suite, la quantité de vapeur nécessaire pour le saturer est toujours la même, à température égale, que cet espace soit vide ou qu'il soit occupé par un gaz.*

2° *Lorsqu'une vapeur se répand dans un espace déjà rempli de gaz, sa force élastique s'ajoute à celle du gaz avec lequel elle se mélange.*

L'appareil de Gay-Lussac (*fig. 279*) se compose d'un tube de verre AE assez large, communiquant avec un autre tube CD beaucoup plus étroit, ouvert à son extrémité supérieure C. Le tube AE se termine à son extrémité inférieure par un robinet T, et à son extrémité supérieure, par une monture métallique fermée par un robinet S. Sur cette monture on peut visser différentes pièces. L'appareil étant rempli de mercure, on y intro-

duit une certaine quantité d'air ou de tout autre gaz desséché, en fixant sur le gros tube un ballon de verre B, muni d'un robinet R, et en ouvrant les trois robinets R, S et T. Une partie du mercure remplissant le tube AE s'écoule par le robinet inférieur T, et est aussitôt remplacé par l'air du ballon B. On ferme alors les robinets et on verse du mercure dans le petit tube CD jusqu'à ce que le niveau du mercure soit égal en H dans les

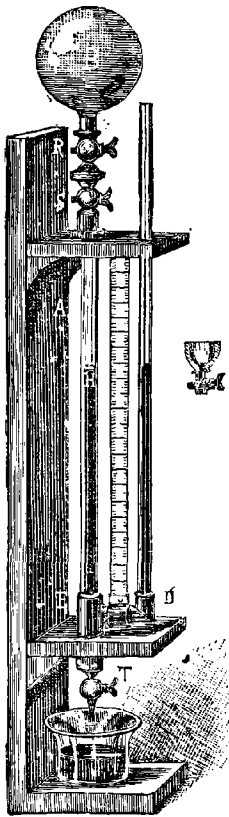


Fig. 279. — APPAREIL  
DE GAY-LUSSAC.

deux tubes. L'air ou le gaz en expérience, emprisonné entre l'extrémité supérieure du tube AE et le niveau du mercure, a ainsi une élasticité égale à la pression atmosphérique; son volume se mesure sur une échelle divisée placée entre les deux tubes. Après avoir fermé tous les robinets, on dévisse le ballon B et on le remplace sur la monture par un petit entonnoir muni d'un robinet V, dit à *cuiller*, c'est-à-dire dont le boisseau n'est pas complètement foré, et présente, en conséquence, une cavité que l'on nomme la *cuiller*. On remplit l'entonnoir du liquide que l'on veut vaporiser; puis, le robinet S étant ouvert, on tourne le robinet V de manière que sa cavité se remplisse de liquide et le verse ensuite dans l'espace HS. On continue ainsi jusqu'à ce que la paroi semble mouillée et que l'espace soit complètement saturé de vapeur, c'est-à-dire jusqu'à ce que le mercure cesse de s'abaisser dans le tube AE et de monter dans le tube CD. Alors on ramène le niveau du mercure dans le grand tube AE au point H où il se trouvait précédemment, en versant du mercure dans le tube CD jusqu'à une hauteur suffisante.

Le volume du mélange se trouve ainsi précisément celui qu'occupait l'air seul, à la pression atmosphérique; le poids de la colonne soulevée fait donc équilibre à la force élastique de la vapeur. Mais la hauteur de cette colonne est précisément celle qui sert de mesure à la force élastique, dans le vide, de la vapeur employée, quand la température est celle de l'opération. Il faut donc conclure que cette force élastique est la même dans le vide et dans l'air, et que, dans le mélange des gaz et des vapeurs, le gaz et la vapeur agissent comme s'ils étaient seuls.

M. Regnault, dans de nouvelles et rigoureuses expériences, a trouvé cependant une différence de tension à l'avantage des vapeurs dans le vide;

mais cette différence est si petite que la loi posée par Gay-Lussac peut être néanmoins considérée comme exacte.

**LIQUÉFACTION DES GAZ.** — La tension maxima d'une vapeur se reconnaît nettement, lorsque apparaît le liquide qui a donné naissance à la vapeur. Ainsi liquéfier un gaz n'est autre chose que l'amener à sa tension *maxima*, puisque, à ce moment, la plus petite diminution de volume doit faire apparaître le liquide.

Il y a deux procédés pour réaliser cette liquéfaction : le refroidissement et la compression.

Par le refroidissement, on diminue graduellement la quantité de

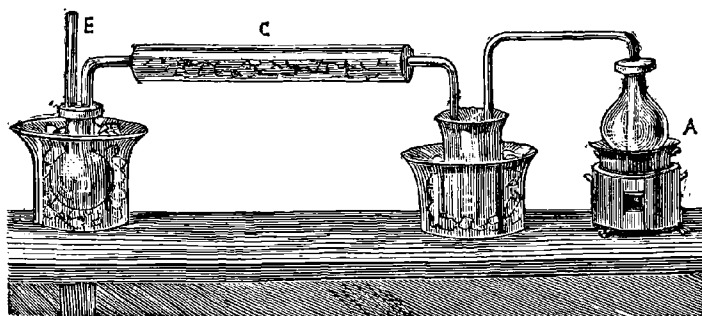


Fig. 280. — LIQUÉFACTION DE L'ACIDE SULFUREUX.

vapeur nécessaire à la saturation, et l'on peut, en conséquence, atteindre une température telle que cette saturation soit possible avec la quantité de gaz existante. Par la compression, on augmente naturellement la densité, qui peut être ainsi amenée à la valeur qui correspond à la *tension maxima*.

Citons la liquéfaction de l'acide sulfureux, par exemple, obtenue d'abord par Monge et Clouet par le refroidissement (*fig. 280*). A est un matras en verre, posé sur un bain de sable et contenant les matières propres à fournir un dégagement d'acide sulfureux ; on y adapte un premier tube qui plonge dans une éprouvette B, entourée de glace, et qui est destinée à condenser l'eau et les impuretés entraînées par le gaz. De cette éprouvette, celui-ci passe à travers un tube horizontal C, renfermant du chlorure de calcium qui achève de le dessécher, puis il se rend tout à fait anhydre dans un petit ballon D, placé au centre d'un mélange réfrigérant. C'est là qu'il se liquéfie. Le ballon D porte un tube droit effilé E, pour laisser sortir l'air de l'appareil, au commencement de l'opération, et les portions de gaz sulfureux qui échapperaient à l'action du mélange réfrigérant. L'opération

terminée, on s'empresse de renfermer l'acide liquide dans un flacon bouché à l'émeri, qu'on conserve dans la glace.

En 1823, Faraday commença une série d'expériences pour réduire les gaz à l'état liquide, seulement par la compression. Le procédé de l'habile expérimentateur consistait à emprisonner, dans des tubes de verre de faible capacité, des matières solides ou liquides capables de fournir un grand volume de gaz. Le gaz, resserré dans un espace étroit, se comprimait lui-même à mesure qu'il se produisait, et finissait par se liquéfier. Il lui fallut une grande dextérité pour éviter des explosions dangereuses.

Faraday compléta ses recherches en perfectionnant son procédé par l'association du refroidissement avec la pression.

Vers 1834, Thilorier a construit un appareil, devenu classique, fondé sur cette méthode de Faraday, appareil avec lequel, entre autres gaz, se liquéfia, pour la première fois, l'acide carbonique.

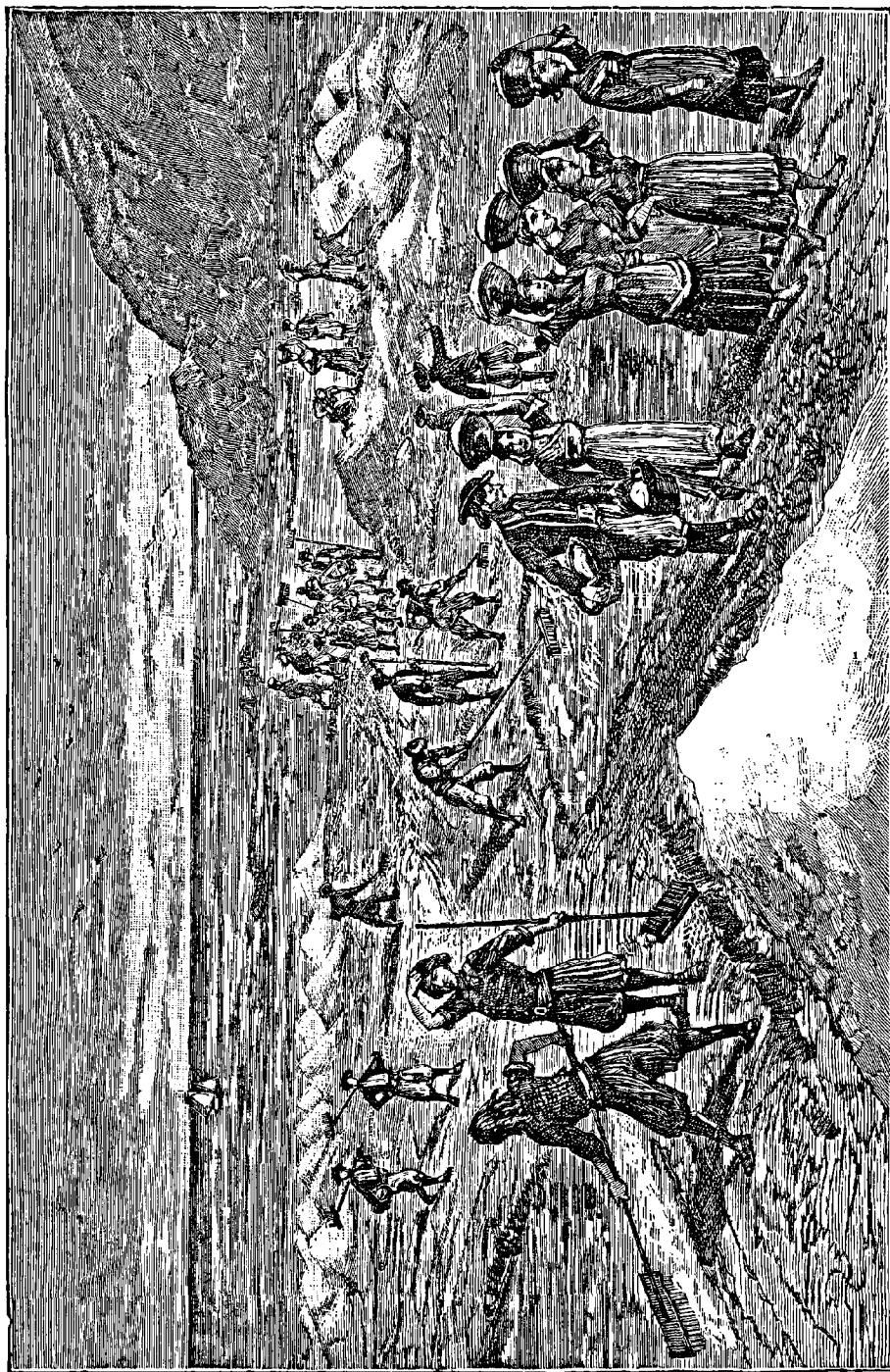
L'acide carbonique se liquéfie à 0°, sous une pression de 36 atmosphères. Dans cet état, il est tellement expansif, qu'il distille entre — 17° et 0°, dans les tubes qui le contiennent. A 0°, la vapeur exerce donc une pression égale à 36 atmosphères, et à — 11° elle est encore égale à 23 atmosphères; en sorte qu'un changement de température de 11 degrés occasionne une différence de pression équivalant à 13 atmosphères.

H. Davy a conclu, le premier, de ce fait important, que les gaz comprimés pourront être employés un jour comme agents mécaniques et substitués à la vapeur d'eau, puisqu'il suffira de légères différences de température, comme celle entre le soleil et l'ombre, pour produire des changements de pression de plusieurs atmosphères, qu'on ne peut obtenir, dans les machines à vapeur ordinaires, qu'en brûlant une grande quantité de combustible. Brunel a essayé de réaliser les idées de Davy, en construisant une machine dans laquelle l'acide carbonique liquide, alternativement raréfié par la chaleur et condensé par le froid, pût développer une force considérable; mais il ne put vaincre les difficultés qui résultent de la facilité avec laquelle l'acide carbonique fait explosion, ni trouver des appareils assez forts pour résister à la haute tension de la vapeur.

Rien n'étant impossible à la science, il est évident qu'on pourra plus tard produire ainsi des effets bien autrement prodigieux que ceux de la machine à vapeur. L'azote, et surtout l'hydrogène, dans l'état liquide, exerceraient, sans aucun doute, une action bien plus puissante encore que l'acide carbonique. Cependant, jusqu'à présent, on n'a pu annihiler les dangers qui résultent de l'emploi et de la fabrication de ces gaz liquéfiés.

L'affreux malheur arrivé à l'École de pharmacie de Paris, le 30 dé-





Marais salants de Bretagne (page 572).



cembre 1840, montre à quels accidents on est exposé en préparant l'acide carbonique liquide. On opérait la liquéfaction du gaz dans l'appareil de fonte inventé par Thilorier; tout semblait marcher convenablement lorsque, tout à coup, une explosion violente se fait entendre : c'est l'appareil qui vole en éclats, et dont un des fragments va briser les jambes et le corps du préparateur Hervy. L'infortuné jeune homme ne put résister à l'amputation et mourut trois jours après.

L'appareil de Thilorier était alors en fonte, et on l'enveloppait d'une

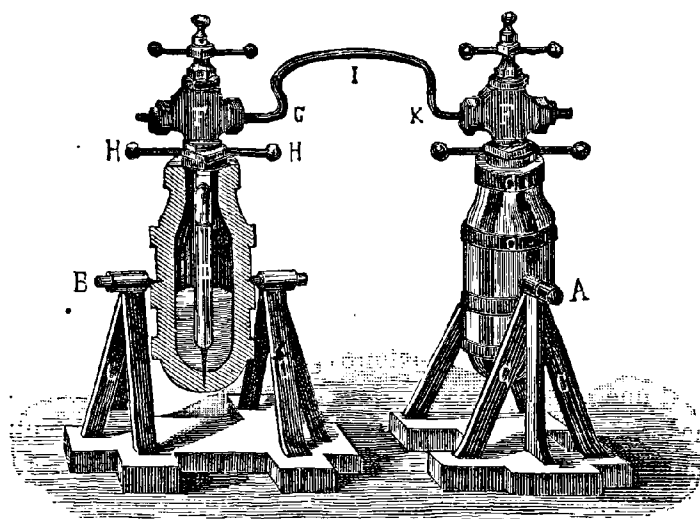


Fig. 281. — APPAREIL DE THILORIER.

double armature en fer forgé. MM. Deleuil, habiles fabricants d'instruments de précision, ont ainsi modifié l'appareil :

Deux cylindres, A et B, en fonte, de 3 centimètres d'épaisseur (*fig.* 281), d'une capacité de 6 litres, sont mobiles, dans un plan vertical, autour de deux pivots soutenus sur de forts châssis en fonte *c, c, c, c*. Ils sont embrassés, dans le sens de leur longueur, par quatre bandes de fer doux fort épaisses *d, d, d, d*, maintenues elles-mêmes par quatre cercles de même nature *e, e, e, e*. Avant d'être mis en place, ces cercles sont chauffés au rouge; de sorte qu'en se refroidissant, ils exercent, par leur contraction, une pression considérable sur les bandes longitudinales et sur les cylindres. Ceux-ci sont surmontés de tubes à robinets *f, f*, et ils communiquent entre eux par un tube en cuivre *gik*, d'un petit diamètre. L'un des cylindres sert de *producteur* ou *générateur*, l'autre de *réceptif* ou *condenseur*.

Dans le producteur, on introduit 1,800 grammes de *bicarbonate de soude*, avec 3 litres  $1/2$  d'eau à 35 ou 40 degrés, et, au centre de ce mélange, on place un cylindre en cuivre D, contenant 1,000 grammes d'acide sulfurique concentré, et dont on ne bouche point l'ouverture supérieure. Après avoir fermé le producteur, on le fait basculer sur ses deux tourillons *h, h*, de manière à le rendre horizontal. L'acide sulfurique, s'écoulant alors du cylindre qui le renferme et se répandant sur le bicarbonate de soude, met immédiatement en liberté une énorme quantité de gaz acide carbonique, dont la force élastique croît incessamment, parce qu'il ne trouve pas l'espace suffisant pour le volume qu'il devrait occuper. Lorsque cette force élastique est devenue égale à 30 atmosphères, l'acide carbonique se liquéfie et il se distille dans le condenseur, dont la température est moindre que celle du générateur, aussitôt qu'on ouvre les robinets *f, f*, du tube *gik*, qui établit la communication entre les deux cylindres. Au bout d'une demi-heure, la distillation est opérée. Il y a, dans le récipient, 1 litre  $1/3$  d'acide liquide et sans eau.

**LIQUÉFACTION DES GAZ INCOERCIBLES.** — La liquéfaction de tous les gaz est une des plus éclatantes victoires remportées par la science, à notre époque; c'est une des preuves les plus remarquables de l'exactitude des théories modernes. Que l'on nous permette d'insister sur ce point.

On avait réussi, jusqu'à présent, à liquéfier un grand nombre de gaz; et cependant, les expérimentateurs les plus habiles avaient complètement échoué, quand il s'était agi d'opérer sur quelques gaz, que nous offre la nature avec le plus d'abondance. Cinq gaz, surtout, avaient résisté aux manipulations les plus énergiques: l'*hydrogène*, l'*oxygène*, l'*oxyde de carbone*, l'*azote*, le *bioxyde d'azote* (1). Cette exception à la règle n'était pas considérée comme une atteinte à la généralité de la théorie: on s'avouait vaincu uniquement par impuissance; mais cette défaite n'était pas sans préoccuper les physiciens.

En 1876, M. Cailletet (Louis), à l'aide d'un dispositif ingénieux, parvenait à liquéfier successivement l'*acétylène*, le *formène*, et enfin un des gaz réfractaires jusqu'ici aux essais, le *bioxyde d'azote* (Académie des sciences, séance du 26 novembre). Le 16 décembre, l'habile expérimentateur liquéfiait l'*oxygène* au laboratoire de l'École normale. Le 30 décembre, il liquéfiait l'*azote*, et même l'*hydrogène*, considéré comme le plus incoercible des gaz. Ainsi, en un mois, les dernières difficultés avaient été vaincues. Il n'y avait aucun doute à conserver: aucun gaz n'échappait

(1) Voir notre *Chimie*.

à la loi. Tous les corps peuvent prendre l'état solide, liquide et gazeux.

L'appareil imaginé par M. Cailletet est excessivement simple (*fig. 282*).

C'est un tube de verre T, à parois très épaisses, clos par un bout I, et terminé inférieurement par un réservoir ouvert O. On emplit ce tube du gaz à liquéfier, et on l'entoure d'un manchon F, rempli d'un mélange réfrigérant, pour accroître encore le froid et maintenir plus longtemps la

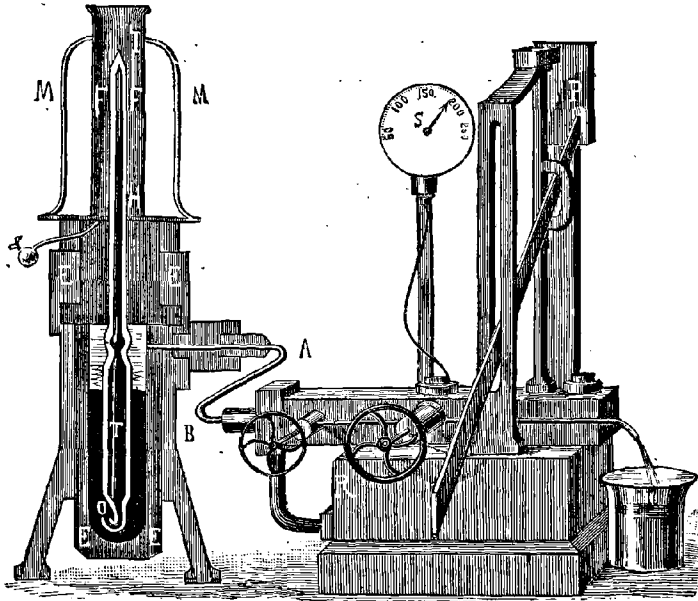


Fig. 282. — APPAREIL DE M. CAILLETET.

liquéfaction. Le tube T est placé au milieu d'un bloc en fer forgé D, contenant du mercure; sa partie supérieure, particulièrement épaisse, HI, sort au-dessus du bloc et reste, par conséquent, visible pour l'observateur; et, par précaution, en cas de rupture, elle est entourée d'un second manchon de verre MM. Le tout est placé dans un cylindre de fonte EE. L'intérieur du bloc en fer D est en communication, par un tuyau métallique AB, avec une presse hydraulique P. Un manomètre S indique la pression. On manœuvre la presse hydraulique. La pression se transmet à l'intérieur du bloc D au mercure. Le mercure pénètre par la pointe ouverte O dans le tube; il fait piston et comprime à son tour le gaz. En quelques instants, on voit le gaz refoulé par le mercure jusqu'à la partie supérieure du tube de verre, et ainsi réduit de 1 à 300 fois de son volume primitif, c'est-à-dire soumis à une pression de 300 atmosphères. Ainsi comprimé, le gaz ne donne aucun signe de liquéfaction; mais qu'on vienne brusquement à faire

cesser la pression en ouvrant simplement le robinet de la presse hydraulique, au moyen des volants CR, la détente est immédiate. Le gaz, à son tour, refoule violemment le mercure dans le bloc. La détente a produit un abaissement de température énorme. Les molécules, pour s'écarter, absorbent de la chaleur, et elles en prennent aux molécules voisines. Celles-ci, comme saisies par le froid, se rapprochent et se condensent. Une petite portion de gaz prend l'état liquide pendant quelques instants, jusqu'à ce que le refroidissement dû à la détente ait cessé d'agir.

En même temps que M. Cailletet liquéfiait l'oxygène sur une petite échelle, M. Raoul Pictet réalisait la même expérience avec un appareil presque industriel.

L'oxygène est produit ici directement dans une cornue en fer forgé B, pouvant résister à 500 atmosphères de pression (*fig.* à la page 553). On enferme, dans cet obus, du *chlorate de potasse*, dont la décomposition, sous l'influence de la chaleur, donne de grandes quantités d'oxygène. Le gaz se comprime de lui-même, au fur et à mesure qu'il se dégage du chlorate de potasse. La cornue est en communication avec un long tube, en verre très épais, de 5 mètres de long sur 0<sup>m</sup>,04 de diamètre intérieur. Ce tube est lui-même enfermé dans deux tubes enveloppes H, F, concentriques, destinés à maintenir l'oxygène comprimé à une température très basse. Le premier tube renferme de l'acide carbonique solidifié, dont la température descend isolément à 65° au-dessous de zéro; le second, de l'acide sulfureux liquide. Ces deux réfrigérants, agissant simultanément, font descendre le tube central à la température exceptionnelle de —140°. Quatre pompes d'aspiration et de refoulement P, accouplées et actionnées par une machine à vapeur de 15 chevaux, liquéfient l'acide carbonique, et assurent la constance de la réfrigération. La température de —140° n'est obtenue qu'au bout de plusieurs heures de travail consécutif des pompes. Le tube central à oxygène sort, à son extrémité, d'un mètre hors de l'enveloppe réfrigérante. C'est sur ce trajet qu'on peut observer le changement d'état du gaz. Au bout, d'ailleurs, se trouve un robinet qui permet de faire communiquer le gaz comprimé avec l'atmosphère. Le refroidissement ainsi obtenu, et la pression du gaz dans l'obus étant de 320 atmosphères, si l'on ouvre l'orifice de sortie, la détente a lieu, l'oxygène condensé se liquéfie, le liquide se rassemble dans le tube, et, en même temps, une partie s'échappe en forme de jet.

Cette expérience admirable, répétée plusieurs fois, a parfaitement réussi, et a permis à M. Raoul Pictet de recueillir jusqu'à 45 grammes d'oxygène liquide (1).

(1) De Parville, *ubi supra*.

**CHALEUR DE VAPORISATION. — FROID PRODUIT PAR L'ÉVAPORATION.**

— Pour passer de l'état liquide à l'état de vapeur, chaque corps a besoin d'absorber une certaine quantité de chaleur; ce passage a, en effet, donné lieu à un travail mécanique résultant de la désagrégation des molécules du liquide et de l'expansion du volume gazeux. Cette quantité de chaleur est même fort considérable. L'expérience confirme le fait. Tout le monde sait qu'en laissant évaporer sur la main quelques gouttes d'un liquide

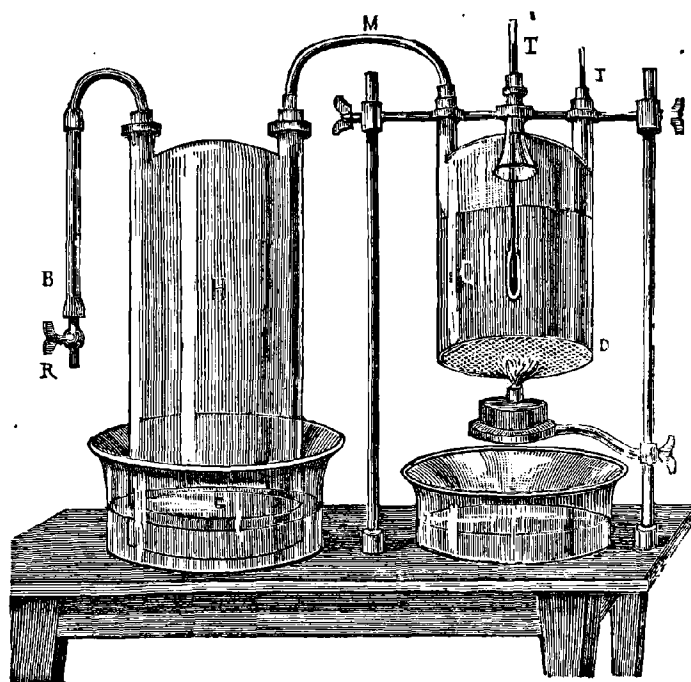


Fig. 283. — EBULLITION DE L'EAU SUSPENDUE DANS UNE DENTELLE.

volatil, de l'éther ou de l'alcool, on éprouve une sensation de froid d'autant plus grande que le liquide est plus volatil. C'est l'évaporation qui produit cette sensation analogue, que l'on éprouve à la sortie du bain, alors que le corps est couvert d'une multitude de gouttelettes d'eau. Si l'on entoure la boule d'un thermomètre d'une mousseline imbibée d'éther, on constate que l'évaporation de ce corps produit un abaissement de température. Que dans un vase on place de l'éther et un tube de verre fermé contenant un peu d'eau, l'éther s'évapore, et, si l'on active cette évaporation en soufflant dessus avec un soufflet, l'eau se congèle dans le tube; elle se congèlerait plus vite encore si l'on plaçait le verre sous la machine pneumatique.

L'eau elle-même se congèle par une évaporation rapide, ce qui se produit dans le vide. *L'expérience de Leslie* le démontre. Dans une capsule on met un peu d'eau, et l'on place la capsule dans un vase plus grand contenant de l'acide sulfurique concentré, destiné à absorber la vapeur d'eau au fur et à mesure qu'elle se produit. Si l'on met le tout sous la cloche d'une machine pneumatique, l'eau se congèle après quelques coups de piston.

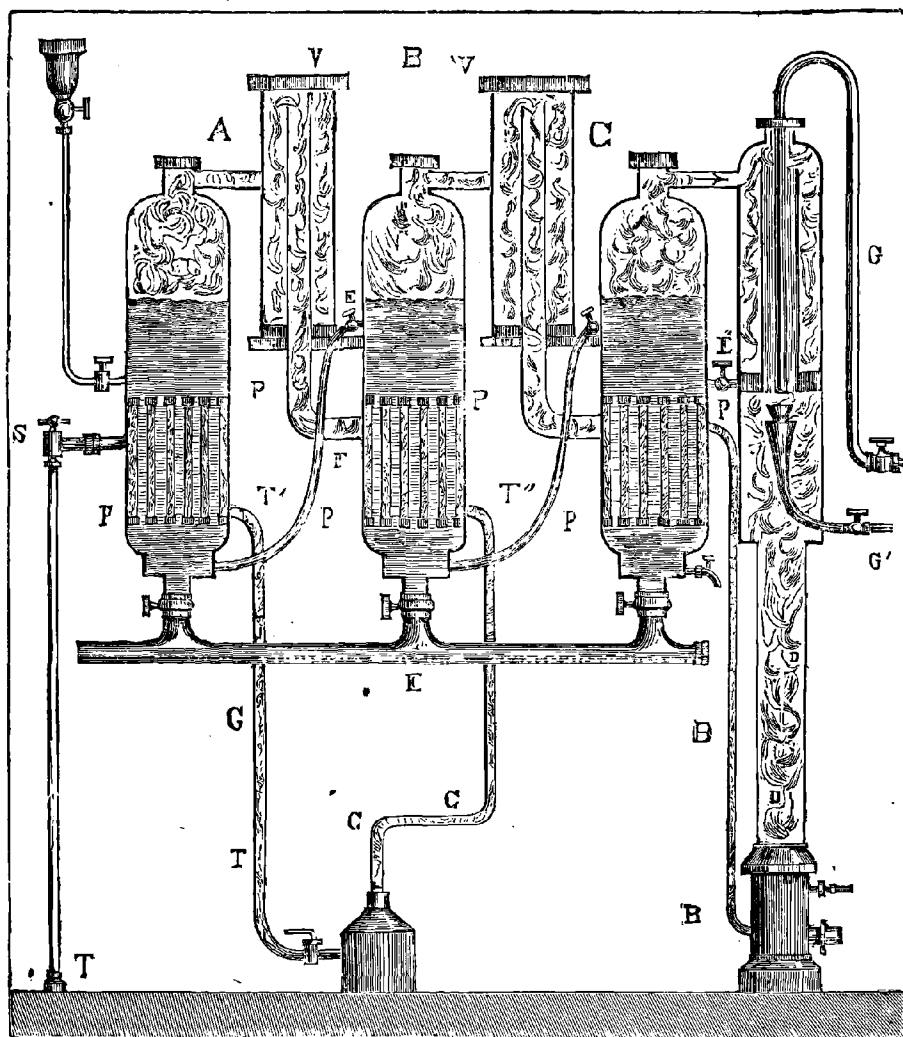
Une expérience curieuse, due à M. W. de Romilly, s'appuie sur ces principes de l'évaporation. Une cloche en verre C à trois tubulures, et de 12 centimètres de diamètre environ, est fermée à sa partie inférieure par une simple dentelle D (*fig. 283*). Un thermomètre T plonge au fond de cette cloche, dans l'eau que l'on y verse ; un second thermomètre *t* donnera la température de l'air intérieur. Un tube de caoutchouc M fait communiquer la cloche C avec une grande cloche de réserve H, de 28 centimètres de diamètre. Un tube B, placé à une des tubulures de cette cloche H, est terminé par un robinet d'aspiration R.

Or, si l'on place de l'eau dans le vase C, on peut faire bouillir cette eau sans que le liquide s'échappe. Non seulement le mince tissu ne brûle pas, mais encore l'eau se met à bouillir au-dessus de son enveloppe. En effet, le tissu est protégé par l'évaporation énergique du liquide. Le refroidissement, produit à chaque instant sur la lame liquide extérieure, suffit pour empêcher le tissu de roussir ; il reste intact, et la chaleur transmise à l'intérieur élève bientôt assez la température pour que la masse liquide entre en ébullition.

**CHALEUR PRODUITE PAR LA CONDENSATION.** — De même que l'évaporation consomme une certaine quantité de chaleur, la *condensation*, ou retour de la vapeur à l'état liquide, en reproduit une quantité exactement égale. La preuve de cette assertion est dans mille faits journaliers. La température de l'air, par exemple, est considérablement adoucie pendant la pluie en hiver, parce que la vapeur d'eau atmosphérique s'est condensée en gouttes liquides. Dans les distillations, il faut entretenir un courant d'eau froide autour du serpentín, moins pour abaisser la température du liquide condensé que pour absorber la quantité considérable de chaleur produite. Nous avons vu une application de ce principe dans le chauffage des calorifères. Dans certaines industries, dans les ateliers de teinture, par exemple, dans les papeteries, où il est nécessaire de porter des cuves à l'ébullition, on n'a qu'une seule chaudière qui produit de la vapeur ; celle-ci vient se condenser au fond de la cuve, cède sa chaleur au liquide qu'elle contient, et finit par porter toute la masse à 100°.



Outre qu'un seul fourneau peut servir ainsi à chauffer plusieurs cuves, on peut faire usage de simples cuves de bois, n'étant pas obligé, de cette façon, de les mettre sur le feu.



Appareil à triple effet, de M. Cail, pour l'évaporation des jus de betteraves (page 570).

**APPLICATIONS DIVERSES DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS. — APPAREIL A TRIPLE EFFET POUR L'ÉVAPORATION DES JUS DE BETTERAVES.** — De nombreuses causes ont une influence, en pratique, sur la rapidité de l'évaporation : 1° *La température du liquide qui s'évapore et celle de l'air*

*ambiant*. En effet, plus la température du liquide est élevée, plus son évaporation est rapide, puisque c'est la chaleur qui est l'agent de toute vaporisation ; plus l'air ambiant est chaud, plus il peut se charger de vapeur pour se saturer. On utilise cette propriété dans les arts, pour faire sécher un grand nombre de produits, en les plaçant dans des *étuves*, c'est-à-dire dans des chambres chauffées à 30, 40, 50, 60 degrés, et dont l'air se renouvelle constamment pour donner issue aux vapeurs qui se dégagent ; 2° *le renouvellement de l'air et son agitation*. Si, en effet, la même couche d'air restait en contact avec la surface du liquide, elle se saturerait, et l'évaporation serait nulle. C'est cette agitation de l'air qui dessèche rapidement le pavé de nos rues, après une pluie ; qui fait que le vent du nord, froid à la vérité, mais aussi sec et rapide, dessèche plus vite que ne le fait en été une grande chaleur ; 3° *la pression de l'air* ; car nous avons vu que la pression était un obstacle à la formation des vapeurs.

Dans les fabriques de sucre, en conséquence, on se sert, pour l'évaporation et la concentration du jus, d'un appareil basé sur ces principes, inventé, il y a une trentaine d'années, par un Américain nommé Rillieux, perfectionné par M. Cail, et connu sous le nom d'*appareil à triple effet*.

Ce sont (*fig.* à la page 569) trois grandes chaudières en tôle ou en cuivre A, B, C, dans lesquelles on produit un vide partiel, au moyen d'une pompe aspirante, qui soutire l'air par les tubes *aa*, *bb*, *cc* des chaudières A et B, et par le tube *dd* de la chaudière C. Dans la moitié de ces chaudières se trouvent deux plaques tubulées *pp'*, qui relient entre eux un grand nombre de tubes de cuivre par lesquels s'établit la communication du liquide de la partie supérieure avec l'inférieure. Lorsque le vide partiel a été effectué, on introduit par le tuyau T de la vapeur à 100°, qui, en soulevant la soupape S, entre dans l'intérieur de la chaudière A, et entoure les tubes dans lesquels circule le jus, qui est ainsi porté à l'ébullition. Son office étant rempli, elle retourne avec l'eau de condensation par un tube *t* dans le réservoir commun pour toutes les vapeurs épuisées de l'usine.

Quand le jus est arrivé dans cette première chaudière à la densité de 10° à l'aréomètre Baumé, on le fait passer, au moyen du tuyau *t'*, dans la chaudière B, et l'on remplit de nouveau A de jus faibles. La vapeur, produite par l'évaporation de ces derniers jus, se rend, par la partie supérieure de la chaudière, dans un vase de sûreté V, disposé de manière que les gouttelettes de jus sucré, entraînées mécaniquement par la vapeur, viennent se heurter contre la paroi du tube interne, et retombent ainsi au fond de ce vase, d'où un petit tuyau *e* conduit le liquide ainsi formé dans la deuxième chaudière. Du vase de sûreté, la vapeur s'échappe dans la deuxième chaudière B, où elle rapproche le jus jusqu'à 17° Baumé. Son

excédent rejoint, par le tube *f*, la vapeur provenant de l'évaporation du sirop de B, et tous deux, après avoir traversé un second vase de sûreté V, vont concentrer le liquide qui s'est rendu de B dans C au moyen du tuyau *t*. Ce liquide est ainsi amené à la densité de 25° Baumé, point auquel on arrête l'opération. La vapeur provenant de C se rend dans un dernier vase de sûreté, où le liquide sucré, entraîné, se rassemble et retourne en C par le tuyau *e''*, tandis que, se trouvant en contact avec un gros tuyau *g*, criblé de trous, par où s'élançe l'eau froide, elle se condense en grande partie; le reste éprouve le même effet par le jet non interrompu amené par le tube *g'*. La vapeur ainsi brusquement condensée produit un vide de 650<sup>mm</sup> durant toute la durée de l'opération dans la chaudière C, vide qui, dans la chaudière B, plus éloignée du condenseur, n'est que de 379<sup>mm</sup> et dans la chaudière A de 108<sup>mm</sup>. Les eaux provenant de la condensation des vapeurs se rendent par les tubes *t*, *cc* et *aa* dans un réservoir commun. Le tuyau E sert à vider les eaux de lavage de l'appareil, lorsque celui-ci a fini de fonctionner. Quant au jus amené à 25° Baumé, on le fait passer, pour le décolorer, sur des filtres contenant du noir ayant servi et entièrement revivifié, et les opérations de fabrication continuent.

**SÉCHAGE, ESSORAGE, MARAIS SALANTS.** — Une quatrième cause a une influence très grande sur la rapidité de l'évaporation, c'est l'étendue du liquide. Plus le liquide présente de surface à l'air, plus sont multipliés les points d'où se dégage la vapeur, plus rapide, en conséquence, est l'évaporation. Toutes les ménagères savent que le linge sèche d'autant plus vite que la température est plus élevée, l'air plus sec, le vent plus fort; mais aussi qu'il faut d'abord que ce linge soit étendu sur des cordes et non pas replié sur lui-même, étalé, afin d'offrir une plus grande surface d'évaporation.

Industriellement, ce principe est appliqué, entre autres choses, à l'*essorage*. On désigne sous ce nom l'opération qui consiste à extraire le plus d'eau possible d'une pièce d'étoffe mouillée, afin de hâter sa dessiccation. On se sert pour cela de divers procédés qui se résument, par le fait, à un *étendage* des pièces, soumises en même temps à un mouvement violent.

L'exploitation du sel est une application en grand de ces principes d'évaporation.

Dès la plus haute antiquité, on récoltait le sel de la même façon qu'aujourd'hui : « Tout sel, dit Pline, provient de l'une de ces deux causes : la condensation ou l'évaporation du liquide. »

Dans les Gaules, dans la Germanie, dans la Cappadoce, on exploitait, comme on le fait encore, des fontaines salées (1).

Les marais salants étaient autrefois bien plus nombreux qu'aujourd'hui. Il y en avait dans la haute Normandie. A l'entrée de la Seine il existait des salines, au XI<sup>e</sup> et au XII<sup>e</sup> siècle, sur tout le plateau renfermé entre le cap de la Hève et la falaise d'Orcher, notamment à l'Heure, à Gravelle, à Harfleur, à Montivilliers. Il y a eu des salines jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle dans les marais du Havre, là où étaient naguère les fossés et les fortifications. Mais l'exploitation la plus importante, dans cette région, a été celle de Bouteilles, près de Dieppe. Il est mentionné des salines de cette localité dès le VII<sup>e</sup> siècle, dans une charte de Chilpéric, donnée à Saint-Lautberg en 672. Il est constant que, jusqu'au XIV<sup>e</sup> siècle, la mer alla jusqu'à Bouteilles, puisque des nefes y remontaient chargées de sel (2).

Voici comment on retire le sel marin des eaux de la mer.

Ces eaux sont soumises à une évaporation spontanée à l'air libre pendant la saison chaude, dans de vastes bassins ou réservoirs creusés sur les bords de la mer, et qu'on nomme *marais salants* (fig. p. 563). En France, les marais, au nombre de 82, occupant une superficie de 24,248 hectares, sont situés : 1 sur les côtes de la Manche, dans le département de l'Ille-et-Vilaine; 36 sur les bords de l'Océan (Charente-Inférieure, Loire-Inférieure, Morbihan, Vendée); et 45 sur les côtes de la Méditerranée (Aude, Bouches-du-Rhône, Corse, Gard, Hérault, Pyrénées-Orientales et Var). Les plus beaux sont à Marennes et au Croisic. L'importance de cette industrie est très grande, puisque 50,000 personnes sont autorisées à l'exploitation de nos seuls marais de l'Ouest, en qualité d'ouvriers, et 20,000 comme propriétaires, fermiers, caboteurs et expéditeurs.

Sur les bords de l'Océan, un marais comprend la *saline* et les *dépendances* ou *accessoires*. On appelle *saline* l'assemblage de toutes les *appartenances* nécessaires pour l'évaporation progressive de l'eau de mer et la cristallisation du sel. Les *dépendances* sont, d'abord, un vaste réservoir d'une seule pièce, d'environ 32 à 64 centimètres de profondeur, nommé *vasière*, et quelquefois un second réservoir, nommé *cobier*, qui est partagé en plusieurs carrés longs, divisés entre eux par de petits sentiers unis, de quelques centimètres d'élévation. Des chaussées, hautes d'environ 1 mètre, et nommées *bossis*, entourent la saline et la séparent de ses dépendances. Ces *bossis* n'ont point une dimension déterminée; seulement les parties les plus larges s'appellent des *trémets*. Des conduits souter-

(1) Voir notre Chimie : *Chlorure de sodium*.

(2) Girardin. *Leçons de chimie*.

rains, nommés *coëfs*, pratiqués dans l'épaisseur des *bossis*, servent à faire communiquer la saline avec le *cobier* et la *vasière*. La saline elle-même se divise en un nombre plus ou moins considérable de compartiments nommés *fares*, semblables à ceux des cobiers, qui occupent habituellement le pourtour de la saline et qui communiquent, par des petites rigoles appelées *délieves*, avec les bassins inférieurs, appelés *œillets*. Ceux-ci ne se distinguent des *fares* que par les *ladures* ou petits plateaux circulaires qui occupent le milieu de leurs cloisons ; ils n'ont que 8 à 10 centimètres de profondeur.

L'eau de mer une fois introduite dans la *vasière*, où elle dépose les matières qu'elle tient en suspension à mesure que la température s'élève, l'opération ne consiste plus qu'à la conduire, en la faisant passer sur le sol échauffé du *cobier* et des *fares*, dans les *œillets*, où doit s'achever son évaporation. La *vasière* est alimentée elle-même par un canal principal et de nombreux *étiers*, qui parcourent en tous sens le marais ; l'exhaussement de son sol ne permet de la remplir ou de la renouveler que pendant les *reverdies*, c'est-à-dire pendant les grandes marées de la nouvelle et de la pleine lune.

Quand le sel est fait, et généralement cette opération demande deux jours, il se trouve divisé en deux parts. A la surface de l'eau est le sel blanc ou *menu*, qui surnage en crème légère ; on se sert, pour le recueillir, d'une espèce de cuiller mi-plate, nommée *lance* ; ce sel est la propriété des ouvriers ou *sauniers*, à qui les *paludiers*, ou maîtres, l'abandonnent pour salaire. Au fond de l'œillet se trouve le gros sel ou *sel gris* ; il est rare que ce dépôt ait beaucoup plus de 2 millimètres et demi d'épaisseur. Un râteau de bois plein, nommé *le las*, sert à le rassembler. Le lendemain, les femmes, courant pieds nus sur les cloisons glissantes de la saline, le transportent, au moyen de *gèdes* posées sur leur tête, sur les trémets, où il est mis en *mulons*. A la fin de la saison, les mulons sont recouverts d'une épaisse couche de terre glaise, qui, bien façonnée au battoir, pourrait le conserver pendant nombre d'années. C'est pendant qu'il est ainsi en mulons que le sel s'égoutte et se dépouille des sels déliquescents ; lorsqu'il est suffisamment sec, on le livre au commerce. C'est le *sel gris*, dont la couleur est due à un peu d'argile provenant des parois du bassin et de la couche de glaise dont on l'a recouvert.

Dans les marais salants du Midi, la disposition générale et la manière même d'opérer sont fort différentes (*fig.* 284). L'eau de mer M, après avoir été introduite dans un vaste bassin peu profond B, s'écoule lentement dans une série de bassins rectangulaires C, plus petits et moins profonds, où elle se concentre et passe de là dans de grands puits P, dits

*puits des eaux vertes*. Des machines hydrauliques prennent cette eau et la déversent dans de nouveaux bassins d'évaporation D, dits *chauffoirs intérieurs*, d'où elle se rend dans un réservoir E, appelé *pièce maîtresse*, et de là dans des puits F, nommés *puits de l'eau en sel*. Déjà l'eau commence à saliner : elle marque 22° à 24° Baumé. Soutirée de nouveau à l'aide de pompes, elle entre dans des bassins G, beaucoup plus petits que les premiers et qui sont désignés sous le nom de *tables salantes*. C'est dans ces derniers compartiments, où la couche liquide n'a pas plus de 5 à 6 centimètres d'épaisseur, que le sel se dépose en masses compactes,

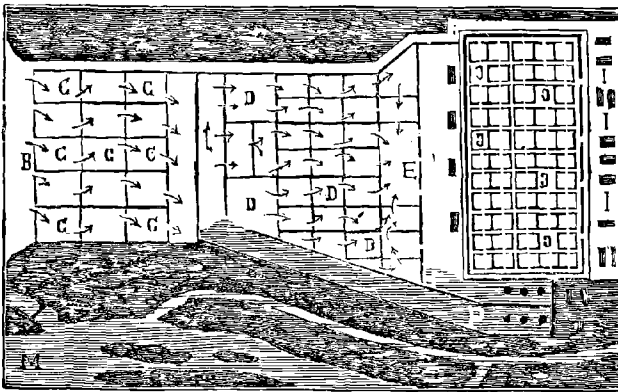


Fig. 284. — MARAIS SALANTS DU MIDI DE LA FRANCE.

formées de cristaux très blancs et très volumineux. L'eau est renouvelée dans ces tables tous les jours ou tous les deux jours. L'opération continue ainsi pendant toute la belle saison, c'est-à-dire d'avril en septembre. Lorsque le dépôt de sel a une épaisseur de 4 à 5 centimètres,

on procède à la récolte ou au *levage* ; pour cela, on met les tables à sec, et, au moyen de pelles, on enlève le sel et on en fait des tas allongés I, connus sous le nom de *camelles*.

**BATIMENTS DE GRADUATION.** — C'est encore par l'évaporation, mais avec des procédés différents, que l'on exploite le sel contenu dans les lacs salés ou dans les sources salées. Les lacs salés ne se rencontrent guère, en Europe, qu'en Russie ou en Hongrie ; mais les sources salées sont très répandues en Allemagne, et, en France, on en connaît 27, dont 13 seulement sont exploitées, notamment celles de la Moselle, de Meurthe-et-Moselle, du Doubs et des Basses-Pyrénées. La plus importante est celle de Moutiers (Savoie).

Quand ces sources sont assez riches en sel marin, on les fait immédiatement évaporer dans de grandes chaudières en fer, carrées, peu profondes et très larges. Lorsqu'elles ne renferment que quelques centièmes de sel, on les soumet d'abord à une évaporation spontanée, en les faisant tomber sur des masses de fagots d'épines, disposés sur une hauteur de 15 mètres et placés sous des hangars ouverts. Voici la forme générale de

ces appareils (*fig. 285*), connus sous le nom de *Bâtiments de graduation*. Les eaux se divisent à l'infini, traversent les fagots en présentant une grande surface à l'évaporation, et se réunissent plus concentrées dans le bassin inférieur, d'où on les dirige une seconde, une troisième fois sur les fagots, jusqu'à ce qu'elles aient acquis une densité de 1,140 ou qu'elles marquent environ 25° au pèse-sel de Baumé. On termine alors leur concentration dans des chaudières de fer carrées, peu profondes et très larges. Pendant les premiers temps de l'ébullition, il se fait un dépôt de *schlot*,

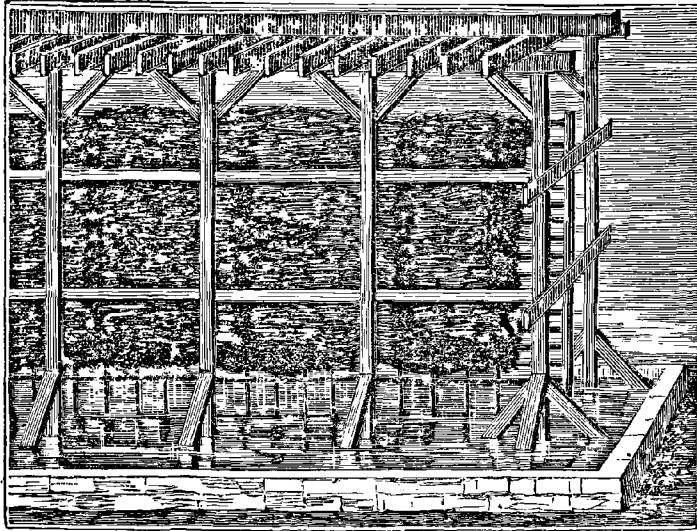


Fig. 285. — BÂTIMENTS DE GRADUATION.

qu'on enlève à mesure et qu'on accumule dans des auges en tôles, appelées *augelots*, qui sont placées au-dessus des chaudières. Au bout de 15 à 20 heures de feu, le *schlotage* est terminé, et le sel marin commence à se déposer. On fait alors passer la liqueur dans d'autres chaudières que l'on chauffe doucement; le *salinage* s'opère, c'est-à-dire que le sel se précipite en petits cristaux confus; on l'enlève au fur et à mesure avec des écumoires; on le met à égoutter dans des *trémies*, puis on le porte au séchoir. On répète cette opération jusqu'à ce que le sel soit à peu près pur.

Quelquefois les fagots d'épines sont remplacés par des cordes tendues verticalement et le long desquelles l'eau coule; d'autres fois, on emploie des tables déclinées superposées sur deux rangs, comme une sorte d'escalier, sur lesquelles on fait passer très lentement l'eau salée.

#### FABRICATION ARTIFICIELLE DE LA GLACE.— MÉLANGES RÉFRIGÉRANTS.

— Nous avons dit ci-dessus quelle est l'importance de la glace et son utilité dans les usages de la vie. Aussi l'industrie a-t-elle cherché à en fabriquer artificiellement, et au moment même où l'on veut l'employer.

Le premier moyen est celui dit des *mélanges réfrigérants*.

L'emploi de ces mélanges remonte déjà très haut dans l'histoire de la science (1). Le *nitre* fut d'abord le sel qu'on mit en usage pour cet objet, et ce furent les Italiens qui s'en servirent les premiers, puisque, vers 1550, on rafraîchissait déjà, par son moyen, l'eau et le vin, dans les riches maisons de Rome. Bacon a écrit qu'on pouvait geler l'eau avec un mélange de neige et de sel marin. Vers la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, R. Boyle fit connaître beaucoup d'autres substances susceptibles d'être employées à produire des abaissements de température. C'est vers 1650 ou 1660 qu'on fit l'application des mélanges frigorifiques à la confection des glaces et sorbets. Cet art ingénieux fut apporté à Paris vers cette époque par Procope Cotelli, noble de Palerme, pauvre cadet d'une riche famille sicilienne, et ces préparations rafraîchissantes obtinrent tant de vogue qu'en 1676 on comptait déjà, à Paris, 250 boutiques dans lesquelles on vendait des boissons glacées de toutes sortes.

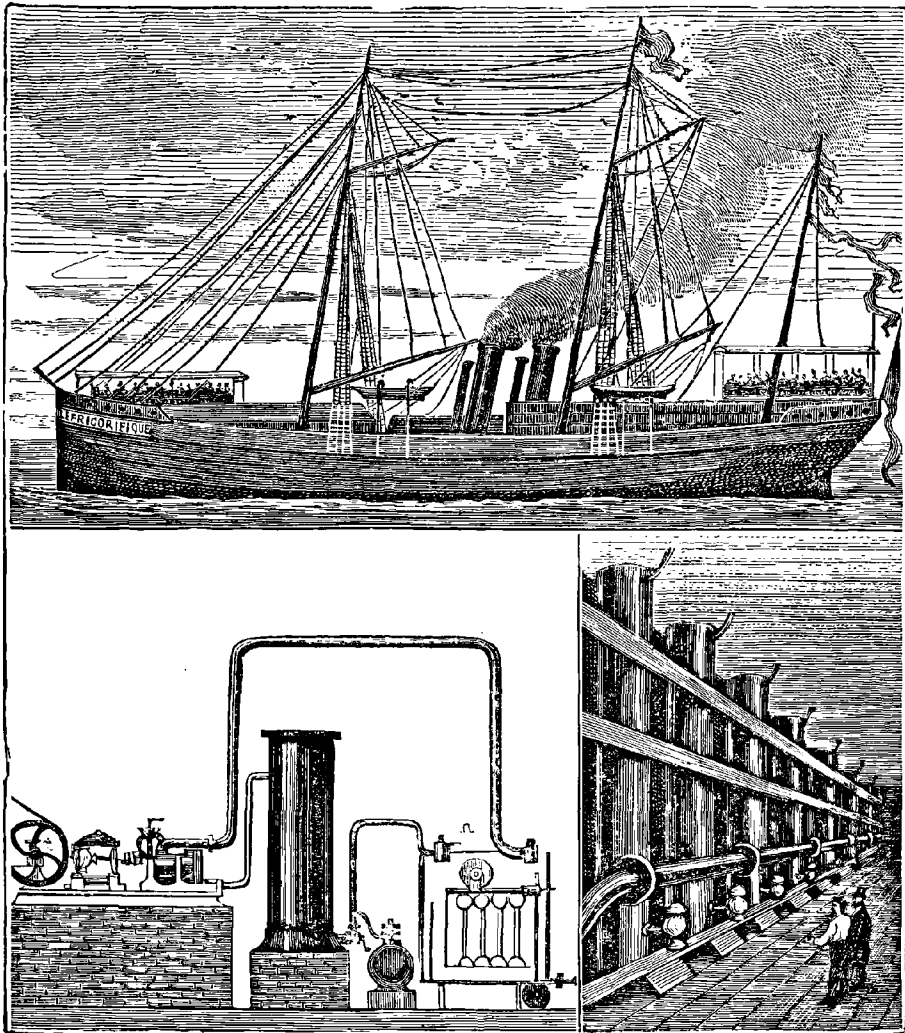
Walker qui, le 20 avril 1787, réussit à congeler le mercure, fut le premier chimiste qui parvint à faire de la glace au milieu de l'été, en se servant uniquement de simples solutions de sel.

Certains sels, en effet, en se dissolvant dans l'eau, peuvent quelquefois s'y *combinaison* en même temps; dans ce cas, comme dans toutes les combinaisons chimiques, il y a production de chaleur. Lorsqu'il n'y a pas *combinaison*, mais simple *dissolution*, il y a au contraire production de froid : ce dernier effet est le résultat du changement d'état du sel, qui de solide devient liquide; ce qu'il ne peut faire sans absorber de la chaleur et nécessairement produire du froid, puisqu'il faut qu'il prenne cette chaleur aux corps avec lesquels il se trouve en contact. Lorsque le sel se combine en se dissolvant, il produit de la chaleur; cette chaleur est sensible lorsqu'elle est supérieure à l'abaissement de la température résultant de la liquéfaction; mais, si elle est inférieure, il y a, au contraire, production de froid d'autant plus sensible que la différence est plus grande. Enfin un même sel peut produire ou du froid ou de la chaleur, selon l'état dans lequel il se trouve quand on le dissout. Ainsi le chlorure de calcium est un des sels qui se combinent avec l'eau en s'y dissolvant; si on le dissout quand il est *anhydre* (du grec, *a*, privatif; et *udôr*, eau), il y a production de chaleur, par suite de la combinaison qui s'effectue; mais si le sel

(1) Girardin. *Leçons de chimie*.



est cristallisé, état dans lequel il est déjà combiné avec l'eau, il y a, au contraire, production de froid, parce qu'alors il y a simplement dissolution. Cette propriété des sels est souvent employée pour pro-



*Le Frigorifique (page 582).*

duire des froids artificiels, soit en les dissolvant seulement dans l'eau, soit en remplaçant l'eau par de la neige ou de la glace pilée, soit enfin par des mélanges de certains sels et d'acides. Ces divers mélanges frigorifiques donnent naissance à des abaissements de température qui

différent beaucoup, et que l'on choisit et combine pour arriver à des froids quelquefois très considérables.

*Tableau de mélanges réfrigérants.*

MÉLANGES.	TEMPÉRATURE du mélange.	DEGRÉ obtenu.	DIFFÉRENC.	MÉLANGES.	TEMPÉRATURE du mélange.	DEGRÉ obtenu.	DIFFÉRENC.
1 Nitrate d'ammoniaque ..	+10°	-15°, 55	25°, 55	9 Phosphate de soude ..	+10°	- 6°, 11	16°, 11
1 Eau .....				6 Nitrate d'ammoniaque ..			
1 Nitrate d'ammoniaque ..	+10°	-13°, 88	23°, 88	4 Acide nitrique étendu d'eau .....	+10°	-16°, 11	26°, 10
1 Carbonate de soude .....				3 Sulfate de Soude .....			
1 Eau .....	+10°	-12°, 22	22°, 22	2 Acide nitrique étendu d'eau .....	+10°	-17°, 77	27°, 77
5 Chlorhydrate d'ammoniaque .....				8 Sulfate de soude .....			
5 Nitrate de potasse .....	+10°	-15°, 55	25°, 55	5 Acide chlorhydrique .....	+10°	-10°	20°
16 Eau .....				6 Sulfate de soude .....			
5 Chlorhydrate d'ammoniaque .....	0°	-17°, 77	17°, 77	5 Nitrate d'ammoniaque ..	+10°	-12°, 22	22°, 22
5 Nitrate de potasse .....				4 Chlorhydrate d'ammoniaque .....			
8 Sulfate de soude .....	0°	-27°, 77	27°, 77	2 Nitrate de potasse .....	- 6°, 66	-51°	44°, 33
16 Eau .....				4 Acide nitrique étendu d'eau .....			
1 Chlorure de sodium .....	-27°, 77	-54°, 44	36°, 66	1 Acide sulfurique étendu d'eau .....	-17°, 77	-45°, 33	27°, 56
1 Neige .....				1 Neige .....			
3 Chlorure de calcium cristallisé .....	-27°, 77	-31°, 66	3°, 89	1 Acide nitrique étendu d'eau .....	-23°, 33	-48°, 88	25°, 55
2 Neige .....				2 Neige .....			
2 Chlorure de calcium cristallisé .....	-40°	-58°, 33	18°, 33	6 Acide sulfurique étendu d'eau .....	-55°, 55	-68°, 33	12°, 78
1 Neige .....				10 Acide sulfurique étendu d'eau .....			
5 Chlorure de sodium .....	+10°	-11°, 11	21°, 11	8 Neige .....			
5 Nitrate d'ammoniaque ..							
12 Neige .....							
3 Chlorure de calcium cristallisé .....							
1 Neige .....							
9 Phosphate de soude .....							
4 Acide nitrique étendu d'eau .....							

Ces mélanges sont très employés dans les laboratoires, et quelquefois industriellement pour obtenir de la glace dans certains cas de maladie, pour refroidir les boissons, pour atteindre le froid nécessaire à la conservation des viandes, etc. On a construit, pour cet usage, différents modèles d'appareils dont les plus connus sont (*fig. 286*) la *glacière Goubaud G*, la *glacière des familles F*, la *glacière à bascule B*, la *sorbetière S*. Un regard jeté sur la figure permet de comprendre les détails de l'opération. Dans le récipient, rempli d'un mélange réfrigérant, on place la carafe ou le vase contenant l'eau à *frapper à la glace*. On active la dissolution soit par un mouvement de bascule, soit par un mouvement de rotation

imprimé au liquide réfrigérant à l'aide d'une manivelle, soit par des palettes en hélice, et en quelques minutes l'effet est produit.

Le mélange le plus ordinairement employé est du sulfate de soude et de l'acide chlorhydrique, dans les proportions indiquées au tableau ci-dessus, mélange qui donne une différence de température de  $27^{\circ} 77$ ; mais ce mélange présente quelques inconvénients : le maniement de l'acide chlorhydrique occasionne de brûler les vêtements sur lesquels il tombe ; il altère profondément la pierre et le marbre ; ses vapeurs détériorent les objets de fer ou d'acier ; de plus, le mélange ne peut servir qu'une fois et n'est plus bon à rien. Aussi on le remplace souvent par du nitrate d'ammoniaque contenant une petite proportion de chlorhydrate d'ammoniaque et d'eau. Ce mélange

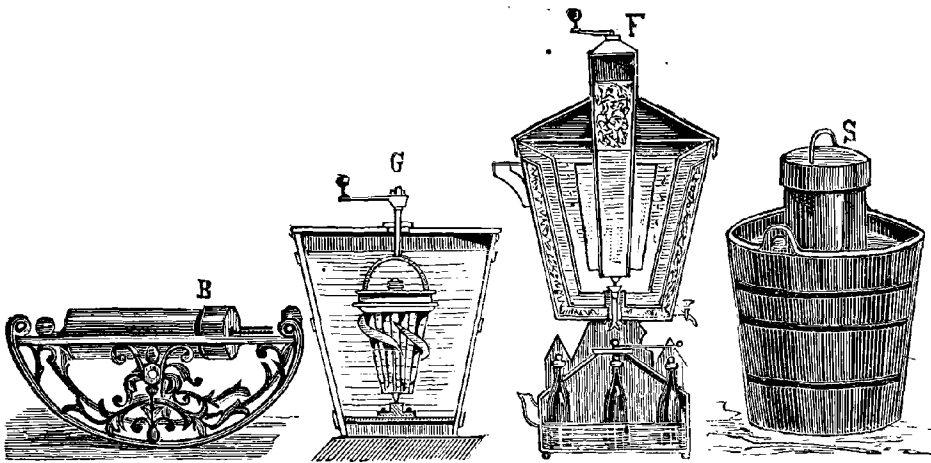


Fig. 283. — GLACIÈRES DOMESTIQUES.

donne une température de 2 degrés de moins que l'autre ; mais il ne présente aucun danger, et le résidu peut être évaporé et servir presque indéfiniment.

**APPAREILS CARRÉ.** — La fabrication de la glace par l'appareil de M. Carré est basée non plus sur le froid produit par une *dissolution*, mais sur le froid produit par l'*évaporation*.

L'appareil (*fig. 287*) se compose d'un cylindre A en fer forgé, renfermant dans son intérieur une série de plateaux superposés, percés à leurs centres et rebords, déversant leur trop-plein l'un dans l'autre. Cette disposition a pour but d'augmenter la surface de chauffe. Ce cylindre communique par deux tubes l'un NE droit, l'autre en siphon DPE, avec un vase tronconique C, plein d'eau et où se trouve ménagée une cavité centrale propre à recevoir le vase cylindrique *lkm*. Le cylindre A renferme une dissolution ammoniacale saturée, qui,

comme on sait, renferme 6 à 700 fois son volume de gaz. L'appareil, clos de toutes parts, est muni d'un thermomètre qui, sans communiquer avec l'intérieur du cylindre A, indique sa température. On chauffe ce cylindre A; quand le thermomètre indique  $130^{\circ}$ , on remplace le fourneau par une cuve d'eau; le gaz ammoniac s'échappe alors; il passe dans le récipient tronconique, après avoir cheminé à travers les tubes de communication. Mais, arrivé dans le récipient, il ne trouve aucune issue; cependant la chaleur dégage continuellement de l'eau; de nouvelles quantités de gaz ammoniac s'accumulent ainsi et ne tardent pas à être soumises à une pression considérable; le gaz se liquéfie et se condense sur de petits

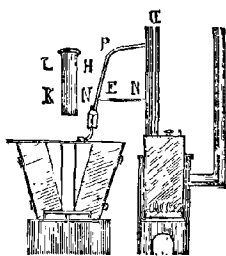


Fig. 287.

## GLACIÈRE CARRÉ.

godets, placés à ce dessein. Cette première partie de l'opération pour les petits appareils destinés à l'économie domestique dure environ trois quarts d'heure. Alors, dans la cavité ménagée dans le cylindre tronconique C, on place le cylindre *l h k m* plein d'eau froide à congeler; on entoure le réfrigérant d'une enveloppe en feutre, très peu conductrice de la chaleur, et on place la chaudière dans l'eau. Celle-ci, grâce au refroidissement, devient apte de nouveau à dissoudre le gaz qui revient dans la chaudière par le tube en siphon DPE. L'évaporation qui se produit alors dans le congélateur est entièrement active, l'abaissement de la température est considérable, et l'eau se congèle.

Cet appareil ne fournit, en raison de ses modestes dimensions, que des quantités très limitées de glace. M. Carré (Edmond), frère de l'inventeur de la glacière, a imaginé un autre appareil, construit sur une échelle beaucoup plus vaste, et qui a résolu complètement le problème si important de la production du froid. Il nous suffira d'indiquer le mécanisme de l'appareil pour que le procédé de fabrication soit compris (*fig.* 288).

C'est une grande chaudière C où chauffe la dissolution ammoniacale. Le gaz qui s'en échappe va dans un récipient R, où il se liquéfie par le refroidissement produit par un jet d'eau froide coulant constamment d'un réservoir A. Le gaz liquéfié va ensuite remplir les parois creuses d'un réfrigérant B, où se trouvent les vases pleins du liquide à congeler. L'eau de la chaudière C, dépouillée du gaz en dissolution et refroidie, pénètre alors dans un vase V, qui est lui-même en communication avec D et avec le réfrigérant B. Le liquide ammoniacal reprend l'état gazeux pour se dissoudre à nouveau dans l'eau du vase V, et c'est par le fait du refroidissement causé par cette évaporation que l'eau se congèle dans des vases placés au sein du réfrigérant. Enfin l'eau régénérée est, à l'aide d'une pompe

P, refoulée dans la chaudière, de sorte que la fabrication de la glace se fait d'une façon, pour ainsi dire, continue.

**CONSERVATION DES SUBSTANCES ALIMENTAIRES.** — La question de la conservation de la viande, au moyen d'appareils frigorifiques, est tellement importante que nous devons citer le procédé de conservation des substances alimentaires dû à M. Tellier, et sur lequel une commission

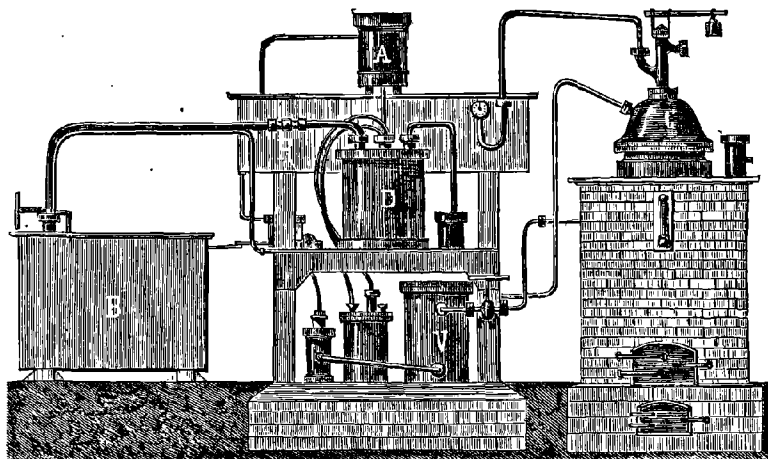


Fig. 238.

APPAREIL CARRÉ POUR LA FABRICATION INDUSTRIELLE DE LA GLACE.

de l'Académie des sciences a fait un rapport très favorable. Il serait véritablement philanthropique que l'on trouvât le moyen d'utiliser ces masses de viande qui se perdent dans l'Amérique du Sud, alors que le prix du kilogramme est si élevé en Europe !

L'agent dont se sert M. Tellier, pour produire le froid par évaporation, est l'*éther méthylique* ou *oxyde de méthyle* (1). Ce composé est gazeux à la température et sous la pression normales, incolore, d'une odeur éthérée agréable. Un froid de 21° le liquéfie, ainsi qu'une pression de huit atmosphères.

Si donc, après avoir liquéfié ce gaz, on supprime la pression, ou si on élève la température, il reprend sa forme première en produisant un froid assez considérable sur les corps environnants. A bord des vaisseaux destinés au transport des viandes d'Amérique, le liquide volatil, comprimé dans un réservoir en fer, pénètre, quand on ouvre ce réservoir, dans un cylindre en tôle, dit *frigorifère*, traversé par un grand nombre

(1) Voir notre CHIMIE (*Esprit de bois*).

de tubes en cuivre donnant passage à une solution de *chlorure de calcium*, qui va refroidir l'air d'une chambre dite *de froid*. Cet air est amené du dehors dans le *frigorifère* par un jeu de ventilateurs puissants; au contact du tube, il descend à 0° et abandonne son humidité sous forme de givre, entraînant les poussières et les germes qui peuvent s'y rencontrer. Il est ensuite chassé jusque sous le parquet de la *chambre à viande*, qui est percé de trous nombreux pour lui donner passage. Le courant d'air à 0° monte verticalement, lèche uniformément la surface des viandes, et sort par le plafond où il est repris par la ventilation. Les vapeurs d'éther, qui ont circulé dans le *frigorifère*, se rendent dans un réservoir où elles sont soumises à une pression de huit atmosphères, qui les ramène à l'état liquide, de sorte que celui-ci sert indéfiniment et sans perte notable. L'action des ventilateurs, les mouvements de l'éther et de la solution saline dans les tubes sont provoqués et réglés par un volant et par des pompes qu'anime une machine à vapeur dont la marche ne s'arrête jamais.

Dans le navire, nommé *le Frigorifique*, que M. Ch. Tellier a expédié en 1876 à Buenos-Ayres, pour y prendre un chargement de 6 à 700 bœufs dépecés, les dispositions précédentes ont été adoptées (*fig.* page 577). La *chambre de froid* et la *chambre de la viande* sont isolées complètement du reste du navire, et forment des milieux clos, grâce à un système de fermetures hermétiques. Or, parti en août 1876, *le Frigorifique* est revenu en France, en juillet 1877, porteur de viandes en état parfait de conservation.

**PRODUCTION INDUSTRIELLE DE LA GLACE.** — En 1876, M. Raoul Pictet eut l'idée d'utiliser l'acide sulfureux liquide et anhydre pour la production industrielle de la glace. Il se procure d'abord cet acide dans sa fabrique, située à Margencel (Savoie), en faisant réagir, à une température de 400°, la vapeur du soufre sur l'acide sulfurique, et il ne lui revient, ainsi produit, qu'à 5 francs le kilogramme. L'appareil dont il se sert ensuite pour produire le froid se compose essentiellement d'un cylindre en cuivre dans lequel on place l'acide liquide, et que l'on maintient dans une grande cuve remplie d'une solution de chlorure de magnésium. C'est dans ce bain que se placent les vases contenant l'eau à congeler. La seule dépense exigée est la force nécessaire pour amener la volatilisation de l'acide anhydre, c'est-à-dire peu de chose; ainsi un appareil produisant 1,000 kilogrammes de glace à l'heure dépense 1 kilogramme de charbon par 22 kilogrammes de glace obtenue: celle-ci revient, dans ces conditions, à moins de 1 centime le kilogramme.

## CHAPITRE VIII

## CHANGEMENT DANS L'ÉTAT DES CORPS

3<sup>e</sup> ÉBULLITION

**DÉFINITION.** — Nous avons longuement insisté (pages 451 et 190) sur le phénomène de la *convection* et sur ses applications. L'*ébullition* est une des conséquences de ce phénomène. Chauffons un liquide dans un vase ouvert tel qu'un ballon de verre ; plaçons-y un thermomètre : la température s'élève graduellement, des courants ascendants et descendants répartissent la chaleur ; il se forme, à la surface, de la vapeur qui vient se condenser au col du ballon en léger brouillard. Puis de petites bulles gazeuses naissent au sein de l'eau et montent lentement jusqu'à la surface : ce sont des bulles d'air dissous. Un peu de temps après, des bulles plus grosses apparaissent au fond du vase ; elles montent en diminuant de volume et disparaissent sans atteindre la surface ; on entend alors un bruit qu'on appelle le *chant du liquide*. Chaque bulle est constituée en effet par de la vapeur d'eau, et cette vapeur se développe autour d'une petite bulle d'air, quand sa température est de 100° environ. Comme le ballon est chauffé par le fond, les parties inférieures du liquide atteignent cette température avant les parties supérieures, et la vapeur formée rencontre, en montant, de l'eau moins chaude qu'elle ; elle se refroidit en cédant de la chaleur à cette eau et se condense brusquement ; un petit vide existe un instant à sa place et l'eau environnante s'y précipite avec choc : de là une trépidation et un bruit. Enfin les bulles de vapeur atteignent la surface ; le thermomètre marque 100° ; le liquide entre en *ébullition*. On peut voir alors les bulles grossir à mesure qu'elles s'élèvent et venir crever dans l'air en soulevant une mince pellicule d'eau de forme hémisphérique.

C'est en ces termes que l'on peut décrire le phénomène de l'*ébullition* que nous définissons ci-dessus : « nom que prend l'*évaporation* quand la vapeur se dégage rapidement en bulles tumultueuses, qui,

prenant naissance dans la masse du liquide, viennent éclater à sa surface. »

**LOIS DE L'ÉBULLITION.** — L'ébullition des liquides est soumise à trois lois :

1° *Le même liquide, placé dans les mêmes conditions, entre toujours en ébullition à la même température.*

Cette première loi est analogue à la loi de la fusion (page 530) et se démontre expérimentalement de la même manière. Il en résulte que la température de l'ébullition est un coefficient *spécifique*, propre à chaque liquide, et qui sert à le déterminer.

Voici, en effet, un tableau du point d'ébullition de quelques liquides sous une pression voisine de la pression atmosphérique normale de 0,760.

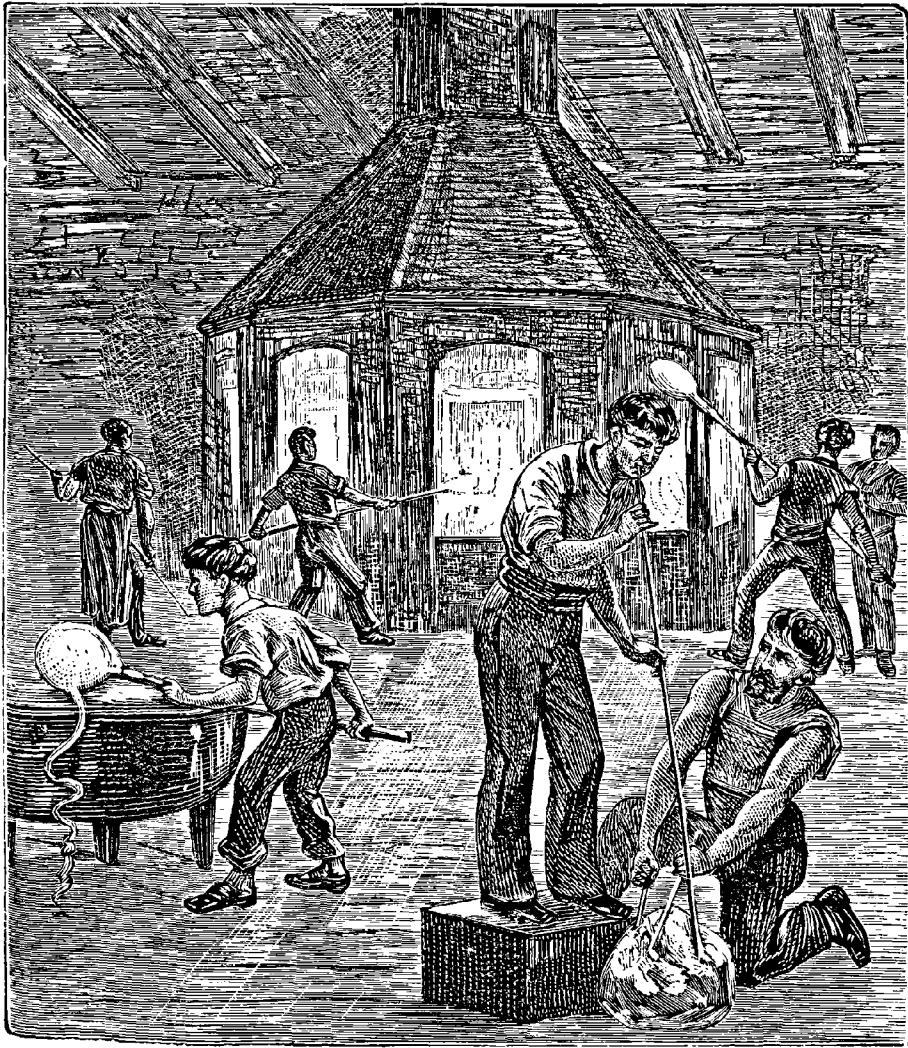
NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE d'ébullition.	NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE d'ébullition.
Acide acétique concentré.....	120°	Eau distillée.....	100°
— azotique anhydre.....	50	Eau de mer.....	103,7
— carbonique.....	— 78	Essence d'amandes amères.....	176
— chlorhydrique.....	110	Essence de térébenthine.....	161
— chlorique.....	137,5	Ether sulfurique.....	35,5
— cyanhydrique.....	26,2	— acétique.....	74,1
— fluorhydrique.....	30	— chlorhydrique.....	11
— formique.....	105,3	— oxalique.....	183
— hypoazotique.....	25	Huile de lin.....	387,5
— sulfureux.....	8	Huile de ricin.....	265
— sulfurique anhydre.....	32	Iode.....	176
Alcool absolu.....	78,3	Liqueur des Hollandais.....	84,9
— amylique (huile de pommes de terre).....	131,8	Mercure.....	353
— méthylique (esprit de bois).....	63	Paraffine.....	370
Ammoniaque anhydre.....	— 35	Pétrole.....	106
Azote (protoxyde).....	— 88	Phosphore.....	290
Benzine.....	80,8	Phosphore.....	700
Brome.....	63	Potassium.....	700
Camphre de Bornéo.....	215	Selenium.....	700
Chlorure d'arsenic.....	132	Sodium.....	440
Gréosote.....	203	Soufre.....	47,9
		Sulfure de carbone.....	16
		Térébène.....	1000
		Zinc.....	

2° *La température d'un liquide en ébullition reste constante, quelle que soit l'intensité de la source de chaleur qui la produit.*

La démonstration expérimentale de cette loi se fait en laissant un thermomètre plongé dans un liquide en ébullition. Quoiqu'on augmente l'intensité du foyer qui a servi à élever le liquide à l'ébullition, le mercure du thermomètre restera au même point. On peut déduire de cette



observation la conclusion que nous avons tirée de celle du froid produit par l'évaporation, c'est-à-dire que la chaleur produite est employée tout entière à effectuer le travail nécessaire pour transformer le liquide en



Les verriers utilisent cet effet; ils plongent dans l'eau la masse de verre incandescente... (page 594).

vapeur. L'eau ne pouvant s'échauffer, dans un vase ouvert, à plus de 100°, on peut donc toujours placer sur un foyer des vases de fer-blanc ou d'étain, sans craindre qu'ils se fondent, du moment qu'ils contiennent de l'eau. En effet, le métal étant bon conducteur de la chaleur,

l'équilibre s'établit entre lui et l'eau, qui ne peut dépasser une température de  $100^{\circ}$ .

Une expérience curieuse, et qui ne manque jamais d'étonner ceux qui en sont spectateurs, peut être faite en vertu de ce principe :

On chauffe une capsule en métal dans un feu très ardent, et on la porte au rouge ; à ce moment, on y verse un liquide dont le point d'ébullition est très peu élevé, de l'acide sulfureux liquéfié, par exemple, qui bout à  $10^{\circ}$  au-dessous de zéro.

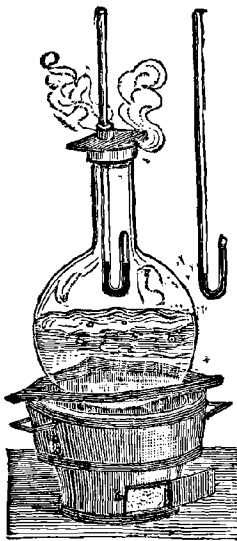


Fig. 289.

TROISIÈME LOI  
DE L'ÉBULLITION.

Ce liquide se vaporise rapidement, mais il conserve la température de son point d'ébullition —  $10^{\circ}$ , puisque les vapeurs produites entraînent toute la chaleur du vase. Que l'on verse alors un peu d'eau sur l'acide sulfureux, cette eau, pénétrant dans un liquide à  $-10^{\circ}$ , se congèlera instantanément.

3<sup>e</sup> *Pendant l'ébullition, la force élastique de la vapeur émise par le liquide est égale à la pression extérieure.*

Pour démontrer cette loi importante, on se sert (fig. 289) d'un tube recourbé dont la petite branche est fermée et la grande ouverte. On porte alors ce tube dans un ballon de verre, contenant de l'eau en ébullition. L'eau du tube se change bientôt en vapeur, le mercure descend dans la petite branche et remonte dans la grande branche jusqu'à ce que le niveau soit le même dans l'une et l'autre.

La pression exercée par la vapeur du tube sur le mercure équilibre donc très exactement la pression atmosphérique.

#### CIRCONSTANCES QUI INFLUENT SUR LE POINT D'ÉBULLITION. —

1<sup>o</sup> **PRESSION EXTÉRIEURE.** — Comme conséquence immédiate de cette dernière loi, on comprend que, de toutes les causes qui peuvent faire varier le point d'ébullition d'un liquide, celle qui a le plus d'influence est la pression exercée sur lui. Ainsi, dans le vide, l'eau bout à  $0^{\circ}$  ; elle bout à  $100^{\circ}$  sous la pression atmosphérique normale de  $0^{\text{m}},760$ , c'est-à-dire au niveau de la mer ; et, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, et qu'en conséquence la pression diminue, elle bout à des températures plus faibles, et d'autant plus inférieures à  $100^{\circ}$  que la hauteur du lieu est plus considérable.

Cela ressort du tableau suivant, dans lequel est indiquée la température de l'ébullition de l'eau à différentes altitudes.

NOM DES STATIONS.	ALTITUDE.	TEMPÉRATURE de l'ébullition.	NOM DES STATIONS.	ALTITUDE.	TEMPÉRATURE de l'ébullition.
Niveau de la mer.....	0 mètr.	100°	Plombières.....	421 mètr.	98,5
Berlin.....	40 —	99,8	Madrid.....	608 —	97,9
Rome.....	46 —	99,8	Bains du Mont Dore.....	1,040 —	96,5
Observatoire de Paris (1 <sup>er</sup> étage).	65 —	99,7	Barèges.....	1,269 —	95,6
Dresde.....	90 —	99,6	Gavarrie.....	1,444 —	95
Vienne.....	133 —	99,5	Hospice du Saint-Gothard.....	2,075 —	92,9
Lyon.....	162 —	99,4	Mexico.....	2,270 —	92,3
Prague.....	179 —	99,3	Santa-Fé de-Bogota.....	2,861 —	90,9
Turin.....	230 —	99,1	Quito.....	2,908 —	90,1
Moscou.....	300 —	99	Métairie d'Antisana.....	4,101 —	86,3

L'eau bouillante n'est donc pas également chaude dans tous les lieux de la terre et n'est pas, en conséquence, aussi propre à la cuisson de divers aliments.

Le mot d'*eau bouillante* ne correspond dans notre esprit à une sensation déterminée de chaleur, que parce qu'on n'a l'occasion d'observer l'ébullition qu'à des pressions qui diffèrent peu de la pression moyenne. Cependant, pour les observations exactes, il faut se préoccuper de ces différences de pression. Ainsi, pour la détermination du point 100 du thermomètre (page 418), nous avons fait remarquer qu'un manomètre M indiquait la pression extérieure et que l'on tenait compte de ses indications.

**EXPÉRIENCES DE FRANKLIN, DE DULONG. — APPLICATION INDUSTRIELLE.** — Franklin a mis en évidence l'ébullition de l'eau à une température inférieure à 100°, lorsque diminue la pression, par l'expérience suivante (*fig.* 290) :

Il faisait bouillir de l'eau dans un ballon à long col; l'air en est bientôt chassé en grande partie par la vapeur. Alors il retournait brusquement le ballon pour le plonger dans un vase plein d'eau, ce qui forme une fermeture hermétique et empêche l'air de rentrer. Versant alors un liquide volatil, de l'éther ou de l'alcool, sur le ballon, le refroidissement du liquide bouillant, produit par le contact de ce liquide froid et par son évaporation, condense la vapeur dans le voisinage de la paroi; un vide se forme, la vapeur se refroidit également, sa force élastique diminue;

aussitôt l'eau du ballon, bien qu'elle soit retombée bien au-dessous de  $100^{\circ}$ , recommence à bouillir, parce qu'elle supporte une moindre pression.

Dulong démontrait l'influence de la pression extérieure sur le point d'ébullition au moyen de l'appareil suivant (*fig. 291*), perfectionné par Despretz. Dans une cornue tubulée C, il faisait bouillir de l'eau; un thermomètre T plonge dans cette eau et indique sa température. La vapeur produite va dans un serpentín S entouré d'eau à une température connue. Ce serpentín se termine par un réservoir R dans lequel le liquide condensé s'accumule, et d'où il peut être recueilli à l'aide du robinet du réservoir. Le réservoir communique, par un tube A, avec un récipient dans lequel se trouve de l'air comprimé ou raréfié. Or, plus cet air est comprimé, plus, en conséquence, la pression augmente, plus le point d'ébullition s'élève, et, réciproquement, plus cet air est raréfié, plus le point d'ébullition s'abaisse.

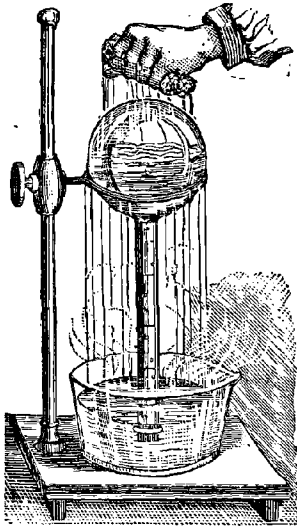


Fig. 290.

EXPÉRIENCE DE FRANKLIN.

(page 569). Les sirops s'évaporent, à cause du vide produit dans l'appareil, à une température bien plus basse que celle qui serait nécessaire en opérant à l'air libre. De là une grande économie de combustible; mais il y a aussi un autre avantage. La chaleur est cause qu'une portion de sirop perd sa propriété de cristalliser, et, par conséquent, reste comme résidu parmi les mélasses. Or, plus la température est élevée, plus considérable est la quantité de sucre incristallisable. En obtenant l'ébullition des sirops à une température bien inférieure à  $100^{\circ}$ , on diminue donc la perte d'une façon très notable.

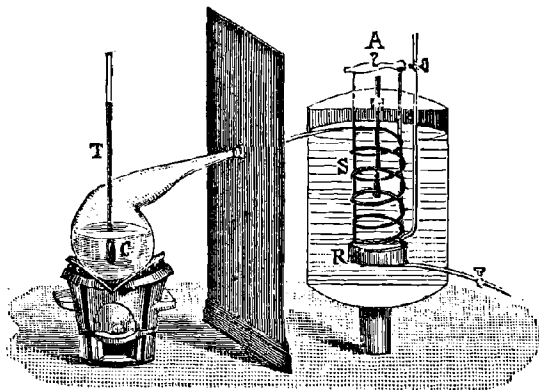


Fig. 291. — EXPÉRIENCE DE DULONG.

**HYPSOMÈTRE.** — Évidemment, puisque la pression extérieure permet de connaître exactement la température d'ébullition de l'eau, réciproquement la température d'ébullition peut donner exactement la pression atmosphérique. Wollaston avait donc proposé de remplacer le baromètre, instrument souvent peu transportable, par l'observation de la température de l'ébullition de l'eau, et il avait construit, sur ce principe, un *thermomètre barométrique*. M. Regnault, reprenant cette idée, a imaginé l'*hypsomètre* (du grec *hypsos*, hauteur; *metron*, mesure). C'est une petite chaudière (*fig. 292*), contenant de l'eau, que porte à l'ébullition une lampe à alcool, et surmontée d'un tube dont les différentes parties peuvent rentrer les unes dans les autres, comme celles d'une lorgnette. Un thermomètre plongé dans la vapeur, et dont l'extrémité sort à peine de la partie supérieure du tube, donne la température de l'ébullition. On en déduit la pression atmosphérique, et, conséquemment, la hauteur du lieu où l'on fait l'expérience (page 276).

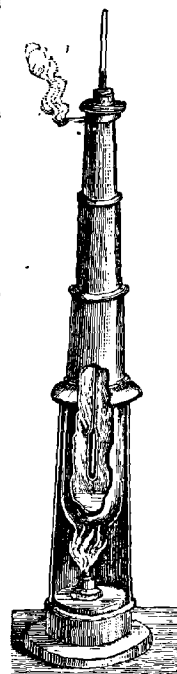


Fig. 292.  
HYPSOMÈTRE.

**CIRCONSTANCES QUI INFLUENT SUR LE POINT D'ÉBULLITION. 2° SUBSTANCES EN DISSOLUTION DANS LE LIQUIDE.**

— Tout le monde a remarqué que le bouillon gras bouillant, par exemple, brûle plus fortement que l'eau bouillante. C'est qu'en effet les matières en dissolution dans un liquide élèvent généralement sa température d'ébullition, à moins que ces matières ne soient plus volatiles elles-mêmes que le liquide bouillant. Ainsi, voici les points d'ébullition de l'eau saturée par différents sels :

Chlorure de sodium ( <i>sel marin</i> )...	108°,4	Carbonate de potasse.....	133°,0
Azoture d'hydrogène ( <i>ammoniaque</i> )...	114°,2	Nitrate de chaux.....	151°,0
Nitrate de potasse ( <i>salpêtre</i> ).....	115°,9	Acétate de potasse ( <i>terre foliée</i> )...	169°,0
Nitrate de soude ( <i>salpêtre du Pérou</i> ).....	121°,0	Chlorure de calcium.....	179°,5
		Nitrate d'ammoniaque.....	180°,0

Le terme de l'ébullition se trouve retardé en raison de l'affinité plus ou moins grande des corps dissous par le liquide dissolvant. Lorsque l'eau bouillante est saturée de certains sels, c'est-à-dire lorsqu'elle tient en dissolution tout ce qu'elle en peut prendre, la température se trouve élevée. Cela a une application immédiate. On emploie des dissolutions salines dans les laboratoires pour faire des *bains-marie*, qui servent à éva-

porer des liqueurs contenant des substances qui pourraient être altérées, et même détruites, si on les chauffait à feu nu, et qui, cependant, exigent une température plus haute que celle des bains-marie à l'eau seule.

Lorsque la dissolution n'est pas saturée, le point d'ébullition n'est pas constant : il s'élève, et d'autant plus que la proportion du sel est plus considérable ; mais il arrive un moment où le sel commence à se déposer, et la température, invariable alors, est celle qu'il faut prendre pour la température d'ébullition de la solution saturée. Cela est d'autant plus important qu'il se produit quelquefois un phénomène analogue à la *surfusion* (page 538) : la température s'élève graduellement, sans que le

solide *dépôt*, puis, à un certain moment, un dépôt commence à se produire brusquement, et le thermomètre descend de plusieurs degrés.

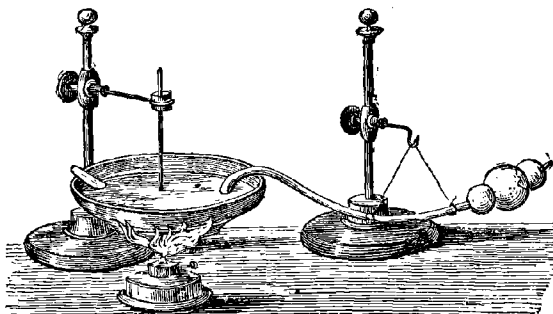


Fig. 293. — EXPÉRIENCE DE M. DONNY.

reste la même que dans le cas de l'eau pure. En effet, la vapeur qui se dégage, on le comprend, du reste, n'est que de la vapeur d'eau pure.

Remarquons toutefois que, quelle que soit la température de la dissolution, celle de la vapeur ne dépend que de la pression et

3° NÉCESSITÉ DE LA PRÉSENCE D'UN GAZ DANS LE PHÉNOMÈNE DE L'ÉBULLITION. — Un professeur du lycée Louis-le-Grand, M. Gernez, physicien distingué, a démontré qu'une atmosphère gazeuse est absolument nécessaire pour produire et entretenir le phénomène de l'ébullition. Un mélange d'huile de lin et d'essence de girofle a la même densité que l'eau ; on introduit des globules d'eau au sein de ce mélange, et on élève la température. Le mélange peut ainsi atteindre 170°, sans qu'aucune ébullition se manifeste, c'est-à-dire une température où la force élastique de la vapeur d'eau est de huit atmosphères. L'ébullition est déterminée instantanément par le contact d'un corps solide ; mais un semblable corps est toujours recouvert d'une gaine d'air (page 235), en vertu de la capillarité, et, dans cette couche d'air, l'évaporation devient possible. M. Gernez a remarqué que des fils de platine, placés au sein de l'acide sulfurique bouillant, étaient incapables de servir de siège au dégagement des bulles, quand, après avoir été portés au rouge, ils avaient été refroidis hors du contact de l'air, c'est-à-dire quand ils avaient été dépouillés de toute gaine

gazeuse. Or, c'est de ces fils que toutes les bulles de vapeur d'acide sulfurique se dégagent quand ceux-là n'ont subi aucune action préalable.

Beaucoup d'autres expériences prouvent que l'ébullition est due à la présence de bulles d'air ou d'autres gaz. Citons celle de M. Donny :

Dans un tube de verre recourbé (*fig.* 293), on fait bouillir de l'eau, afin de chasser tout l'air dissous dans l'eau et restant dans le tube ; puis, quand la vapeur et l'eau remplissent seules l'appareil, on ferme le tube à la lampe. L'appareil étant refroidi, on place une de ses extrémités dans un vase plein d'huile, que l'on chauffe avec une lampe à alcool. L'eau contenue dans le tube peut alors, sans entrer en ébullition, être portée à 130°, comme on le constate en plongeant un thermomètre dans l'huile, et cependant elle supporte une pression très légère. Mais, vers 130°, l'eau est projetée en masse à l'autre partie du tube, dans les boules ajoutées en vue de cette projection.

**4° INFLUENCE DE LA NATURE DES VASES.** — Le plus ou moins d'adhésion du liquide pour les parois du vase dans lequel il est élevé à l'ébullition influe beaucoup sur la température de l'ébullition. Ainsi, dans un ballon de verre, ou d'une autre substance conduisant mal la chaleur, l'eau bout à une température plus élevée que dans un vase métallique, non poli, ou garni de pointes, ou formé d'un corps chargé d'aspérités. Quand la surface intérieure d'un ballon de verre est bien polie, la température de l'ébullition de l'eau s'élève quelquefois jusqu'à 106°; mais si l'on jette un fragment de métal, ou de la limaille de fer au fond du ballon, la température de l'ébullition revient à 100°. C'est pour tenir compte de cette influence des vases que, dans la graduation des thermomètres, on détermine toujours le point fixe supérieur de l'échelle dans un vase de cuivre rouge ou de fer-blanc.

**MARMITE DE PAPIN.** — Pour qu'un liquide, soumis à l'action de la chaleur, entre en ébullition, il faut que le vase qui le renferme soit largement ouvert, afin que la vapeur puisse librement s'en dégager et se répandre dans l'espace. Dans un vase clos, la vapeur augmente de densité et de tension avec la température; mais la déperdition de chaleur que subit le globule de liquide arrivant à la surface libre, et qui constitue l'ébullition, n'est point possible. Conséquemment, un liquide qui, dans un vase ouvert, ne peut, quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, dépasser la température de son point d'ébullition, peut, dans un vase clos, atteindre une température bien supérieure. Néanmoins, il y a une limite, à laquelle arrivé, le liquide, quelle que soit sa pression, se réduit en

vapeur. Ce fait a été découvert par M. Cagniard-Latour et étudié par M. Wolff. Ainsi, en introduisant de l'eau, de l'éther ou de l'alcool dans de gros tubes de verre, absolument vides d'air, par suite d'une ébullition, et fermés alors à la lampe, on a remarqué qu'en les soumettant à une source de chaleur suffisante, il arrive un moment où le liquide se transforme en vapeurs, dont le volume diffère peu de celui du liquide. L'éther sulfurique, par exemple, se réduit totalement en vapeurs à 200°, en un espace moindre que le double de son volume lorsqu'il est liquide, ce qui arrive sous la pression de 38 atmosphères.

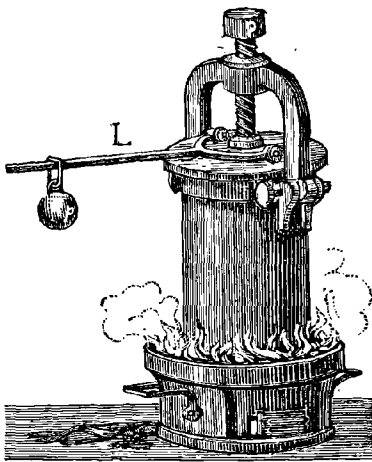


Fig. 294. — MARMITE DE PAPIN.

Ce fut Denis Papin, dont nous parlerons longuement tout à l'heure, qui, le premier, a étudié les effets de la production des vapeurs en vases clos. L'appareil qu'il a imaginé, et qui est connu sous le nom de *marmite de Papin*, démontre l'impossibilité de l'ébullition, en général, dans un vase clos. Cet appareil se compose (fig. 294) d'un vase cylindrique en bronze, à parois très épaisses, muni d'un couvercle fixé très solidement, au moyen d'une vis de pression P, qui le maintient serré contre le vase avec une force proportionnelle à celle de la force

élastique de la vapeur qui tend à le soulever. Pour fermer hermétiquement, on a eu soin de placer sur les bords du vase une feuille de plomb dans laquelle pénètre le couvercle. A la partie inférieure du couvercle est un petit orifice *o*, que bouche exactement un disque métallique, lequel est plus ou moins pressé, au moyen d'un levier L, muni d'un poids *p* mobile. Lorsque la vapeur a atteint une tension telle que le vase serait en danger d'éclater, on avance le poids, de sorte que le petit orifice, appelé pour cela *soupage de sûreté*, se débouche et laisse passer un peu de vapeur. Or, en faisant chauffer de l'eau dans cet appareil, sa température s'élèvera, pour ainsi dire indéfiniment, sans que l'ébullition ait lieu.

Papin avait imaginé cet appareil, qu'il appelait *digesteur*, afin d'extraire, par la vapeur à une haute pression, la partie gélatineuse des os. Il en donna la description dans une brochure, parue en 1681, à Londres. C'était une véritable chaudière.

On s'en sert quelquefois industriellement, malgré les dangers d'explosion, pour l'usage auquel la destinait Papin. On raconte que, dans un grand dîner officiel, chez un préfet du Nord, il y a une quarantaine d'an-



nées, on servit de la gélatine extraite, par le moyen de la marmite de Papin, d'os fossiles, trouvés dans le sol, et qui provenaient de grands animaux morts depuis plus de 6,000 ans.



Les premiers navigateurs dans l'Archipel grec se procuraient de l'eau douce en vaporisant l'eau de mer (page 596).

**CALÉFACTION.** — Quoique l'eau entre en ébullition à 100°, si l'on en projette une petite quantité, dans un creuset de platine chauffé au rouge par exemple, c'est-à-dire à plus de 500 degrés, l'eau ne se réduit pas en vapeur sensible : elle prend la forme sphérique et ne s'évapore qu'avec

une grande lenteur. Si l'on retire le creuset du feu, lorsque le refroidissement est arrivé au point où le métal peut se mouiller, la petite sphère s'aplatit et se transforme immédiatement en vapeur. Tous les corps fusibles et volatils, comme tous les liquides, sont susceptibles de produire les mêmes effets; la température du corps doit être d'autant plus haute que l'ébullition du corps sur lequel on veut agir se produit à une chaleur plus élevée. On a donné à ce mode de vaporisation le nom de *caléfaction*, et le nom d'*état sphéroïdal* à la disposition spéciale qu'affectent les liquides dans ces conditions.

Ces singuliers phénomènes étaient depuis très longtemps connus : ils ont été étudiés autrefois par Leidenfrost, par Klaproth ; mais, plus récemment, M. Boutigny en a fait l'objet de recherches nouvelles très détaillées. Tous les ouvriers des fonderies savent que l'on peut plonger la main dans du plomb fondu, toucher de la fonte en fusion, passer la langue sur un fer rouge, sans se brûler (page 30). Les verriers avaient remarqué que, s'ils jetaient de l'eau sur le verre fondu dans le creuset, elle se divisait en petites sphères, qui se promenaient à la surface et ne s'évaporaient que très lentement. Ils utilisent même cet effet (1) : ils plongent dans l'eau la masse de verre incandescente qu'ils tiennent au bout de leur canne, et, la tournant rapidement sur elle-même, ils la façonnent ; soufflant ensuite dans la canne, ils forment, au milieu du verre pâteux, une boule, dans laquelle ils introduisent un peu d'eau, et ils bouchent l'ouverture avec leur doigt ; la vapeur de cette eau presse les parois de la boule, la gonfle, et en augmente graduellement la capacité (*fig.* à la page 585). Et tout cela se fait sans explosion, parce que le verre est très chaud, et que l'eau qui semble le toucher est à l'*état sphéroïdal* et s'évapore lentement.

Les causes les plus nombreuses de l'explosion des machines à vapeur sont dues au fait de la caléfaction. En effet, M. Boutigny a constaté que, pour que l'état sphéroïdal ait lieu, il faut que le corps solide sur lequel se jette le liquide soit porté à une température supérieure à une certaine température limite, spéciale pour chaque liquide, et qui, pour l'eau, est de 142° ; c'est-à-dire qu'il faut que le métal ait atteint une température supérieure à 142° pour que de l'eau mise en contact avec lui prenne l'état sphéroïdal. Or si, après avoir obtenu l'état sphéroïdal de l'eau, on laisse refroidir le vase de métal, lorsque le métal est redescendu à 140°, le liquide, qui jusque-là dansait au-dessus de la plaque, la touche immédiatement et bout avec violence.

Cela établi, considérons la chaudière d'une machine à vapeur. Dans

(1) Voir notre CHIMIE : *Silicate de soude ; Fabrication du verre.*

les conditions normales, la flamme du foyer n'agit que sur les parois qui sont en contact avec l'eau, et celle-ci, acquérant sa température constante d'ébullition, empêche la paroi de prendre une température plus élevée. Mais si une incrustation, par exemple, empêche l'eau de toucher la paroi, celle-ci s'échauffe jusqu'à une température de plus en plus élevée. Qu'alors cesse cette cause, que le contact ait lieu entre l'eau et la paroi, soit parce que l'incrustation présente une fissure, soit parce qu'elle disparaît, l'eau prend l'état sphéroïdal. Si, en cette circonstance, on cesse de chauffer la machine, la température du métal de la paroi où se produit la caléfaction s'abaissera, et quand elle sera descendue à 142° environ, l'eau entrera immédiatement en ébullition, engendrant une masse de vapeur qui peut faire éclater la chaudière.

Ce phénomène se rattache évidemment aux phénomènes de capillarité (page 235). L'absence de contact entre le liquide à l'état sphéroïdal et la plaque métallique est constatée par diverses expériences; il se forme sur toute la surface du globule une évaporation active qui empêche la température de s'élever jusqu'au point d'ébullition, et, au moment où cesse le contact, la formation de la vapeur devient moins intense qu'avant, puisque la chaleur de la plaque ne se communique plus que par rayonnement; mais, à partir de ce moment, la vaporisation est d'autant plus rapide que la température de la plaque est plus élevée.

On raconte que deux sculpteurs anglais, Blagden et Chantrey, s'exposèrent dans des fours dont la température était supérieure à 100° et qu'ils en sortirent sains et saufs. Nous le comprenons maintenant. Le corps humain est un tissu imprégné d'eau, cette eau peut venir à la surface par transpiration, s'y évaporer, et protéger par un nuage de vapeur le corps lui-même.

#### CONDENSATION. DISTILLATION. — APPAREILS DE DISTILLATION. —

Nous savons qu'en se refroidissant la vapeur retourne à l'état liquide, par *condensation*. C'est sur ce fait qu'est fondée la *distillation*, c'est-à-dire l'opération qui consiste à séparer un liquide volatil d'autres liquides moins volatils que lui.

Il est assez difficile de préciser l'époque à laquelle cette opération a été inventée.

Pline fait mention du procédé grossier de distillation que, bien longtemps avant lui, on employait en Grèce pour se procurer l'essence de térébenthine. On suspendait de la laine ou une toison au-dessus d'une chaudière dans laquelle on faisait bouillir de la poix avec de l'eau. Quand cette laine était chargée des vapeurs qui s'en étaient exhalées, on l'expri-

mait et on obtenait ainsi une essence impure qu'on nommait *pissæteum* ou *fleur de poix*. C'est par un procédé analogue que les premiers navigateurs dans l'Archipel grec se procuraient de l'eau douce à bord de leurs bâtiments. Voici ce que dit, à cet égard, Alexandre d'Aphrodisias en Cilicie, célèbre commentateur d'Aristote, 150 ans après Pline : « On rend l'eau de la mer potable en la vaporisant dans des vases de métal et en recevant sa vapeur condensée sur des couvercles. » Ces couvercles, *ambix* en grec, étaient probablement des récipients. Alexandre ajoute que l'on peut traiter de la même manière le vin et d'autres liquides. C'est de

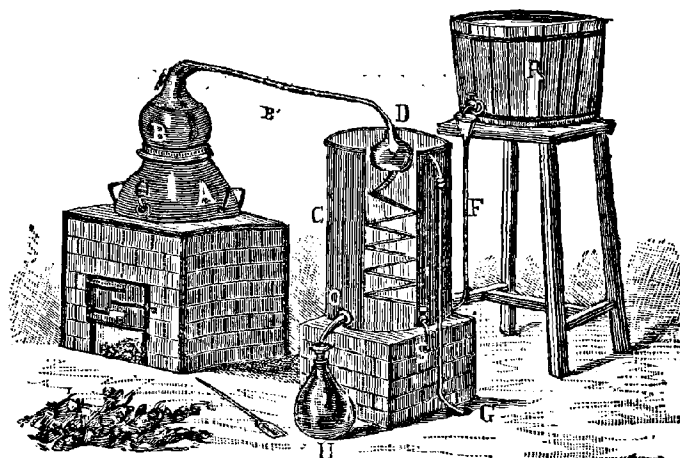


Fig. 295. — ALAMBIC ORDINAIRE.

ce mot *ambix* que les médecins arabes du moyen âge firent *ambic*, puis *al-ambic*, en y associant leur particule *al*, qui est un terme d'excellence. C'est cependant dans un écrit de Zosime, surnommé le *Thébain* ou le *Panopolitain*, philosophe grec du IV<sup>e</sup> siècle de notre ère, que l'on trouve pour la première fois la description détaillée et exacte d'un appareil pour la distillation, qu'il dit avoir vu dans un ancien temple de Memphis. C'est donc par erreur que l'on a jusqu'ici attribué aux Arabes l'invention de l'art distillatoire. A l'époque où vivait Zosime, les Arabes n'avaient pas encore paru dans l'histoire. Ils n'ont fait qu'en répandre les procédés en Espagne, en Italie et dans le midi de la France.

Selon la nature du liquide à distiller, les appareils sont différents. Ainsi, pour la distillation de l'eau, on se sert de l'alambic ordinaire (fig. 295), dont voici la disposition la plus générale.

A est une chaudière en cuivre étamé, qu'on appelle *cucurbite*. C'est dans ce vase qu'on met l'eau de rivière à distiller. B, *tête* ou *chapeau* en

étain ou en cuivre, se pose sur la cucurbite, et son long col latéral T sert à diriger les vapeurs dans le vase D qui porte le nom de *réfrigérant* ou *serpentin*. Ce dernier consiste en un long tuyau d'étain E, courbé en hélice et renfermé dans un seau de cuivre C rempli d'eau froide. Dans ce tuyau, les vapeurs se condensent en gouttelettes liquides qui coulent dans un vase en verre ou en grès H, placé au-dessous de l'ouverture O du réfrigérant. Ce vase H s'appelle *réceptif*, parce qu'il reçoit le produit de la distillation. Pour mieux condenser la vapeur qui parcourt le serpentin, on renouvelle constamment l'eau qui entoure celui-ci, au moyen d'un courant qui tombe d'un réservoir R. Ce liquide froid est conduit au fond du réfrigérant par le tube F, tandis que l'eau chaude s'écoule en dehors par le moyen du trop-plein G qui communique avec la partie supérieure du réfrigérant. Le robinet S sert à vider l'appareil quand l'opération est terminée.

Pendant très longtemps, les alambics eurent des formes très défectueuses et peu commodes. Ce n'est qu'en 1777 qu'ils ont été perfectionnés par Baumé, l'abbé Moline et Chaptal, et que la distillation a subi d'heureuses améliorations. Aujourd'hui, on l'exécute de la manière la plus rationnelle.

Nous ne parlerons ici que des appareils utilisés dans la distillation de l'eau-de-vie et des esprits (1).

L'art d'extraire de l'eau-de-vie et des esprits du vin et des autres boissons fermentées appartient probablement aux Arabes, auxquels la religion a défendu l'usage de ces boissons. Cette pratique, d'ailleurs, remonte à des temps assez reculés, puisque Marcus Græcus, auteur grec connu seulement par un ouvrage qui a subsisté, et Rhazès, célèbre médecin arabe, qui l'un et l'autre vivaient vers le IX<sup>e</sup> siècle, parlent de l'eau-de-vie, désignée alors sous le nom d'*eau ardente*, et indiquent déjà l'eau-de-vie de grains. C'est donc à tort qu'on attribue à Arnaud de Villeneuve la découverte de l'esprit-de-vin et des teintures alcooliques. En 1618, la fabrication de l'eau-de-vie de grains fermentés était une industrie importante à Magdebourg et surtout dans la ville de Wernigerode. C'est Libavius qui, le premier, indiqua le moyen d'obtenir de l'alcool d'un grand nombre de grains ou de fruits.

Les appareils au moyen desquels on distille aujourd'hui sont bien différents de ceux qui servaient au commencement du siècle. A la place de

(1) Voir, dans notre CHIMIE, les moyens employés pour les distillations en petit qu'exigent les expériences chimiques et les appareils industriels pour la distillation en grand de certains produits, ainsi que ceux qui servent à distiller l'eau de mer à bord des navires, pour en faire de l'eau potable.

l'alambic ordinaire, qui ne donne que des produits très aqueux, qu'il faut rectifier un grand nombre de fois, et qui ont toujours, d'ailleurs, un *goût de feu* ou *d'empyreume*, on opère dans des appareils à marche continue qui

permettent d'extraire, d'un seul coup, tous les degrés de spirituosité.

La première idée de ces appareils est due à Adam (1), qui songea à faire l'application du principe de l'échauffement des liquides par la condensation des vapeurs à la distillation du vin, et à mettre en ébullition une quantité donnée de celui-ci par la transmission des vapeurs de ce même liquide. Ses essais furent couronnés d'un plein succès. Cette découverte, qui a tant contribué à la richesse du midi de la France, a été perfectionnée dans ses détails et modes d'exécution, par Cellier-Blumenthal, Armand Savalle, Derosne et Cail, Laugier, Dubrunfaut, Egrot, Robert de Vienne, Villard, etc.

L'appareil fondamental d'Adam, perfectionné par Derosne et Cail, plus ou moins modifié dans quelques-unes de ses parties, et qui, malgré son ancienneté, est encore très souvent employé, est ainsi composé (*fig.* 296) :

1° Deux chaudières à distiller A et A' sont placées à des hauteurs différentes sur un fourneau. Ces chaudières communiquent entre elles par un tuyau supérieur Z, courbé, destiné à porter les vapeurs de la chaudière inférieure dans la chaudière supérieure, puis inférieurement par un

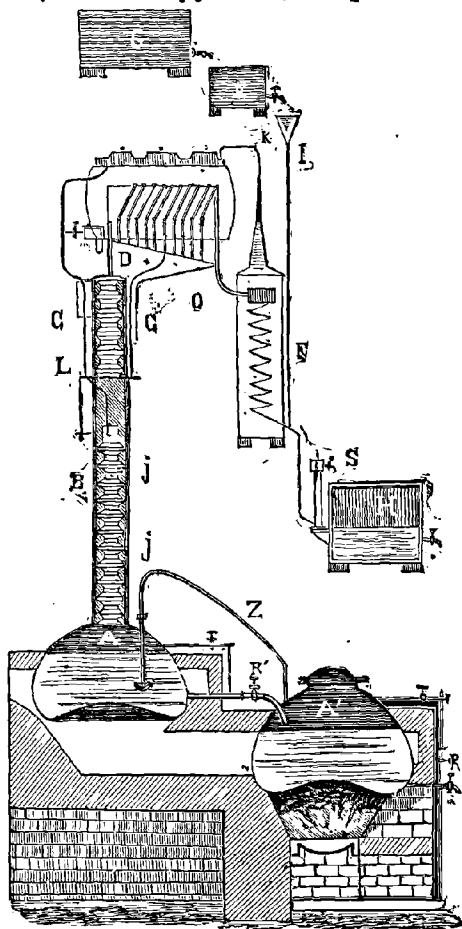


Fig. 296. — APPAREIL D'ADAM  
PERFECTIONNÉ PAR DEROSNE ET CAIL.

(1) ADAM (Édouard-Jean), chimiste-manufacturier, né à Rouen (1768-1807). Il avait pris un brevet d'invention en 1801, et, avec l'aide de capitalistes, il avait pu monter plus de vingt distilleries dans le Midi. Mais bientôt, de tous côtés, s'élevèrent des appareils calqués sur les siens; une suite de procès s'engagea entre Adam et ses contrefacteurs. Ceux-ci gagnèrent, et le malheureux Adam, qui avait doté la France d'une industrie féconde, mourut dans la misère et le dégoût.

autre tube à robinet R', destiné à laisser écouler les vinasses de la chaudière supérieure dans la chaudière inférieure. Ces chaudières sont munies d'indicateurs en verre, pour faire connaître le niveau du liquide dans ces vases; 2° d'une colonne en cuivre placée sur la chaudière supérieure. Cette colonne, dans la première moitié de sa hauteur B, est garnie de plateaux *jj*, placés les uns sur les autres, et destinés chacun à recevoir une couche de vin d'environ 27 millimètres d'épaisseur. Cette première partie de la colonne porte le nom de *colonne à distiller*. Dans son autre moitié supérieure C, qui porte le nom de *colonne à rectifier*, il n'y a point de plateaux; 3° d'un *condensateur chauffe-vin* D, qui n'est autre chose qu'un serpentín, placé dans un réfrigérant ou seau en cuivre, qu'on tient sans cesse rempli de vin. Le serpentín est muni, dans sa longueur, de plusieurs tubes inférieurs d'écoulement, fermés par des robinets, et qui donnent des produits alcooliques à divers degrés de spirituosité; 4° d'un *réfrigérant* F, garni intérieurement d'un serpentín qui conduit le liquide alcoolique distillé dans une éprouvette d'essai S, et, de là, dans les récipients H ou barriques. Le réfrigérant porte à sa partie inférieure un tuyau qui remonte perpendiculairement bien au-dessus du niveau du *chauffe-vin* et qui se termine par un entonnoir I. Ce tube-entonnoir reçoit le liquide à distiller d'un réservoir supérieur G. Le même réfrigérant porte à son centre supérieur un autre tube droit K, qui communique avec le *chauffe-vin*, et qui est destiné à faire passer le vin du réfrigérant dans le *chauffe-vin*; 5° d'un réservoir G suffisamment grand, placé au-dessus de l'appareil, et destiné à alimenter les pièces précédentes du liquide à distiller. Ce réservoir est muni d'un seau E, qui sert à régulariser l'écoulement du liquide dans le réfrigérant.

Ceci étant conçu, on commence par remplir de vin la chaudière inférieure environ jusqu'aux trois quarts de sa hauteur, et, dans la chaudière supérieure, on met du vin seulement à 16 centimètres au-dessus du tuyau de décharge. Avant de faire le feu, on a soin de remplir de vin le réfrigérant, le condensateur chauffe-vin, puis les plateaux de la colonne à distiller. Le tube L sert à conduire le vin du condensateur sur les plateaux. On chauffe alors la chaudière inférieure qui, seule, est placée au-dessus du foyer. Bientôt le vin entre en ébullition, et la chaudière supérieure commence à s'échauffer, par le courant de chaleur qui s'échappe du foyer de la première. Les vapeurs qui s'élèvent de celle-ci sont transmises dans le liquide de la chaudière supérieure, où elles se condensent, en abandonnant toute la chaleur latente à la masse de vin qu'elle contient. Le liquide ne tarde pas à se mettre en ébullition; alors toutes les vapeurs aqueuses et alcooliques passent dans la colonne à pla-

teaux, où, rencontrant le liquide qui descend du réservoir, elles lui abandonnent de la chaleur, en dégageant une quantité proportionnelle d'alcool, tandis que les vapeurs aqueuses se condensent en partie, et se précipitent dans la chaudière avec le vin épuisé des plateaux. Les vapeurs, de plus en plus alcooliques, s'élèvent ensuite dans le condensateur chauffe-vin, où elles éprouvent une basse température; elles y déposent encore une partie de leur eau, et elles vont enfin, par le tube O, se con-

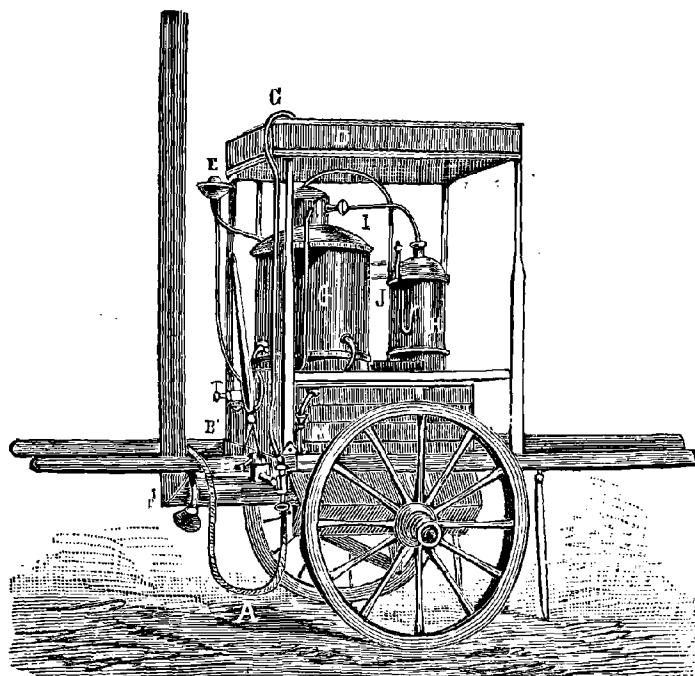


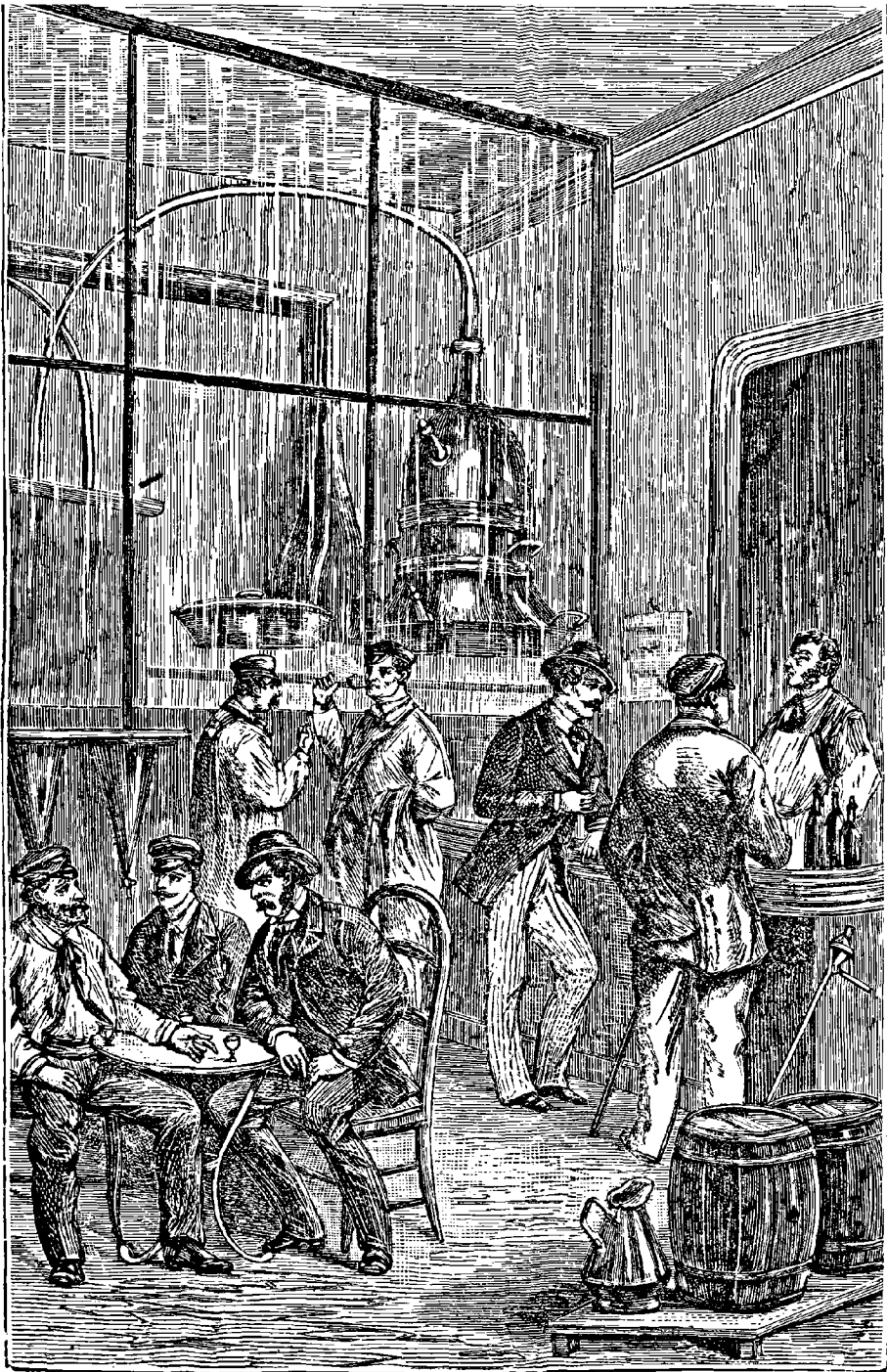
Fig. 297. — APPAREIL LOCOMOBILE DE DISTILLATION.

denser complètement dans le réfrigérant inférieur, d'où elles s'écoulent, à l'état d'alcool froid, dans le récipient H, en un filet dont le volume égale celui du vin qui sort du réservoir supérieur. De cette manière, la distillation une fois commencée, et le vin dépouillé d'esprit s'échappant sans interruption de la chaudière inférieure par un robinet R, tandis que le vin nouveau arrive incessamment du réservoir supérieur, l'opération pourrait être continue, dans toute l'acception du mot, si l'intérieur des vases ne s'encrassait pas.

Il existe un grand nombre d'appareils distillatoires. Dans les distilleries de betteraves, on emploie des procédés différents dus à MM. Champonnois, Kessler, Leplay, etc. Ceux de MM. Dubrunfaut, Savalle servent



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Boutique de distillateur.



pour distiller l'alcool de grains dans les usines du nord de la France, de la Belgique et de la Hollande; en Allemagne, on se sert de ceux de Dorn, de Pistorius, de Gall; en Angleterre, de celui de M. Coffey. En France, quelques distillateurs placent dans leurs boutiques mêmes les appareils de distillation; ces appareils (*fig.* à la page 601) ont des dispositions fort différentes, mais ne sont que des modifications plus ou moins heureuses de l'appareil Derosne et Cail que nous avons décrit.

Depuis quelques années, des entrepreneurs transportent de ferme en ferme des alambics locomobiles pour distiller les moûts fermentés, que les petits propriétaires ou les cultivateurs ont préparés. Voici la description sommaire d'un de ces appareils (*fig.* 297) :

Un tuyau flexible A puise le moût dans un réservoir quelconque; une pompe B, manœuvrée par le levier B', élève le liquide dans le tuyau C, qui l'amène dans un bac D, placé à la partie supérieure de l'appareil; il coule de celui-ci dans le tuyau E à entonnoir, qui le conduit au bas du réfrigérant F, qu'il remplit bientôt. En G est la chaudière en cuivre entourée de son fourneau en tôle, en H sont les plateaux de distillation et la colonne à rectifier. Les vapeurs de cette dernière passent dans le tube I en col de cygne. Les tuyaux et les robinets J rendent facile la rétrogradation des vapeurs alcooliques. L'arrivée du moût sur les plateaux est réglée par un robinet qu'on ne voit pas dans la figure; l'alcool produit sort en M.

Ce petit appareil, très simple et d'une manœuvre commode, donne des rendements presque aussi forts que les grands appareils des usines.

## CHAPITRE IX

### CALORIMÉTRIE

**DÉFINITIONS. — CHALEUR SPÉCIFIQUE. — CALORIE. —** La *calorimétrie* est la partie de la physique qui a pour objet d'évaluer numériquement la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier d'un nombre de degrés connu la température des corps ou pour les amener à changer d'état.

D'où il résulte que la *calorimétrie* comprend deux objets :

1° Évaluer les quantités de chaleur qui produisent des modifications dans la température des corps ;

2° Déterminer les quantités de chaleur nécessaires pour faire passer un corps de l'état solide à l'état liquide, ou de l'état liquide à l'état gazeux.

On appelle *chaleur spécifique* ou *capacité calorifique* d'un corps la quantité de chaleur que l'unité de poids de ce corps absorbe pour passer de 0° à 1°, comparée à la quantité de chaleur que l'unité de poids d'eau distillée absorbe pour passer également de 0° à 1°. Cette quantité de chaleur exigée par l'eau pour passer de 0° à 1° a été prise, d'après Fourier, pour unité et se nomme une *calorie*.

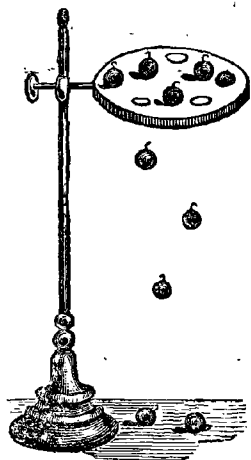


Fig. 298.

EXPÉRIENCE DE TYNDALL  
relative  
à la chaleur spécifique.

Une expérience, due à M. Tyndall, fera comprendre notre définition et montrera qu'il ne faut pas confondre la température d'un corps avec sa chaleur spécifique.

On a porté à la même température, en les plongeant dans un bain d'huile, des balles ayant le même poids, mais de divers métaux, fer, cuivre, étain, argent, bismuth, etc. On place ces balles sur un disque de cire (*fig. 298*). Chacune d'elles cède de la chaleur à la cire, qui fond, et offre une ouverture à la balle. Or, celles dont le métal possède la plus grande *chaleur spécifique* passent les premières ; ainsi, on voit tomber, tout de suite, celles de fer, puis celles de cuivre, puis celles d'étain ; les boules de plomb sont en retard ; souvent, celles de bismuth ne parviennent pas à traverser le disque.

**DÉTERMINATION DE LA CHALEUR SPÉCIFIQUE DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.** — Ce fut Boerhaave qui, le premier, eut l'idée de faire des expériences sur la température des mélanges de plusieurs corps à des températures différentes. Les conclusions étaient fort inexactes. Richmann, puis Black, reprirent ces expériences, et celui-ci, le premier, fit ressortir la propriété des corps d'absorber des quantités de chaleur différentes pour augmenter leur température d'un même nombre de degrés (page 532). A peu près à la même époque, Wilcke (1) fut amené à étudier plus complètement la question.

(1) WILCKE (Richard), physicien anglais (1720-1786).

Voici à quelle occasion :

L'hiver de 1772 avait été très rude. Pour faire disparaître la neige épaisse qui couvrait un petit parterre, Wilcke essaya de la faire fondre avec de l'eau chaude ; mais la neige disparut si lentement qu'il y vit l'effet d'une cause particulière. Il avait cru que, selon les indications de Richmann, l'eau à 0°, mêlée à de l'eau à 68°, devait donner 34° pour la température du mélange : l'expérience lui montrait que la même quantité de neige prenait à l'eau chaude à 68° toute sa chaleur, sans seulement fondre en totalité.

Il en conclut que tout corps a une capacité différente pour la chaleur, c'est-à-dire une *chaleur spécifique*, qui lui est propre.

**1° MÉTHODE DES MÉLANGES.** — Crawford (1), puis Kirwan (2), parvinrent au même résultat par la méthode expérimentale, consistant à mêler ensemble des poids ou des volumes égaux de substances diverses, dont les températures sont différentes, et à noter la température du mélange.

Cette méthode, dite *Méthode des mélanges*, est une des deux encore aujourd'hui usitées pour connaître la chaleur spécifique des différents corps.

On verse, dans un vase en laiton appelé *calorimètre*, un certain poids  $a$  d'eau à une température connue et peu élevée  $c$  ; on plonge dans cette eau un poids  $b$  du corps dont on veut connaître la chaleur spécifique et qui est à une température  $d$  ; on attend un moment, pour que le mélange ait pris une température uniforme  $e$ . L'unité de poids de l'eau subissant une augmentation de température de 1° gagne une unité de chaleur ; par suite,  $a$  unités de poids gagneront  $a$  unités de chaleur ; et par suite encore, si, au lieu de l'élever de 1°, on l'élève de  $e-d$  degrés, l'accroissement de la chaleur sera  $a \times (e-d)$ . De même, puisque l'unité de poids du corps employé gagne ou perd  $l$  unités de chaleur pour une augmentation ou une diminution de température de 1°, il s'ensuit que  $b$  unités de poids, s'abaissant

(1) CRAWFORD (Adair), savant médecin et chimiste anglais (1749-1795), connu surtout par ses expériences sur la chaleur animale et sur l'inflammation des corps combustibles. L'ouvrage qui fit sa réputation, et dans lequel sont exposées ses expériences et ses théories, a pour titre : *Experiments and observations on animal heat and the inflammation of combustible bodies* (Londres, 1779, in-8°).

(2) KIRWAN (Richard), savant irlandais (1730-1812), chimiste et minéralogiste distingué, membre de la Société royale de Londres, qui lui décerna la médaille Copley en 1784. On lui doit la découverte de la *strontiane*. Kirwan a écrit plusieurs ouvrages, parmi lesquels on cite des *Éléments de minéralogie* où, l'un des premiers, il classe les minéraux d'après leur composition chimique.

de  $d$  à  $e$ , perdront  $bl(d-e)$  calories. Or, la chaleur gagnée par l'eau doit être égale à celle que perd le corps ; donc :

$$bl(d-e) = b(e-c);$$

d'où la chaleur spécifique du corps :

$$l = \frac{a(c-e)}{b(d-e)}.$$

Tel est le principe de la méthode des mélanges, principe qui peut s'exprimer ainsi :

*Tout corps qui a absorbé de la chaleur en passant d'une température à une autre, ou d'un état à un autre, en restitue identiquement la même quantité, en revenant à son état primitif.*

Il est évident que ce principe n'est exact qu'autant que, dans les conditions de l'expérience, la chaleur spécifique de l'eau reste égale à l'unité, c'est-à-dire que la température  $e$  ne dépasse pas  $16^\circ$  ou  $20^\circ$  au plus ; qu'une correction est faite relativement au calorimètre et au thermomètre qui y est introduit, lesquels absorbent, en même temps que l'eau, une portion de la chaleur perdue par le corps en expérience ; que, de plus, on a tenu compte du refroidissement du mélange au contact de l'air et des supports. M. Regnault, dans les recherches qu'il a faites à ce sujet, a très habilement affaibli toutes ces causes d'erreur, par des détails d'expérience, dans lesquels il nous semble inutile d'entrer ici, mais que nous devons signaler pour donner une idée des prodigieuses difficultés que présentent les études exactes des savants physiciens.

**2° MÉTHODE DE FUSION DE LA GLACE.** — En 1781, Wilcke reprit de nouveau la question de la détermination des chaleurs spécifiques et émit l'idée d'employer la fonte de la neige par les corps pour mesurer leur chaleur ; mais la difficulté de recueillir l'eau provenant de la neige employée, le temps très long que les corps mettent ainsi à perdre leur chaleur, la chaleur que reçoit la neige, pendant ce temps-là, des corps voisins de l'atmosphère, lui firent abandonner ce moyen. Lavoisier et Laplace y revinrent, et ils construisirent, dans ce but, un *calorimètre*, destiné surtout à mesurer des quantités de chaleur qui, jusqu'alors, n'avaient pu l'être, telles que la chaleur qui se dégage dans la combustion et la respiration.

Le *calorimètre* se compose (*fig. 299*) de trois vases cylindriques s'emboîtant l'un dans l'autre. Le vase intérieur M est celui où se place le corps dont on veut connaître la chaleur spécifique ; les deux autres vases, A et B, contiennent de la glace. Celle du vase A est destinée à être fondue par le corps en expérience ; celle du vase B doit empêcher la chaleur extérieure de pénétrer dans l'intérieur de l'appareil. Les robinets D et E laissent écouler l'eau produite par la fusion de la glace.

On attend que le corps en expérience soit descendu à 0°, température ordinaire du vase où il est placé, et on pèse la quantité d'eau produite ; son poids mesuré exactement la chaleur dégagée du corps, puisque la fonte de la glace n'est que l'effet de cette chaleur.

« Nous avons trouvé, rapportent les expérimentateurs, que la chaleur nécessaire pour fondre une livre de glace pouvait élever de 60 degrés la température d'une livre d'eau ; en sorte que, si on mêle ensemble une livre de glace à 0° et une livre d'eau à 60°, on aura deux livres d'eau à 0° pour le résultat du mélange ; il suit de là que la glace

absorbe 60 degrés de chaleur en devenant fluide, ce que l'on peut énoncer de cette manière, indépendamment des divisions arbitraires des poids et du thermomètre : *La chaleur nécessaire pour fondre la glace est égale aux trois quarts de celle qui peut élever le même poids d'eau de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante.* »

Les résultats obtenus par ces savants diffèrent quelque peu de celui qui est aujourd'hui, après les travaux de M. Regnault, acquis à la science.

On admet qu'un kilogramme de glace absorbe, pour se fondre, 79 unités de chaleur. Pour trouver la formule de détermination de la chaleur spécifique d'un corps par la fusion de la glace, si nous appelons  $m$  le poids du corps introduit dans le calorimètre,  $t$  sa température et  $p$  le poids de la glace que ce corps a fondue en descendant à 0°, nous dirons : La quantité de chaleur  $c$  perdue par le corps est  $mtc$  ; la quantité de chaleur nécessaire pour fondre un poids  $p$  de glace est égal à  $p \times 79$  unités de chaleur. Or, comme la quantité de chaleur  $mtc$ , perdue par le corps, a

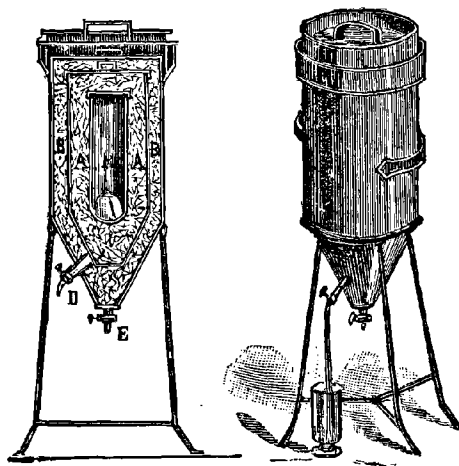


Fig. 299.

CALORIMÈTRE DE LAVOISIER ET LAPLACE.

été tout entière absorbée par le poids  $p$  de glace fondue, on aura les égalités :

$$m t c = 79 \times p ;$$

d'où

$$c = \frac{79 \times p}{m t}.$$

**CHALEUR SPÉCIFIQUE DES GAZ.** — Après de longs travaux relatifs à la recherche de la chaleur spécifique des gaz, exécutés par Leslie, puis par Gay-Lussac, M. Regnault a démontré qu'il y a deux chaleurs spécifiques pour les gaz : 1° la *chaleur spécifique sous pression constante*, c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de poids de ce gaz pour faire varier sa température de 1°, sans changer sa force élastique ; 2° la *chaleur spécifique sous volume constant*, c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de poids de ce gaz pour faire augmenter sa température de 1°, sans changer de volume.

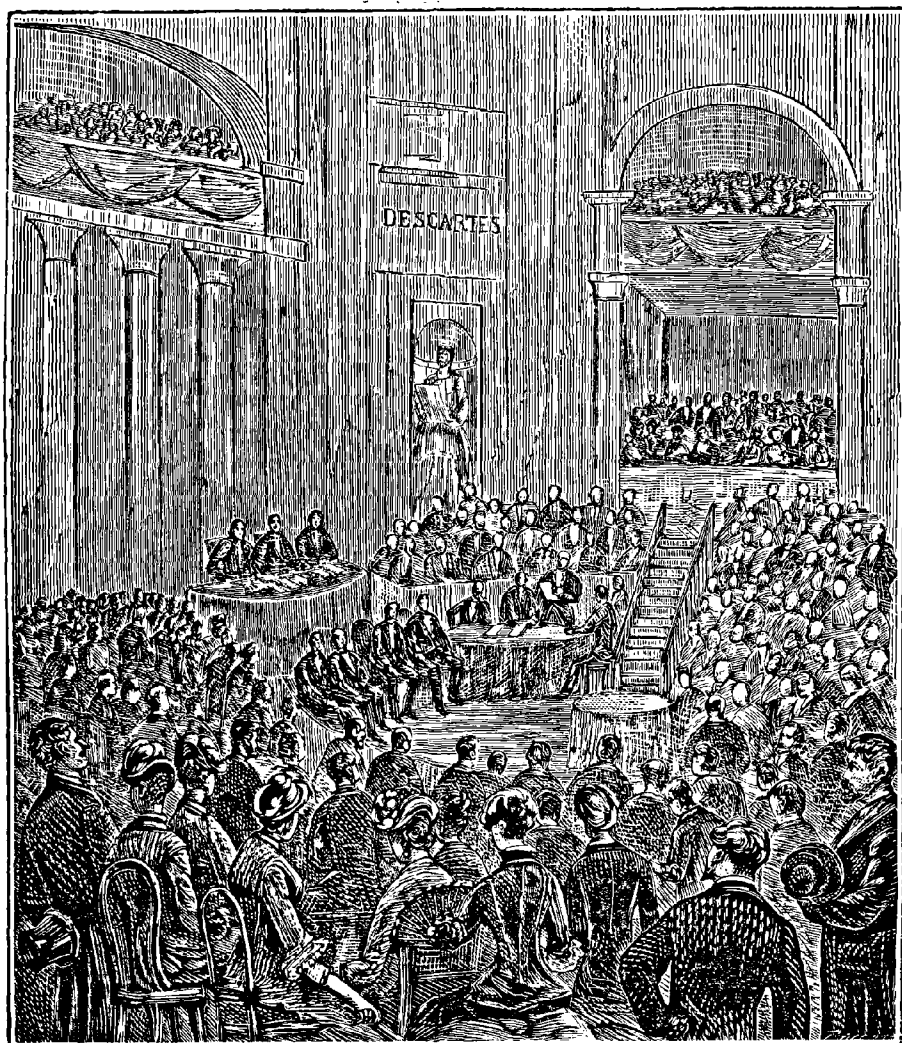
Le tableau suivant indique les chaleurs spécifiques de divers corps et de quelques gaz.

*Chaleurs spécifiques des corps solides et des liquides entre 0° et 100°  
et de quelques gaz sous pression constante.*

NOMS DES CORPS.	CHALEURS spécifiés.	NOMS DES CORPS.	CHALEURS spécifiques.
Acide acétique . . . . .	0,6589	Hydrogène . . . . .	3,40900
Acier doux . . . . .	0,1175	Iode solide . . . . .	0,05412
Acier trempé . . . . .	0,1175	Iode liquide . . . . .	0,108
Alcool à 36 degrés . . . . .	0,6735	Iridium . . . . .	0,03259
Antimoine . . . . .	0,05077	Laiton . . . . .	0,09391
Argent . . . . .	0,05701	Lithium . . . . .	0,19408
Arsenic . . . . .	0,08140	Magnésium . . . . .	0,2499
Azote . . . . .	0,24380	Manganèse . . . . .	0,12
Benzine . . . . .	0,3952	Mercure . . . . .	0,03332
Bismuth . . . . .	0,03084	Molybdène . . . . .	0,07218
Cadmium . . . . .	0,05669	Nickel . . . . .	0,10863
Carbonate de chaux . . . . .	0,209	Noir animal calciné . . . . .	0,26085
Charbon de bois . . . . .	0,241150	Or . . . . .	0,03244
Charbon (anthracite graphique) . . . . .	0,20187	Osmium . . . . .	0,03063
Chlore . . . . .	0,12099	Oxygène . . . . .	0,21751
Chlorure d'arsenic . . . . .	0,17604	Pétrolène . . . . .	0,4684
Cobalt . . . . .	0,10894	Phosphore . . . . .	0,18870
Cuivre . . . . .	0,09515	Platine . . . . .	0,03243
Diamant . . . . .	0,14687	Plomb . . . . .	0,03140
Eau . . . . .	1,0080	Plombagine . . . . .	0,21800
Esprit de bois . . . . .	0,8009	Soufre naturel . . . . .	0,1776
Essence de citron . . . . .	0,4279	Soufre mou trempé . . . . .	0,1844
Essence de térébenthine . . . . .	0,42590	Sulfate de chaux . . . . .	0,19656
Étain . . . . .	0,05623	Sulfure de carbone . . . . .	0,22
Éther . . . . .	0,5157	Verre des thermomètres . . . . .	0,19768
Fer . . . . .	0,11379	Zinc . . . . .	0,09555
Fonte blanche . . . . .	0,12983		



**LOI DE DULONG.** — Dulong et Petit eurent l'heureuse audace de comparer la capacité calorifique, variable suivant l'état physique des corps, avec la capacité atomique (composition chimique) invariable.



M. Babinet, à la réunion solennelle des cinq Académies, prononçait un discours (page 612).

M. Regnault confirma, par de nombreuses expériences, les résultats qu'avaient déjà trouvés ces deux chimistes, et la loi qu'ils ont formulée ainsi : *Il faut une même quantité de chaleur pour échauffer également un atome de tous les corps simples.* Ainsi, par exemple, un atome de plomb pèse

autant que trois atomes de zinc environ. Or, la chaleur spécifique du plomb est le tiers de celle du zinc. Il est évident qu'il existe une grande loi qui règle ainsi ces quantités, car tous les corps simples présentent des rapports analogues. Cette loi de Dulong et Petit a jeté un jour nouveau sur la structure intime de la matière et contribuera certainement à nous la faire connaître un jour.

**CHALEUR DÉGAGÉE DANS LES COMBINAISONS CHIMIQUES.** — Nous ne pouvons entrer ici dans les détails des différents problèmes de calorimétrie, ni même indiquer les nombreux appareils destinés à mesurer les quantités de chaleur produites ou absorbées dans les divers phénomènes thermiques que peuvent présenter les corps. Nous nous contenterons de citer les résultats des travaux de Davy, Lavoisier, Regnault, Dulong, Favre et Silbermann, etc., relatifs à la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques de combustion, ou dans celles dont le corps des animaux est le siège.

*Chaleur dégagée par la combustion intégrale  
d'un kilogramme de combustible.*

NOMS DES COMBUSTIBLES.	CALORIES.	NOMS DES COMBUSTIBLES.	CALORIES.
Hydrogène oxygéné .....	34 462	Hydrogène bicarboné.....	6 600
Hydrogène pur.....	23 640	Coke.....	6 500
Cire blanche.....	9 479	Charbon de tourbe.....	6 400
Huile de colza épurée.....	9 307	Houille grasse moyenne.....	6 000
Huile d'olive.....	9 044	Bois parfaitement sec.....	3 500
Sulf. ....	8 369	Tourbe de bonne qualité.....	3 000
Carbone pur.....	7 914	Bois séché à l'air.....	2 600
Phosphore.....	7 500	Soufre natif.....	2 161
Charbon de bois.....	7 300	Soufre mou.....	2 258
Alcool.....	7 184	Oxyde de carbone.....	1 800

On sait qu'un des effets remarquables de la respiration, chez les animaux, c'est l'entretien de cette chaleur qui leur est propre et qui est généralement supérieure à celle du milieu où ils sont plongés. La respiration n'est pas l'unique source de la production de cette chaleur animale, comme l'ont cru Lavoisier et Laplace ; il est évident que mille réactions chimiques, qui s'accomplissent dans l'organisme, ces transformations et ces assimilations de substances qui s'effectuent incessamment, doivent contribuer au phénomène en question pour une certaine part.

Davy a fait de nombreuses expériences sur les températures des

corps des divers animaux. Nous donnons un tableau de ces diverses températures.

## MAMMIFÈRES.

Bœuf.....	39°
Chat (en Angleterre).....	38°,3
Chat (à Ceylan).....	38°,9
Chauve-souris.....	37°,8
Cheval.....	37°,5
Chien.....	30°
Écureuil.....	38°,8
Éléphant.....	37°,5
Homme (en Angleterre).....	36°,8
Homme (en Afrique).....	37°,7
Lièvre.....	37°,8
Marsouin.....	37°,8
Mouton (en Angleterre).....	38°,5
Mouton (à Ceylan).....	40°,5
Porc.....	40°,5
Singe.....	39°,7
Tigre.....	37°,2

## OISEAUX.

Canard.....	43°,9
Chat-huant.....	40°
Coq adulte.....	43°,9
Coq d'Inde.....	42°,7
Grive.....	42°,8
Perroquet.....	41°,1
Pigeon (en Angleterre).....	42°,1
Pigeon (à Ceylan).....	43°,1
Poule (en Angleterre).....	42°,5
Poule (à Ceylan).....	43°,5

## REPTILES.

Couleuvre brune (Ceylan).....	32°,2
Grenouille.....	25°
Serpent vert (Ceylan).....	31°,4
Tortue mydas.....	28°,9

## POISSONS.

Poisson volant.....	23°,5
Requin.....	25°
Truite.....	14°

## MOLLUSQUES.

Huitre.....	27°
Limaçon.....	24°

## CRUSTACÉS.

Crabe.....	22°
Écrevisse.....	26°

## INSECTES.

Grillon.....	22°,5
Guêpe.....	24°,4
Scarabée.....	25°
Scorpion.....	25°,3
Ver luisant.....	23°,3

**NOMS DÉSIGNANT LES HAUTES TEMPÉRATURES.** — Pour indiquer les divers degrés de température, on fait usage de termes qui rappellent à peu près la couleur de la lumière produite. Ces termes, dus à Pouillet, sont les suivants. Nous donnons la température correspondant à la couleur que prend le platine.

Rouge naissant.....	525°	Orangé foncé.....	1400°
Rouge sombre.....	700°	Orangé clair.....	1200°
Cerise naissant.....	800°	Blanc.....	1300°
Cerise.....	900°	Blanc soudant.....	1400°
Cerise clair.....	1000°	Blanc éblouissant.....	1500°

## CHAPITRE X

### MÉTÉOROLOGIE — HYGROMÉTRIE

**IMPORTANCE DE L'ÉTUDE DE LA MÉTÉOROLOGIE.** — Il y a quelques années, M. Babinet (1), représentant l'Académie des sciences dans la réunion solennelle des cinq Académies, prononçait un discours dans lequel il parlait de la *météorologie* en termes bons à être reproduits :

« En prenant la parole au nom de la météorologie, disait-il, je ne me dissimule pas que le nom de cette science est encore bien peu connu, même du public d'élite, qui, désormais, cessant d'être indifférent aux progrès de la société, est appelé lui-même à y contribuer puissamment par l'influence morale de ses encouragements et de son appréciation favorable...

» On n'a point, pendant longtemps, classé parmi les sciences la météorologie, qui emprunte à la géographie, à la physique, à l'astronomie, à la mécanique, à l'optique, les notions et les principes qu'elle applique aux phénomènes de la nature. Il suffit de dire que la météorologie a pour objet la connaissance des climats du monde entier, de son arrosement et de son échauffement fertilisateurs, des vents et des courants qui voyagent dans les champs de l'air et dans les plaines océaniques, enfin qu'elle préside à la distribution des races animales et végétales sur le globe entier, et, par suite, à la prospérité et à la décadence des populations humaines, qu'alimente la fécondité du sol, et qui disparaissent avec son épuisement.

» La météorologie et l'agriculture, c'est la cause et l'effet.

» Pour la santé, pour les voyages, pour la marine, pour les travaux publics, pour éviter les inconvénients des excès de la chaleur et du froid, nous sommes dans une continuelle dépendance de la météorologie ; et les

(1) BABINET (Jacques), un des savants les plus populaires de France (1794-1872). Il a, comme principal titre de gloire, d'avoir été un des premiers et des plus spirituels vulgarisateurs des sciences. Outre un grand nombre de savants mémoires, outre les perfectionnements apportés par lui à beaucoup d'appareils de physique, entre autres à la machine pneumatique, il a imaginé les cartes *homalographiques*, dans lesquelles est employé un nouveau système de projection.

utiles instruments qui nous donnent le poids de l'air que nous respirons, sa chaleur, son degré d'humidité, son état électrique, sont consultés à toute heure et peuvent même, dans certains cas, faire prévoir, un peu à l'avance, l'état futur de l'atmosphère, pour se garantir de ses fâcheuses influences ou de ses dangereux paroxysmes...

» Tant que les saisons et leurs produits ordinaires n'offrent pas de trop grandes perturbations, le public distrait, et surtout le public des villes, ne prend pas un grand intérêt à l'effet trop habituel des météores. Les moissons naissent et mûrissent, les bestiaux se propagent, les fleurs et les fruits se succèdent, l'hiver et la neige approvisionnent d'eau les réservoirs des ruisseaux et des rivières, l'homme semble n'avoir qu'à recueillir les bienfaits de la nature, qui lui appartiennent de droit. Il ne songe pas même à en être reconnaissant.

» Mais si la marche générale des courants atmosphériques vient tout à coup à changer et produit de terribles inondations, si l'écoulement régulier de l'air de la France, sans aucun de ces arrêts et de ces soulèvements qui produisent la pluie, font prévoir une sécheresse qui, bientôt, devient une triste certitude, les populations sortent de leur apathie ; elles sentent qu'il y a quelque chose, sinon à empêcher, du moins à prévoir, et que, si la météorologie n'est pas une science absolument faite, il faut se hâter d'y porter toute l'activité de l'esprit humain. »

La *météorologie* (du grec *meteoros*, météore ; *logos*, discours) peut donc être définie : la partie importante de la physique qui traite des phénomènes dont l'atmosphère est le théâtre, ainsi que des questions qui s'y rattachent. Cette science est toute nouvelle ; mais, depuis 1853, il s'est formé, à Paris, une *Société de météorologie*, dans le but de la faire progresser. L'*Association scientifique de France*, fondée par M. Leverrier, a aussi pour objet les progrès de la météorologie ; elle publie un bulletin hebdomadaire et un bulletin mensuel. Il a été établi, sur toute la surface de la France et sur plusieurs points à l'étranger, des *stations météorologiques*, où l'on consigne chaque jour des observations qui sont centralisées à Paris.

Il s'est produit dans la science, depuis quelques années, un courant d'opinions nouvelles qui tendent à attribuer un grand rôle aux influences *cosmiques*, dans la production des phénomènes météorologiques. On a nié pendant longtemps toute action des astres sur les variations atmosphériques ; maintenant, avec une certaine timidité, mais avec un ensemble assez significatif, on signale, des quatre coins de l'horizon, des coïncidences remarquables, qui prouveraient qu'il faut chercher ailleurs que sur terre la cause des principaux mouvements atmosphériques. On commence seulement à entrer dans cette voie ; à peine a-t-on su déjà trouver quel-

ques relations curieuses et vraiment intéressantes entre des phénomènes considérés jusqu'ici comme indépendants les uns des autres; mais, évidemment, ces obstacles seront surmontés, et, en météorologie comme dans les autres branches, la science, malgré les dogmes, arrivera à la conquête de la vérité.

Les observations météorologiques sur les pics élevés sont donc essentielles, et ce n'est guère que par leur entremise que l'on parviendra, sans contredit, à trouver la clef des grands changements atmosphériques. Les variations atmosphériques, en effet, viennent d'en haut; il est tout simple qu'il faille les étudier en haut pour se mettre à l'abri des perturbations qu'amènent à la surface les accidents topographiques du sol.

Les observatoires de grandes altitudes sont plus nombreux qu'on ne pense; mais leur nombre est loin d'être suffisant. Citons les principaux :

Aux États-Unis, l'observatoire du mont Washington, à la hauteur de 1,916 mètres au-dessus de la mer; celui de Santa-Fé, dont l'altitude est de 2,091 mètres; celui de Pike's-Poak, à l'altitude énorme de 4,313 mètres (ces deux dernières stations sont situées dans les montagnes Rocheuses et pourvues d'un bureau télégraphique); en Italie, à Monte-Cavo, près de Rome (941 mètres); à Cogne (1,543 mètres d'altitude); au Simplon (2,010 mètres); au petit Saint-Bernard (2,160 mètres); au grand Saint-Bernard (2,478 mètres); à Stelvio (2,543 mètres); au col de Valdobbio (2,548 mètres). En Autriche, sur les Alpes, la station de Fleirs-Gold (2,798 mètres). En France, nous avons, depuis 1873, au pic du Midi de Bigorre, la station du mamelon Plantade, près de l'Hôtellerie, à 2,366 mètres, et celle du pavillon Darcet, au sommet du pic, à 2,877 mètres; l'observatoire du Puy-de-Dôme, à 1,463 mètres.

**PRÉVISION DU TEMPS.** — Dans les calendriers qui accompagnent les almanachs populaires, on trouve des indications telles que : *pluie, beau temps, vent violent, orage*, etc. Un grand nombre de personnes croient encore à ces prédictions et se guident sur elles; comme le peu d'exactitude de ces indications entraîne souvent des inconvénients fort graves, principalement pour les cultivateurs, nous voulons dire quel sens on doit leur attribuer, et comment on pourrait leur donner une plus grande exactitude.

Chacun connaît cette anecdote relative au célèbre Mathieu Laensberg, qui vivait vers l'an 1600, et qui, en qualité de chanoine de Saint-Barthélemy, à Liège, avait reçu du ciel le don de prophétiser, entre autres belles choses, le temps qu'il ferait pendant toute l'année, observations

qu'il consignait dans ce fameux *Almanach de Liège* que des ignorants achètent encore.

Comme tout bon chanoine, il avait une nièce, et cette nièce était son secrétaire. Or, un jour qu'il lui dictait quelques-unes de ces élucubrations, que l'imprimeur lui payait à beaux deniers comptants, il arriva à la date du 21 septembre.

— « Mercredi 21 septembre, grande pluie, dicta gravement le chanoine... »

— Oh! mon oncle, fit le secrétaire d'un ton chagrin, grande pluie! .. le jour de votre fête!...

— En vérité?... Eh bien, beau fixe, mon enfant, beau fixe! » répond le chanoine, touché de la tristesse de sa nièce...

Que de gens encore cependant n'osent entreprendre quelque chose sans consulter leur almanach pour savoir le temps qu'il fera! En vain leurs projets avortent-ils, parce que la pluie arrive au lieu du beau temps prédit; en vain leurs espérances sont-elles renversées par une opposition flagrante entre le temps réel et le temps indiqué, ils vous disent avec un air de triomphe :

— « Oui, vous avez raison, l'almanach marque pluie, et il fait très beau au lieu où nous sommes; mais dans telle ou telle ville, à quelques lieues d'ici, il doit nécessairement pleuvoir! »

Que répondre à ce beau raisonnement? Et pourtant il est lui-même la preuve la plus évidente de l'absurdité des prédictions. Comment, en effet, pourra-t-on se servir d'une indication météorologique, si l'on ne sait pas en quel lieu elle se vérifie?

Quelques remarques vont montrer que les prédictions météorologiques ne peuvent encore avoir assez d'exactitude pour rendre des services réels. Une foule de circonstances, la plupart imprévues et complètement indépendantes des lois générales qui déterminent la succession des phénomènes atmosphériques, viennent à chaque instant introduire des variations dans le temps. Un changement de culture, l'établissement d'une usine à vapeur, le tirage d'une cheminée de forge, un incendie, font varier les circonstances atmosphériques qui produisent la pluie et le beau temps. Pleut-il tous les ans au mois de mars dans un lieu donné; la coupe d'un bois, le défrichement d'un terrain, un vaste incendie, peuvent faire arriver la pluie un peu plus tôt ou un peu plus tard. Et tant qu'il ne sera pas tenu compte de ces faits imprévus, eût-on la loi exacte des variations météorologiques, jamais on ne pourra prédire avec exactitude le temps qu'il fera dans un lieu donné.

C'est pourquoi Arago disait, il y a une cinquantaine d'années :

« *Jamais les savants de bonne foi, et soucieux de leur réputation, ne se hasarderont à prédire le temps.* »

Ces paroles, évidemment, n'impliquent pas qu'on ne pourra jamais connaître les lois des phénomènes météorologiques. Ceux-ci sont soumis à des lois fixes et possibles à déterminer. L'observation a déjà démontré qu'il y a des relations précises entre certains faits, qui paraissent contradictoires. Une longue série d'observations exactes nous fera certainement connaître les lois générales pour le temps, comme nous les avons pour la température.

Chacun sait avec quelle facilité les marins et certains paysans devinent, un ou deux jours d'avance, le temps qu'il va faire. Ces prédictions ne sont que le résultat d'observations peu précises, il est vrai, mais persévérantes. Il est peu de phénomènes météorologiques qui se produisent sans avoir été précédés de signes qui n'échappent point à des esprits attentifs. Il ne faudrait que guider, éclairer, rassembler toutes ces indications pour que la science météorologique grandît peu à peu.

Les traditions populaires, d'ailleurs, cachent souvent un fond de vérité; seulement, en passant de génération en génération, leur vrai sens se trouve altéré, faussé même, et il serait au moins bon que ceux qui se rient d'un dicton commençassent par en rétablir la signification exacte. Le vieux proverbe de la Saint-Médard, par exemple, remonte très haut; on en trouve des traces dès le XIII<sup>e</sup> siècle, avant l'établissement du calendrier grégorien. Or, en adoptant le nouveau calendrier, on supprima du même coup les fêtes de douze saints, ce qui avança de douze jours celle de tous les autres saints. C'est pourquoi la Saint-Médard, qui survenait autrefois le 20 juin, c'est-à-dire au solstice d'été, tombe de nos jours le 8 juin. Le dicton se rapportait donc au 20 juin et non pas au 8 juin. De plus, on accorde au dicton un sens beaucoup trop étroit. Il signifie tout bonnement que le temps établi au solstice se maintiendra, sans changement appréciable, pendant un certain nombre de jours. Et, au fond, la prédiction s'appliquant au solstice, est parfaitement rationnelle.

Nous allons indiquer, d'après M. G. Bresson, quelques phénomènes qui donnent une idée assez exacte du temps qu'il doit faire le *lendemain*, en montrant la liaison qui existe entre le fait observé le soir et le phénomène du lendemain, et on pourra facilement se convaincre que, si la prédiction n'est pas toujours d'une rigoureuse exactitude, elle est suffisamment exacte pour qu'on puisse l'utiliser dans bien des cas.

En hiver, lorsqu'il fait beau, et que la température est basse, l'atmosphère est très sèche, le ciel paraît d'un bleu magnifique, et les étoiles brillent d'un éclat extraordinaire. En été, au contraire, il y a toujours



dans l'air une certaine quantité de vapeurs, qui, s'interposant entre la voûte étoilée et notre œil, enlèvent aux astres une partie de leur éclat apparent. Il y a donc, à part la différence qui existe entre la beauté des



Matthieu Laensberg et sa nièce  
(d'après une estampe de la Bibliothèque nationale) [page 614].

constellations visibles en été et en hiver, une différence d'éclat très sensible et provenant de l'état météorologique de l'atmosphère.

Lorsque, en hiver, l'azur du ciel perd de son éclat et prend une teinte blanchâtre, lorsque les brillantes étoiles, qui scintillent dans la

voûte des cieux, semblent se cacher derrière un voile léger qui affaiblit l'intensité de leurs rayons, et qu'en même temps on ne peut constater aucune élévation de température, il est plus que probable qu'il pleuvra le lendemain, ou du moins que le temps changera, et que des nuages plus ou moins pluvieux viendront voiler le ciel ; et il est facile de comprendre qu'il doit en être ainsi. Avec une basse température, pour qu'il fasse beau, il faut que l'air soit sec, car sans cela les vapeurs qui se trouveraient dans l'atmosphère se condenseraient pour former des nuages. Si donc l'éclat du ciel diminue, si les étoiles perdent de leur intensité lumineuse, on est immédiatement averti par ce fait de la présence des vapeurs dans l'air, et, comme la température est assez basse, on peut en conclure que ces vapeurs vont se condenser et des nuages apparaître.

Si, en hiver, en même temps que l'éclat du ciel diminue, on observe une élévation sensible dans la température, on ne pourra rien présumer de cette observation, car il y a à peu près autant de chances pour le beau temps que pour la pluie.

On peut donc dire que, lorsqu'il fait froid, pour qu'il fasse beau, il faut que l'air soit sec et que les étoiles soient très brillantes. Par conséquent, si, sans que le froid diminue, on constate, par le peu d'éclat des astres, que des vapeurs sont répandues dans l'air, on peut être à peu près sûr que la journée du lendemain ne se passera pas sans que le ciel soit couvert et peut-être même sans qu'il pleuve.

En été, les conditions météorologiques qui maintiennent le temps au beau sont différentes. La chaleur des rayons solaires produit une évaporation très active et l'air est constamment rempli de vapeurs. Or, pour qu'il fasse beau, il faut que la température soit assez élevée pour qu'il n'y ait pas condensation des vapeurs et formation des nuages. La présence des vapeurs est rendue très sensible par le peu d'éclat des étoiles. Pour que le temps change, il faut, ou bien qu'il y ait abaissement sensible de température, sans que le ciel devienne plus brillant, ou bien que, sans aucun changement de température, les étoiles prennent un éclat comparable à celui qu'elles ont en hiver. En effet, si, sans aucun changement dans l'état du ciel, la température diminue, il se présente les mêmes circonstances que nous avons signalées pour l'hiver : présence de vapeurs dans l'air et température assez basse pour les condenser, et alors des nuages se forment infailliblement. Si, au contraire, sans qu'on puisse observer les variations sensibles dans l'état calorique de l'atmosphère, les étoiles brillent d'un vif éclat, on doit en conclure que, par une cause qui échappe sur le moment à notre observation, il y a eu condensation de la vapeur répandue dans l'air, que des nuages sont en voie de formation et que sous

peu le ciel se couvrira. Si, en même temps que l'éclat du ciel augmente, la température diminue, en été, on ne pourra rien conclure de positif de cette observation, car il y aura à peu près les mêmes chances pour la pluie que pour le beau temps.

Donc, en été, lorsqu'il fait chaud, si les étoiles brillent d'un vif éclat, sans qu'on puisse constater aucun abaissement sensible de température, on peut être à près sûr que le lendemain le ciel sera couvert et peut-être même qu'il pleuvra. Lorsque la lune brille au-dessus de notre horizon, elle sert à constater d'une manière plus certaine la présence des vapeurs dans l'atmosphère. Or lorsque le *halo* (1), c'est-à-dire, par analogie, ce cercle simple qui entoure le soleil ou la lune à une certaine distance, existe, il indique qu'il y a dans l'atmosphère des vapeurs, sous forme de vésicules, qui ont, par conséquent, commencé à se condenser pour former des nuages. Il annonce donc, non pas précisément la pluie, mais bien la formation de nuages qui peuvent l'amener.

**HYGROMÉTRIE.** — Nous étudierons dans ce chapitre les phénomènes météorologiques qui dépendent de la *chaleur*. Nous verrons plus loin ceux qui dépendent de la lumière et de l'électricité.

L'*hygrométrie* (du grec *ugros*, humide; *metron*, mesure) a pour objet la mesure de la quantité de vapeur d'eau que contient l'air atmosphérique, ou plutôt la force élastique de cette vapeur, c'est-à-dire son plus ou moins de rapprochement du point de saturation de l'air. L'*état hygrométrique* est donc le rapport qui existe entre la quantité de vapeur d'eau répandue dans l'air et celle qui s'y trouverait, à la même température, si l'air en était saturé.

Tous les corps sont *hygrométriques*, c'est-à-dire qu'ils absorbent tous une certaine quantité d'eau; les corps qui le sont le plus sont les corps organiques, et particulièrement les sels à base de soude, de potasse et de chaux. Cette propriété, que possèdent le carbonate de potasse, le chlorure de calcium, l'acide sulfurique, etc., a été mise à profit dans la dessiccation de certains endroits dans lesquels on voudrait être à l'abri de l'humidité. Ainsi les logements humides, comme les rez-de-chaussée, sont desséchés par ce moyen. Il ne faudrait pas cependant pousser cette dessiccation trop loin, car alors le milieu dans lequel on se trouverait deviendrait difficilement respirable. Il faut qu'il y ait toujours une quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère; aussi, en hiver, met-on sur les poêles un vase contenant de l'eau pour rendre à l'air la vapeur d'eau qui lui manquerait bientôt,

(1) Voir ci-après : *Lumière*

par suite de la chaleur; en été, on arrose les appartements, non seulement pour leur donner de la fraîcheur, mais encore pour rendre également à l'air la vapeur d'eau qui lui manque.

Les corps organiques absorbent facilement l'eau, disons-nous. Nous avons cité (page 43) quelques exemples des phénomènes dus à l'action de l'humidité, action rendue possible par la propriété qu'ont les corps d'être *poreux*. Ajoutons un fait industriel dans lequel, sous cette même action, les corps se modifient et augmentent de volume.



Fig. 303.

HYGROSCOPE.

Pour reproduire sur bois des dessins gravés dans l'acier, on se sert d'un bois tendre, on comprime la planche d'acier sur ce bois, de manière à y produire une forte empreinte; cela fait, on lime, on rabote cette surface de bois jusqu'à ce que l'empreinte nouvellement obtenue disparaisse en totalité; puis, à l'aide d'un linge mouillé placé préalablement sur cette face limée et rabotée du bois, on passe un fer chaud. Les parties les plus comprimées sont celles qui se relèveront le plus, et alors un relief sera produit, relief en tout semblable à la planche de cuivre ou d'acier dont on se sera servi.

**HYGROMÈTRES.** — Pour mesurer l'humidité de l'air, dans le sens que nous avons dit ci-dessus, on se sert d'instruments appelés *hygromètres*. Cardan, l'un des premiers, puis le P. Mersenne, inventèrent un hygromètre. Celui de ce dernier était une simple corde à violon donnant un son plus ou moins grave, selon le degré d'humidité de l'air; mais on ne pouvait rendre comparables entre eux les instruments ainsi construits. Ce furent Molineux, Gouet, Lambert, qui construisirent des hygromètres à cordes donnant des indications non plus par le son, mais par l'allongement ou le rétrécissement de la corde, laquelle mettait en mouvement une aiguille sur un cadran ou sur une échelle graduée. On chercha aussitôt à remplacer la corde par des substances plus sensibles, et, tour à tour, on employa : Casbois, des boyaux de vers à soie; Retzius, des tuyaux de plume; Huth, des vessies de rat; Dalancé, des bandelettes de papier mince; Franklin, des fibres de bois d'acajou, etc. On se sert encore de cordes pour les *hygroscopes*, sorte d'*hygromètres* peu sensibles, et propres seulement à servir d'indication vague du temps probable.

C'est une planchette de bois (*fig. 300*) posée sur un pied et découpée en forme de capucin. Le capuchon, en carton léger, est fixé en un point

à un petit bout de corde de boyau tordu, laquelle est attachée derrière la planchette. En se tordant par la sécheresse, la corde entraîne le capuchon qui couvre la tête du personnage ; par l'humidité, elle se détord, et le capuchon se rabaisse alors sur la tête du capucin.

**HYGROMÈTRE DE SAUSSURE.**— L'hygromètre qu'en 1775 imagina B. de Saussure est encore employé de nos jours (*fig.* 301). Sur un cadre métallique ABCD se trouve une vis qui tourne sans avancer dans un collet *c* ; sur cette vis se meut un écrou ; à cet écrou est fixée, par une pince, l'extrémité d'un cheveu. En faisant mouvoir la vis, on fait monter ou descendre l'écrou. L'autre extrémité du cheveu est enroulée sur une poulie à double gorge, qui porte une longue aiguille, mobile avec elle, et se déplaçant devant un arc gradué. Sur la seconde gorge de la poulie passe un fil de soie, terminé par un poids léger, destiné à tendre le cheveu.

De Saussure recommande de choisir des cheveux fins, doux, non crépus, coupés sur une tête vivante et saine. « Il est, dit-il, inutile qu'ils aient plus de 1 pied de longueur. Pour les dépouiller de la matière huileuse dont ils sont imprégnés, il faut les coudre dans un sac de toile et les faire bouillir, pendant trente minutes, dans une lessive de carbonate de soude ; après les avoir laissés refroidir, il faut les sécher à l'air. Cette opération les rend propres à l'usage auquel on les destine. »

Pour marquer le terme de l'humidité extrême, Saussure plaçait son hygromètre sous une cloche, sur une assiette pleine d'eau ; l'air qui s'y trouve emprisonné se sature, le cheveu s'allonge et l'aiguille s'arrête à un point fixe qui s'inscrit sur le limbe. Pour déterminer le terme de la sécheresse extrême, il couvrait l'instrument avec une cloche pleine d'air qu'il desséchait en y introduisant une plaque de tôle revêtue d'un vernis fondu de carbonate de potasse : le cheveu se raccourcit, et l'aiguille s'arrête à un point invariable que l'on marque. On divise ces deux points extrêmes en 100 parties égales nommées degrés.

Cet hygromètre ne donne pas immédiatement l'état hygrométrique, et il est nécessaire de construire une table des degrés d'humidité correspondant aux indications de l'hygromètre.

En effet, dans une atmosphère à moitié saturée, l'aiguille, au lieu de marquer 50°, marque 72°, ce qui fait voir que les degrés de cet appareil sont loin d'être proportionnels aux quantités de vapeur contenues dans

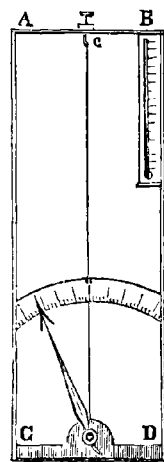


Fig. 301.

HYGROMÈTRE  
DE SAUSSURE.

l'air. Gay-Lussac a dressé des tables pour cet objet. Mais l'accord ne peut exister entre les hygromètres qu'autant que les cheveux ont été pris sur la même personne et dégraissés par la même opération : il faut donc établir une table de correspondance entre les degrés de l'hygromètre et l'état hygrométrique pour chaque instrument.

De plus, le cheveu est délicat, très facile à rompre et susceptible

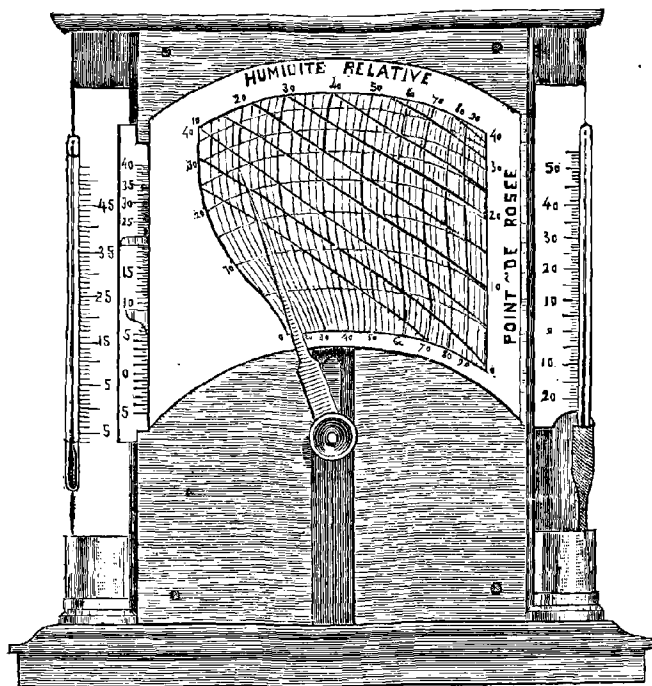


Fig. 302. — HYGROMÈTRE ENREGISTREUR DE M. REDIER.

de se détériorer. On n'accorde donc qu'une confiance très limitée aux hygromètres de Saussure.

**PSYCHROMÈTRE D'AUGUST.** — Cette espèce d'hygromètre, proposé par Leslie, étudié par Gay-Lussac et perfectionné par le docteur August, est beaucoup plus exact. On lui a donné le nom de *psychromètre* (du grec *psychros*, froid; *metron*, mesure). Ce sont deux thermomètres bien concordants et très sensibles, fixés sur une même planchette. L'un de ces instruments reste sec, tandis que l'autre a son réservoir mouillé par une étoffe de gaze toujours humectée d'eau. La température du dernier s'abaisse et il se couvre de rosée. Par la différence de température et avec des

tables dressées d'avance, on trouve la force élastique de la vapeur contenue dans l'air.

M. Redier, le savant fabricant d'instruments de météorologie, dont nous avons déjà parlé plusieurs fois, a construit un hygromètre enregistreur, dit *hygromètre de Lowe*, qui évite l'emploi de ces tables. En montant ou en descendant le bouton, on amène l'index supérieur à gauche (*fig. 302*), sur la division d'un tableau quadrillé, correspondant à la température du thermomètre sec, et, en tournant ce même bouton, on amène l'index inférieur à la division correspondant à la température du thermomètre humide. La pointe de l'index donne alors l'humidité relative, le point de rosée et la tension de la vapeur.

**HYGROMÈTRES DE LEROY, DE DANIELL, DE REGNAULT.** — Ce fut Charles Leroy, rapporte M. Hoeffler, qui, le premier, s'attacha à montrer que « la parfaite transparence d'un air saturé de vapeurs, tel qu'on le voit après une pluie, que la disparition des vapeurs aqueuses par la chaleur, que leur apparition subite par le froid, enfin que leur union intime avec l'air, malgré la différence de leur densité,

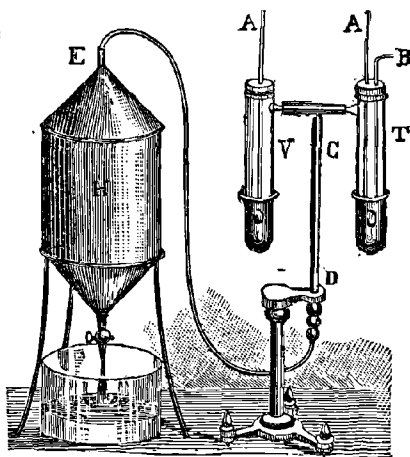


Fig. 303.

HYGROMÈTRE REGNAULT.

sont des indices certains d'une véritable dissolution ». Pour connaître la température à laquelle l'air abandonne l'eau qu'il contient, il mettait, dans un vase de verre très sec, de l'eau à la température du lieu où il se trouvait ; puis, il plaçait dans le même vase un petit thermomètre, et il jetait dans l'eau de petits morceaux de glace, jusqu'à ce que la paroi externe du vase se couvrit de gouttelettes de rosée. Il observait alors la température à laquelle cette rosée commençait à se déposer et qui devait indiquer le degré de saturation de l'air.

Sur ce principe ont été construits les *hygromètres de condensation*, dans lesquels on amène la vapeur d'eau de l'atmosphère à se condenser sur un corps artificiellement refroidi. L'hygromètre de Leroy, d'abord perfectionné par Daniell, a reçu de nombreuses modifications de M. Regnault, qui en a fait un instrument aussi exact que possible. Il nous suffira de décrire ce dernier (*fig. 303*).

Il se compose de deux tubes de verre T et V, terminés par des dés d'argent *d d*, remplis d'éther ou d'alcool et dans chacun desquels plonge

un thermomètre A. Le tube T est en communication avec l'atmosphère par un petit tube coudé B, ouvert par les deux bouts. Le récipient T communique seul par un tube CDE avec un aspirateur H, placé à une certaine distance. Lorsqu'on fait écouler l'eau de l'aspirateur H, il se produit, à travers l'éther du récipient T, un courant d'air qui l'agite et répartit uniformément la température dans les différents points de la masse. En même temps, ce mouvement active l'évaporation, et le froid produit amène bientôt un dépôt de rosée sur le dé d'argent du tube T. La surface ternie s'observe d'autant mieux, qu'on la compare avec la surface brillante du

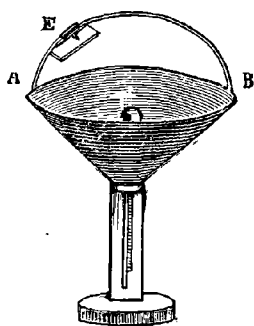


Fig. 304. — APPAREIL  
DE M. POUILLET  
pour l'étude du rayonnement  
nocturne.

second dé, dans lequel l'air ne circule pas. On note avec soin le moment précis où la surface du tube a été ternie, et la température. La tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air, à ce moment, est la même que la tension maxima de cette vapeur à la température artificielle que l'on vient d'établir. Dans la table des tensions maxima de la vapeur d'eau, on cherche celle qui correspond à la température constatée, et l'on a ainsi la tension cherchée, l'état hygrométrique.

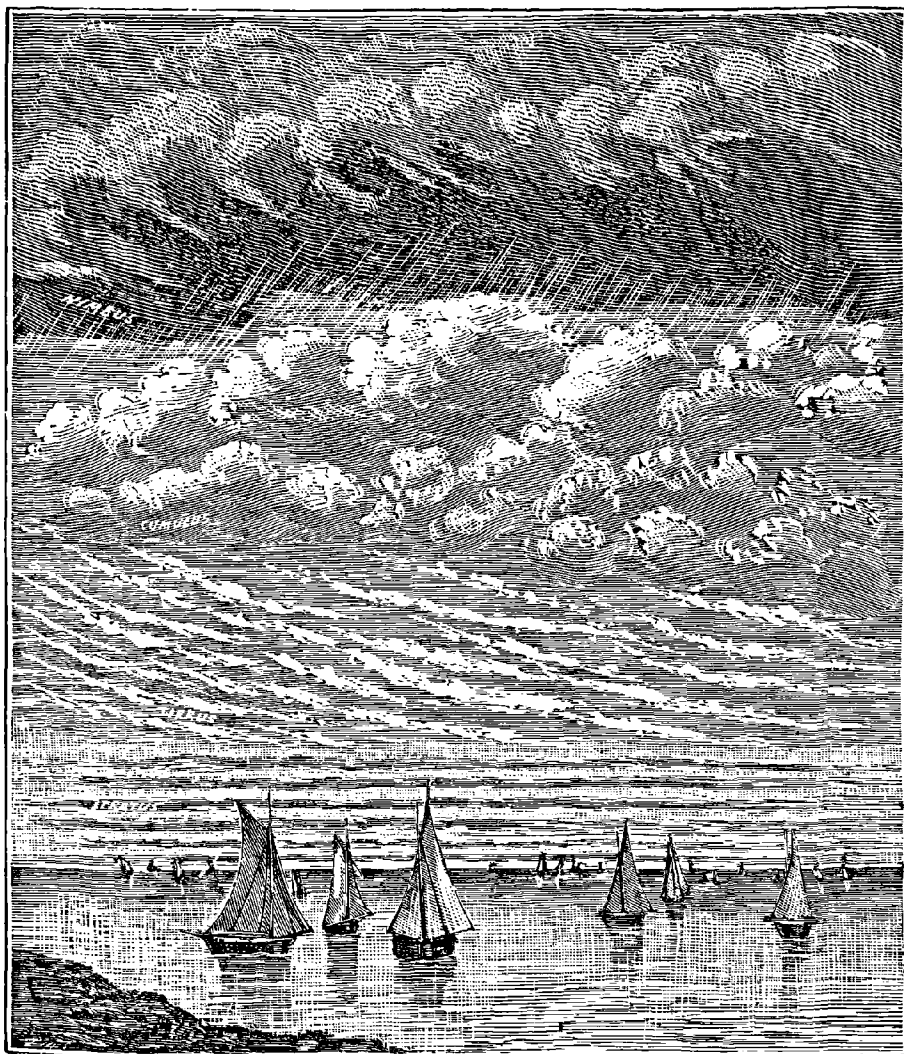
**ROSÉE, SEREIN, GIVRE, GELÉE BLANCHE.** — La rosée est due à la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, qui se dépose sur la surface des plantes, pendant la nuit. Pendant longtemps on a cru qu'elle tombait du ciel, ou qu'elle s'élevait du sol. Ce fut le docteur Wells (1) qui donna la véritable théorie de la rosée. Pendant le jour, la terre est échauffée par les rayons du soleil ; mais, pendant la nuit, sa surface rayonne vers l'espace une grande partie de la chaleur qu'elle a reçue. Il en résulte que tous les corps reposant sur le sol se refroidissent, et que bientôt la température du sol devient inférieure à celle qui correspond à la saturation de l'air. Cet air alors, en se refroidissant, laisse déposer une partie de la vapeur d'eau qu'il contient.

M. Pouillet a imaginé un appareil qui permet d'étudier ce rayonnement nocturne. Cet appareil (*fig. 304*) se compose d'un cône très évasé, formé de plaqué d'argent, dont le bord supérieur est plus élevé que la boule T d'un thermomètre. Cette feuille de métal, placée autour du thermomètre, empêche que l'air froid ne tombe sur celui-ci et ne se

(1) WELLS (William-Charles), savant américain (1753-1817), d'abord chirurgien dans l'armée hollandaise, vint à Londres, où il fut reçu membre de la Société royale.



renouvelle autour; et, en même temps, elle arrête le rayonnement terrestre. Un fil de laiton AB, fin et raide, courbé en cercle, supporte un petit écran E mobile. Dès que cet écran est au zénith, le thermomètre



Différentes sortes de nuages (page 630).

monte; plus il s'abaisse, plus le thermomètre marque une température basse. Le rayonnement nocturne, cause évidente de ces variations, est donc constaté.

Certaines circonstances influent sur la production de la rosée. Plus est

grande l'étendue du ciel auquel est exposé le corps, plus la rosée est abondante. Il faut aussi que le ciel soit pur ; car, s'il y a des nuages, il s'établit entre eux et la terre un rayonnement réciproque, qui restitue à celle-ci une grande partie de la chaleur qu'elle perd. Si l'air est agité, l'air n'aura pas le temps de se refroidir. La saison doit aussi être considérée ; le maximum de rosée a lieu au printemps et à l'automne, parce que c'est le moment de l'année où il y a la plus grande différence de température entre la nuit et le jour. Enfin, les corps dont le pouvoir émissif est plus considérable se couvrent d'une plus grande abondance de rosée.

Le *serein* est de la rosée qui se forme, pendant l'été, quelques moments avant le crépuscule. Il résulte du refroidissement des couches inférieures de l'air dont la température descend au-dessous de leur point de saturation. Il diffère de la rosée, puisqu'il résulte de la condensation des vapeurs dans l'atmosphère même et non à la surface des corps.

Lorsque la température s'abaisse au-dessous de zéro, la rosée se congèle et constitue alors le *givre* ou *gelée blanche*, connue aussi sous le nom de *gelée printanière*.

**GELÉES PRINTANIÈRES.** — Chaque année, au printemps, dit M. de Parville (1), nous traversons une véritable crise météorologique ; le public y prend garde, non qu'il soit pris plus aujourd'hui qu'hier d'une belle passion pour la météorologie, mais uniquement parce que la richesse publique est en cause, et que l'on a la bonne habitude de regarder à deux fois à tout ce qui touche de près ses intérêts. Une nuit de gelée peut compromettre une récolte, et tout le monde devient météorologiste par circonstance.

• Tous les ans, en avril et mai, nous subissons des fluctuations atmosphériques. C'est le mois de la *June rousse* ; on ferait mieux de dire : c'est la saison rousse, car, de février en mai, le thermomètre peut faire en quelques jours, en quelques heures, des sauts dangereux pour la santé publique et pour la vie des végétaux. On peut éprouver des chaleurs estivales et subir des froids d'hiver ; il suffit d'un caprice de l'atmosphère.

(1) DE PARVILLE (Henri-François PEUDEFER), un des savants les plus utiles de notre époque, où la vulgarisation des vérités scientifiques déjà acquises est presque aussi glorieuse que la découverte de nouvelles vérités. Né à Évreux en 1838, ce vaillant écrivain a rédigé successivement les Chroniques scientifiques du *Constitutionnel*, du *Moniteur*, du *Journal officiel*, du *Journal des Débats*, etc., etc. Il a publié de nombreux volumes, parmi lesquels il faut citer ses *Découvertes et Inventions modernes* ; un *Habitant de la planète Mars*, et surtout ses *Causeries scientifiques depuis 1860* (Rothschild, éditeur).

Nous avons tant de fois déjà cité cet écrivain éminent, nous le citerons si souvent encore, qu'il était de notre devoir de dire ce qu'il est, afin d'avoir une occasion de lui exprimer notre reconnaissance, écho de la reconnaissance de nos lecteurs.

L'effet n'est pas spécial à la lune d'avril et mai; mais il se montre un mois avant et un mois après l'équinoxe du printemps. Toutefois, il est plus marqué à certaines dates qu'aux autres. Il y a longtemps déjà que les observateurs ont noté un abaissement de température anormal vers le 12 février et vers le 12 mai; il est rare qu'à ces époques critiques le thermomètre ne descende pas brusquement de quelques degrés, pour remonter ensuite à sa moyenne normale.

Les professeurs Ermay, de Berlin, Brandes, de Stockholm, Petit, de Toulouse, mirent en pleine évidence cette perturbation atmosphérique, à l'aide de nombreuses observations relevées à Berlin, à Mannheim, au Saint-Gothard, à La Rochelle, à Stockholm, etc. Le fait reconnu, on essaya de l'expliquer, et quelques météorologistes admettent encore l'explication d'Ermay, que nous allons indiquer brièvement.

On sait que nous rencontrons tous les ans, vers le 12 août et le 12 novembre, des essaims d'astéroïdes, qui tombent sur la terre sous forme d'étoiles filantes (page 394). Ces astéroïdes appartiennent à deux anneaux de corpuscules décrivant leur orbite autour du soleil; en août et en novembre, la terre rencontre chacun de ces anneaux et les traverse; mais, six mois avant, en février et en mai, la collision n'a pas lieu, nous ne croisons pas ces anneaux; les astéroïdes défilent devant nous, interposant leurs masses entre le soleil et la terre. Ces corpuscules feraient donc écran vers le 12 février et vers le 12 mai, et diminueraient la quantité de chaleur qui nous arrive du soleil. De là l'abaissement de la température. Ermay allait plus loin encore. Aux mois d'août et de novembre, ces antipodes de février et de mai, le thermomètre, au lieu de baisser, monte; l'élévation de la température serait due, dans ce cas, à l'inflammation des astéroïdes qui traversent notre atmosphère. Nous serions échauffés, pendant l'été de la Saint-Martin, par ces combustibles célestes.

Cette théorie ingénieuse, en partie reprise par Mayer, depuis les progrès que la théorie mécanique de la chaleur (page 390) a imprimés à l'astronomie physique, a encore aujourd'hui de nombreux partisans.

Nous pensons cependant, ajoute le spirituel écrivain que nous citons, qu'à cette théorie bien des objections peuvent être faites. Les étoiles filantes ne jouent pas sur la terre un si grand rôle qu'elles puissent amener brusquement la gelée de nos récoltes. On a démontré que les étoiles filantes sont de véritables comètes, et que la température n'oscille pas *forcément* quand passent ces nombreux résidus cométaires, dont on a pu déjà définir le système et retrouver l'orbite. D'ailleurs, les masses de ces astéroïdes sont si petites, qu'on ne voit guère comment leur interposition entre le soleil et la terre pourrait faire écran, ni comment leur

combustion dans les hautes régions de l'atmosphère pourrait réchauffer les objets placés à la surface terrestre. Enfin, il est encore moins démontré que les variations anormales de la *lune rousse* aient leur contre-coup partout ; elles ne sont, au contraire, que spéciales à certaines latitudes. Ces oscillations paraissent se rapporter à des lois beaucoup plus générales.

En compulsant de très nombreux registres d'observations, Sainte-Claire Deville est retombé, comme ses devanciers, sur les anomalies de température de février et de mai ; mais il a trouvé, de plus, que ces oscillations se reproduisaient avec une certaine périodicité. Tous les mois, à certaines dates, il survient des perturbations plus ou moins nettes, non seulement dans la température, mais encore dans tous les phénomènes météorologiques ; la périodicité se poursuit symétriquement par groupes de mois. Ainsi, en général, les mêmes phénomènes reviendraient constamment au bout des périodes de 90 jours, 30 jours, 10 jours...

Pour nous, les déclinaisons du soleil et de la lune déplacent la limite des courants atmosphériques en latitude et en longitude, et font prévaloir, selon leur sens, soit les vents du nord, soit les vents du sud. Ainsi, en hiver, pendant les déclinaisons australes du soleil, les vents dominants sont sud-ouest ; en été, pendant les déclinaisons boréales, ils sont nord-ouest. Les déclinaisons lunaires amènent de même des déplacements dans la circulation des vents. Quand notre satellite est dans l'hémisphère austral, les vents du nord ont de la tendance à souffler ; quand il est dans l'atmosphère boréal, ce sont, au contraire, les vents du sud qui dominent.

Dans les tableaux qu'a dressés M. Sainte-Claire Deville, les fluctuations atmosphériques changent de signe avant et après chaque solstice. Les bourrasques qui amènent du froid, de janvier à juin, sont précédées ou suivies d'une élévation de température de juin à décembre. Ces faits, assez difficiles à comprendre jusqu'ici, s'expliquent facilement, au contraire, quand on connaît l'influence, sur le régime des courants, des déclinaisons solaire et lunaire. Le sens des déclinaisons est renversé, précisément, de janvier à juin et de juin à décembre, et les effets produits deviennent, par cela même, inverses...

M. Millet a eu, en 1874, l'excellente pensée de faire le relevé des observations des brouillards de mars pour chaque département et d'indiquer, par suite, la date des jours où doivent survenir les gelées blanches. Il a constaté que les brouillards les mieux caractérisés de mars s'étaient produits dans tous les départements, du 3 au 5 d'une part, et du 25 au 26 de l'autre. C'est bien la période de M. Deville : 4 mars, équilune ; 24 mars,

lunistice. Or, en mai, les dates correspondantes sont : 4 mai, lunistique ; 25 mai, équilune ; mais avec des déclinaisons lunaires renversées : en mars, déclinaison boréale ; en mai, déclinaison australe ; dans le premier cas, humidité ; dans le second, gelée. Et cette concordance se reproduit ainsi toujours de mars en mai. Le proverbe : *Brouillard en mars, gelée en mai*, n'a donc rien qui choque le bon sens.

**PRÉSERVATIF DES GELÉES PRINTANIÈRES.** — On sait que, depuis quelques années, on a reconnu qu'il était possible de protéger assez efficacement les jeunes bourgeons contre le froid, à l'aide de nuages artificiels ; on donne naissance à ces nuages au moyen de combustibles produisant une fumée intense. Quand la gelée blanche survient, il est rare que le vent souffle ; la fumée reste sur place pendant des heures. L'expérience a montré que ce moyen de préservation était généralement couronné de succès ; malheureusement, les vigneronne s'endorment souvent avec un ciel couvert ou brumeux, et se réveillent par un ciel clair ; pendant qu'ils sont sans défiance, le temps change, et le rayonnement nocturne opère son œuvre destructive. Il faudrait une sentinelle assez complaisante et assez éveillée, à toute heure de la nuit, pour avertir les propriétaires que le froid arrive et qu'il est urgent d'allumer les feux et d'engendrer les nuages protecteurs.

Un ancien conducteur des ponts et chaussées, propriétaire de vignes dans la Nièvre, M. Bouziat, a cherché à créer de toutes pièces un veilleur vigilant, qui ne soit ni en chair ni en os, qui puisse, sans fatigue, passer toutes les nuits, et qui ne réclamât aucune solde au bout du mois. Il y a réussi. Ce veilleur mécanique est la simplicité même. Non seulement il sait quand la température baisse, mais il s'amuse encore à allumer de lui-même tous les foyers répandus à l'avance dans le vignoble ; quand on l'a installé quelque part, on peut dormir tranquille ; si la gelée vient, elle trouvera le guetteur en fonctions. L'invention de M. Bouziat nous semble devoir être esquissée.

Le veilleur, c'est un thermomètre ; mais un thermomètre qui ne se briserait pas facilement. En effet, il est tout bonnement formé d'un fil de fer ou de zinc, de 2 millimètres environ de diamètre, suspendu horizontalement entre des poteaux distants l'un de l'autre de 50 à 100 mètres, et soutenus dans l'intervalle par un certain nombre de ficelles reliées à des points fixes. Si ce fil, que nous supposons en fer et de 100 mètres de longueur, était maintenu bien rectiligne, chaque différence de température de *un degré centigrade* produirait un allongement de 0<sup>m</sup>,0014 environ (page 438). Or, la tension du fil est facilement obtenue en enroulant son

extrémité sur une poulie et en la terminant par un contrepoids. La poulie porte un doigt calé sur sa circonférence ; ce doigt est un véritable indicateur thermométrique, car, si la température baisse, le fil se raccourcit, la poulie tourne et le doigt avec elle, absolument comme une aiguille barométrique tourne sur un cadran. Impossible de combiner un thermomètre plus solide, plus simple et plus exact ; car le fil, embrassant un grand espace de terrain, prend réellement la température du milieu ambiant, celui qui impressionne la vigne. Ce thermomètre est naturellement d'autant plus sensible que le fil est plus long. Voilà pour le guetteur de la gelée ; voici maintenant comment il fonctionne :

Une série d'inflamateurs sont reliés entre eux par des fils métalliques raccordés par des tirages de sonnettes, et ils sont maintenus au cran d'arrêt par un verrou. Quand la température s'abaisse assez pour devenir dangereuse, le thermomètre automoteur, en faisant tourner le doigt de la poulie, décroche le verrou ; tous les inflamateurs entrent en fonction à la fois. Chaque inflamateur se compose d'une petite bouteille renfermant du pétrole et fermée par une amorce. Le déclenchement du verrou qui maintenait l'amorce en place fait partir la poudre fulminante ; celle-ci met le feu au pétrole, et le pétrole allumé tombe dans une cuvette remplie de foin et de résine à la surface, et de goudron au fond. Ces matières s'enflamment et engendrent une fumée abondante, qui persiste généralement pendant plusieurs heures. Ce système paraît assez efficace ; il a été examiné par une commission de la Société centrale d'agriculture, et le rapport a été favorable. Dans un essai, fait le 14 mai 1876, à Vincennes, 23 feux sur 26 se sont allumés, et ils se sont maintenus environ deux heures. Les vignes qui les entouraient ont échappé complètement à la gelée, qui a partiellement frappé les autres. M. Bouziat estime le prix de revient à 42 francs par hectare.

**NUAGES. — BROUILLARDS.** — Les *nuages* et les *brouillards* sont une seule et même chose : produits l'un et l'autre par la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, ils portent le nom de *nuages* quand ils sont formés dans les régions élevées, et de *brouillards* lorsqu'ils sont près de la surface du sol.

La forme des nuages et leur hauteur les ont fait distinguer en quatre classes principales, que désigne la figure (page 625). Ce sont : les *cirrus*, appelés *queues de chat* par les marins, qui résident à de grandes hauteurs, et, dans nos pays, annoncent la pluie au bout de quelques jours ; les *cumulus* ou *balles de coton* des marins, qui sont blancs, accumulés et annoncent la probabilité des vents du sud et un temps incertain ; les *stratus*, bandes

horizontales, qui se forment généralement le soir ; les *nimbus*, nuages noirs, descendus très bas, et qui se résolvent en pluie.

Les physiciens ne sont pas d'accord sur la constitution des particules des nuages, et la cause de leur dissentiment tient à la nécessité d'expliquer comment ces corps peuvent se maintenir dans l'air. La majorité, cependant, pense que l'eau est alors sous forme de *vésicules*, de petits *globules*, semblables à des bulles de savon, et pleins d'air à l'intérieur. M. Privat-Deschanel, le savant professeur de physique du lycée Louis-le-Grand, explique ainsi la suspension dans l'air de ces vésicules pleines :

« C'est à raison de leur ténuité que les particules des nuages se soutiennent dans l'air, sans qu'il soit besoin d'avoir recours, pour l'expliquer, à une théorie spéciale, de même qu'on voit flotter dans ce fluide, quand on l'éclaire par un rayon de soleil dans une chambre obscure, une multitude de corpuscules de toute nature et de toute densité. Il est vrai que ces corps flottant continuellement dans l'atmosphère n'y sont jamais en repos ; mais il en est de même des particules des nuages. Tous ceux qui ont eu l'occasion, en voyageant dans les montagnes, de se trouver au sein même des brouillards, ont pu constater la très grande mobilité de leurs parties constitutives, qui cèdent au moindre souffle du vent et sont entraînées par lui comme une fine poussière. »

Cependant M. Jobard, le savant directeur du musée royal de l'industrie belge, physicien distingué, a présenté une autre théorie qu'il importe de faire connaître.

« L'hypothèse des vésicules aqueuses, remplies d'air, pour les besoins de la cause, dit-il, ne suffit pas à expliquer comment les nuages se soutiennent dans l'air ; car si ces vésicules sont composées d'eau et d'air confiné, leur pesanteur serait, quoi qu'on fasse, plus grande que celle de l'air ambiant. Je crois pouvoir démontrer que les vésicules ne peuvent qu'être pleines de gaz, et accolées les unes aux autres, en contact immédiat, dans les nuages, de manière à former, non pas un crible, mais une voûte inégale, continue et imperméable à la lumière et au gaz libre qui s'élève à flots des marais et des houillères, et les tient en suspension comme autant de montgolfières. La chaleur du soleil évapore l'eau, en même temps qu'elle chauffe l'air ; cet air chauffé, devenant plus léger, emporte avec lui les vapeurs d'eau, qui, sans cela, ne tarderaient pas à retomber. Ces vapeurs sont également entraînées par les bulles de gaz hydrogène qui ne cessent de s'élever de terre, d'où elles se dégagent, dans les temps chauds, par la fermentation et la décomposition des matières organiques, comme les bulles du gaz acide carbonique se dégagent du vin de champagne. Il n'est pas un moucheron mort qui ne donne naissance à quelques

bulles de gaz hydrogène ou petits ballons microscopiques. Ceux qui s'élèvent des marais entraînent surtout un peu d'humidité sur leur périphérie.

» Cette explication réhabiliterait le système des vésicules en confirmant le nôtre. Nous osons dire, sans hésiter, qu'il s'élève de terre tout autant de bulles de gaz qu'il retombe de gouttes d'eau ; et il faut que cela soit, pour rétablir le merveilleux équilibre que nous admirons sans l'avoir encore compris, parce que, si nous voyons les gouttes de pluie, nous ne voyons pas les bulles de gaz.

» Les vapeurs d'eau, entraînées dans les régions froides de l'atmosphère, se rapprochent par affinité, se pelotonnent et nous apparaissent sous ces formes cotonneuses que nous appelons nuages ; mais elles retomberaient immédiatement si le gaz hydrogène emprisonné, soit dans chaque molécule, soit dans les voûtes imperméables qui résultent de leur réunion, ne les soutenait dans ces hautes régions. »

**PLUIE.** — La *pluie* est, en effet, un assemblage de vésicules, devenues trop grosses pour flotter dans l'atmosphère, à la suite d'une condensation très active. La pluie se produit, le plus souvent, au moment même où les vapeurs se condensent dans les hautes régions de l'air ; en sorte que ce ne sont pas, en général, les nuages que l'on voit flotter dans l'atmosphère qui donnent la pluie. Le plus souvent, en s'abaissant par leur propre poids, ils traversent des couches d'air plus chaudes et s'y dissipent en vapeurs. C'est ainsi que, dans l'été et dans l'automne, au milieu du jour, la sérénité succède aux brouillards et aux nuages de la matinée, par suite du réchauffement général de l'atmosphère.

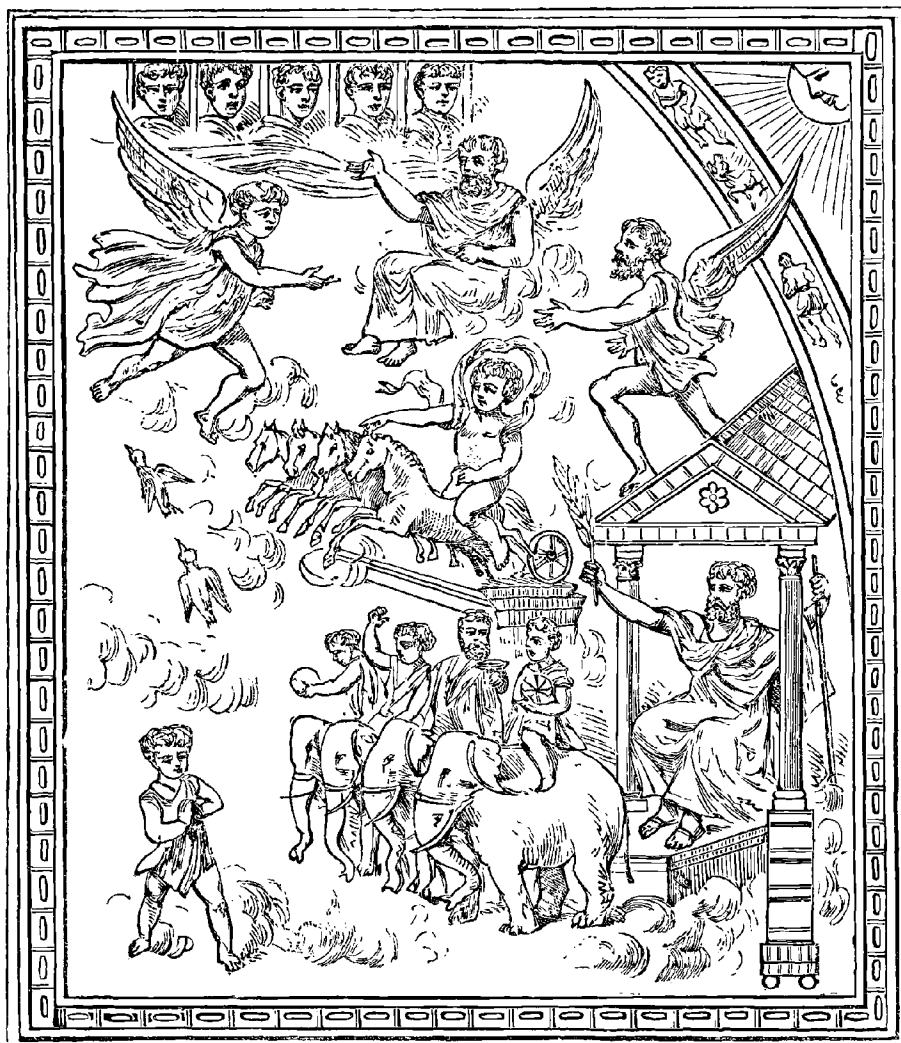
Quelles sont les causes qui influent sur la répartition des pluies dans une contrée ? M. Belgrand, ingénieur général des ponts et chaussées, directeur du service des eaux de la ville de Paris, répond nettement, dans une note à l'Académie des sciences (1) : l'altitude, le voisinage et l'éloignement de la mer, et accessoirement la topographie du sol. Le climat de la France est homogène au nord du plateau central, et, à plus forte raison, dans toute l'étendue du bassin de la Seine.

Le point pluvieux par excellence de ce bassin est le *haut Follin*, sommet le plus élevé du Morvan : 902 mètres ; la hauteur de pluie y a atteint, en 1872, 2<sup>m</sup>,681. La hauteur d'eau tombée décroît ensuite avec l'altitude : le *bas Follin*, 200 mètres ; *Pomnoy*, 650 mètres ; les *Settons*, 596 mètres, ont reçu respectivement 2<sup>m</sup>,457, 2<sup>m</sup>,121 et 2<sup>m</sup>,041 d'eau. Le

(1) *Compte rendus de l'Académie des sciences* (30 mars 1874).



vaste plateau qui forme le bassin parisien, entre la mer et le pied de la chaîne de la Côte-d'Or, est à une altitude qui ne dépasse pas 150 à 200 mètres; les vallées qui le sillonnent sont à 50 ou 100 mètres au-dessous



LES VENTS, d'après la mythologie (page 636).

de ce niveau. C'est dans la partie de ce plateau, situé à plus de 150 kilomètres de la mer, que sont situées les stations qui reçoivent la hauteur minimum de pluie. La plus petite hauteur, 575 millimètres, a été obtenue un peu à l'amont de Paris, au Port-à-l'Anglais : altitude, 33 mètres. Paris

lui-même se trouve dans cette région du minima. A 109 mètres d'altitude, à Ménilmontant, on a recueilli 0<sup>m</sup>,772 de pluie seulement. En approchant de la mer, dans le pays de Caux, à l'aval d'Elbeuf, la hauteur de pluie augmente malgré les basses altitudes. On se rapproche des nombres obtenus dans les parties montagneuses à 400 ou 500 mètres d'élévation.

Ainsi à Gournay (altitude 100 mètres), 0<sup>m</sup>,846 de pluie; à Rouen (altitude 8 mètres), 0<sup>m</sup>,848; à Caudebec (altitude 1 mètre), 1<sup>m</sup>,034; au Havre - Ingouville (altitude 89 mètres), 1<sup>m</sup>,083. Un point bas au fond de vallée, situé à peu de distance d'un plateau plus élevé, reçoit, à très peu près, autant de pluie que ce plateau.

Le nombre des jours de pluie est beaucoup plus grand au bord de la mer que dans les autres parties du bassin. Ainsi, la moyenne étant de 164 jours pluvieux pour tout le bassin, le nombre de jours de pluie a été, en 1874, à Yvetot de 223, à Fatouville de 207. C'est à peu près ce nombre qui a été relevé dans les plus hautes stations pluviométriques du Morvan.

Pour évaluer la quantité d'eau tombée dans un lieu, on se sert d'instruments appelés pluviomètres ou udomètres (du grec *udór*, eau; *metron*, mesure). L'inspection seule de la gravure permettra de comprendre en quoi consistent ces appareils. Nous représentons un

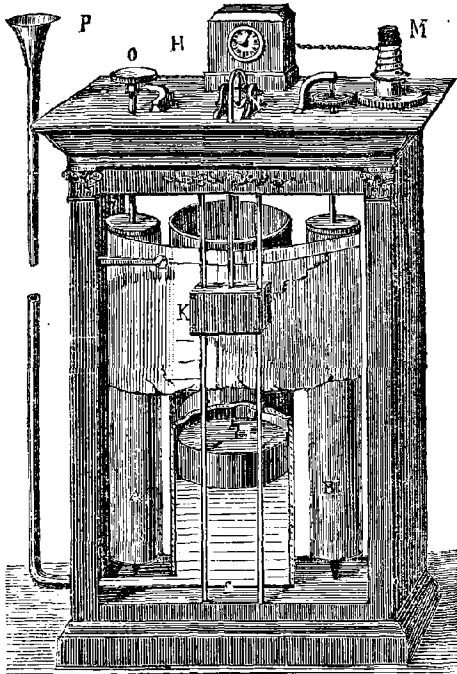


Fig. 305. — PLOUVIOMÈTRE ENREGISTREUR  
CONSTRUIT PAR M. REDIER.

P. Entonnoir destiné à recueillir la pluie. — C. Cylindre où s'accumule la pluie. — F. Flotteur. — N. Poulie très légère, montée sur des axes très fins et dont la gorge porte un fil destiné à relier le flotteur F avec la boîte K. — K. Boîte dans laquelle se trouve le crayon et un petit trembleur électrique, destiné à faire frapper de petits coups sur la tête du crayon toutes les fois que le courant passe. — A et B. Cylindres pivotant sur des pointes et pouvant se retirer à volonté, de façon à faciliter la pose du papier. — H. Horloge régularisant la marche du cylindre B. — M. Fusée régulatrice destinée à corriger l'effet produit par l'enroulement de plusieurs tours de papier. — I. Crayon servant à tracer une ligne de base pour les mesures.

de ceux auxquels ont été apportés les perfectionnements les plus récents, et qui, construit sur les données de M. Hervé-Mangon, enregistre automatiquement toutes les indications désirables.

Voici comment l'ensemble fonctionne. Le papier sans fin enroulé sur le cylindre A passe sur le cylindre C, qui fait saillie, et vient s'enrouler sur le cylindre B. Le cylindre A est tendu par un petit poids mouflé dans

la cage même de l'instrument, et le cylindre est mené par l'horloge. Si la pluie tombe, le flotteur F est soulevé, la boîte K suit le mouvement, et avec elle le crayon qui, frottant sur le papier, trace une courbe qui donne en millimètres la hauteur correspondante de pluie. Le petit trembleur électrique de la boîte K est actionné par le courant d'une horloge type, et le point marqué sur la courbe sert de point de repère pour le temps. Le rapport des sections du pluviomètre P et du tube C permet de représenter le millimètre de pluie tombée par telle grandeur que l'on veut.

**NEIGE, VERGLAS, GRÉSIL.** — La *neige* n'est pas autre chose que de la pluie congelée. Lorsque l'air est calme, la vapeur vésiculaire qui compose

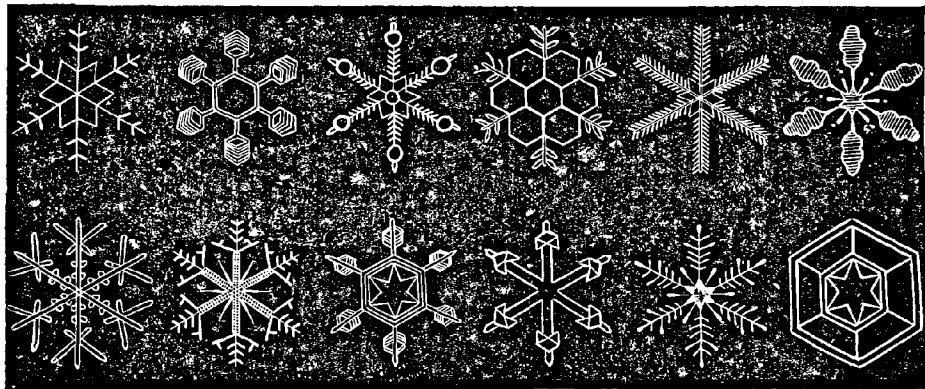


Fig. 306. — CRISTALLISATIONS DE LA NEIGE.

les nuages se cristallise en formes très régulières dès que la température de ceux-ci est descendue au-dessous de 0° (*fig. 306*). Glaisher et Scoresby ont publié des dessins de plus de 300 cristaux de glace. Pour observer ces cristaux, il faut recevoir le flocon de neige sur une lame de fer très froide et enduite de noir de fumée.

Le *grésil* est une sorte de neige dure, formée de flocons arrondis et de très petites dimensions. C'est un composé de petites aiguilles de glace opaque, qui paraît être un état intermédiaire entre la neige et la grêle. Comme on admet généralement que la grêle a une origine électrique, nous en parlerons ci-après, en traitant des orages.

**DES VENTS.** — Le vent est un mouvement plus ou moins rapide d'une masse d'air qui se transporte d'un lieu dans une autre, ce qui a lieu toutes les fois que l'équilibre de l'atmosphère est rompu.

Quand la nature et l'art leur laissent un cours libre,  
L'air est, ainsi que l'onde, ami de l'équilibre.

Est-il rompu ; soudain des nuages errants  
 Les flottantes vapeurs s'épanchent en torrents,  
 Ou leur sein se déchire et lance sur la terre  
 Les flèches de l'éclair est les traits du tonnerre.

Les vents soufflent dans tous les sens, horizontalement, verticalement, obliquement ; ils tournent sur eux-mêmes, se croisent, s'entrechoquent ; mais leur direction la plus ordinaire est parallèle à la terre.

Les Grecs ne distinguaient d'abord que deux vents : le *Boreas*, qui renfermait tous les vents qui soufflent de la bande du nord, ou demi-cercle compris entre l'occident et l'orient équinoxial, dans l'espace de 180 degrés ; et le *Notos*, qui comprenait tous les vents qui partaient de la bande du sud dans toute l'étendue de l'autre moitié de l'horizon. Ils distinguèrent ensuite les vents qui soufflaient des quatre points cardinaux, et, divisant l'horizon en portions égales de 90 degrés chacune, ils nommèrent *Boreas* les vents du nord, *Euros* ou *Apheliotes* les vents de l'est, *Notos* les vents du sud, *Zephiros* les vents de l'ouest. Du temps d'Homère, on avait déjà ajouté quatre vents secondaires, qui tiraient leurs noms de ceux entre lesquels ils étaient placés ; on les appelait : le *Boreas-Euros*, le *Notos-Apheliotes*, l'*Argestes-Notos* et le *Zephiros-Boreas*.

Cinq à six siècles avant l'ère chrétienne, on fixa les vents secondaires aux orientes et aux occidents solsticiaux, et la plupart des noms furent changés ou disposés autrement qu'ils n'avaient été jusqu'alors, et on se trouva forcé de donner à la rose des divisions inégales ; de sorte qu'à mesure que l'on avançait vers le midi, l'étendue des vents d'est et d'ouest se resserrait, tandis que ceux du nord et du midi embrassaient un plus grand espace ; le contraire avait lieu lorsqu'on se portait vers le septentrion. Les vents représentés sur la célèbre tour d'Andronicus Cyrrestès, à Athènes, qui subsiste encore, et dont parle Vitruve, paraissent appartenir à ce système.

Vers le temps d'Alexandre, on ajouta quatre nouveaux vents à la rose des vents qui fut adoptée, pendant plusieurs siècles, par les navigateurs grecs et romains ; mais, sous le règne d'Auguste, les Romains, ayant étendu leurs conquêtes dans la Germanie jusqu'à l'Elbe, au 54° degré de latitude, et dans l'Égypte jusqu'au tropique, reconnurent les inconvénients des roses divisées d'après les levers et les couchers solsticiaux, parce que, dans l'intervalle de ces contrées, les amplitudes variant de 40°,30, les vents d'est et d'ouest finissaient par prendre beaucoup trop d'espace, et se confondaient avec ceux du nord et du sud ; ils abandonnèrent cette méthode, qui n'était plus supportable, et divisèrent la rose en 24 parties de 15 degrés chacune.

Maintenant, on partage l'horizon en 32 parties, appelées *rhumbs* (mot anglais signifiant *losange*) ou *aires* des vents, que l'on obtient en partageant en deux parties égales chacun des cadrans formés par les quatre points cardinaux, et on désigne ces divisions intermédiaires par les réunions des points cardinaux entre lesquels elles sont comprises. On procède ensuite de la même façon à l'égard de ces dernières divisions, que l'on partage en deux, adoptant le même système de nomenclature.

Dans la marine, on désigne les vents par leur direction ou par la partie du vaisseau qu'ils frappent directement : *Avoir vent debout*, c'est avoir le vent contraire à la route que l'on veut suivre ; *avoir vent en poupe*, c'est *avoir vent arrière*. On appelle *vent d'amont*, *vent de terre*, celui qui vient de terre ; *vent de mer*, celui qui vient du large, etc.

Les marins divisent aussi les vents par leur vitesse relative ; de là dix nuances ou gradations qui ont chacune leur dénomination particulière : *brise légère*, *petite brise*, *jolie brise*, *bonne brise*, *vent frais*, *grand vent*, *vent impétueux*, *coup de vent*, *tempête* et *ouragan*.

La direction du vent est constatée au moyen d'appareils, dont le plus simple est la *girouette* ; la vitesse, au moyen des *anémomètres* (du grec *anemos*, vent ; *metron*, mesure). Comme aujourd'hui ces appareils, disposés pour enregistrer leurs indications, sont basés sur l'emploi de l'électricité, nous en parlerons seulement en traitant cette partie de la physique.

Ce n'est qu'en avançant vers la mer équinoxiale que l'on rencontre dans les vents une constance, une régularité qui se prête à l'observation. Dans ces contrées, les vents soufflent toute l'année dans la même direction, et transportent doucement et sans violence les navires de la côte de l'ancien monde à celle du nouveau. Ce sont ces vents qui portent les noms de *vents généraux*, de *vents alizés*, et qui remplissaient d'étonnement les compagnons de Christophe Colomb ; la direction constante de ces vents semblait leur barrer à jamais le retour.

La différence entre le jour et la nuit détermine les *brises journalières*, soit sur les côtes ou à l'intérieur des continents ; et la différence de température entre les saisons extrêmes détermine les *moussons*.

Les saisons à leur tour, dans leur vicissitude,  
 Nous ramènent un air ou plus doux ou plus rude,  
 Et les vents inconstants, en dépit des climats,  
 Redoublent les chaleurs ainsi que les frimas.

Pour expliquer les phénomènes des vents, il importe avant tout de se rappeler de quelle manière se comportent deux portions contiguës de l'atmosphère, si elles viennent à être inégalement échauffées.

Nous avons parlé (page 455) de l'expérience due à Franklin, par laquelle au moyen d'une bougie allumée, placée dans le haut, puis dans le bas d'une porte, on constatait, en bas, la présence d'un courant d'air froid vers la pièce chaude, et en haut, d'un courant d'air chaud vers la pièce froide, tandis qu'au milieu l'air semblait stationnaire. Il se passe quelque chose d'analogue à la surface de la terre. Lorsqu'il y a une cause d'échauffement en l'un de ses points, la colonne d'air superposée s'élève, un courant inférieur se dirige vers la partie chaude, et la colonne d'air échauffée fournit un courant d'air supérieur ayant un mouvement inverse. Ce sont les *brises de mer* et les *brises de terre*. Tous les jours, à partir de neuf à dix heures du matin, il s'élève, sur le bord de la mer, un vent soufflant de la surface liquide vers la terre; ce vent, qui est la *brise de mer*, rafraîchit l'atmosphère pendant la plus grande partie de la journée, jusque vers cinq ou six heures du soir. A partir de neuf heures du matin, la température de la côte commence à dépasser la température moyenne, qui est toujours à peu près celle de la mer; l'air qui repose sur celle-ci souffle sur la terre. Mais, après neuf heures du soir, au contraire, la température de la côte est retombée au-dessous de la moyenne, l'air reflue de la terre vers le mer. Ainsi, à la brise de mer ou du matin, succède chaque jour, après quelques heures de calme, la brise du soir ou de terre. Les marins profitent de ces deux vents pour entrer dans les ports ou pour en sortir.

Ces brises ne se font sentir qu'à une petite distance des côtes; elles sont remplacées en mer par les *moussons*, qui soufflent six mois dans un sens et six mois dans un autre. Dans l'hémisphère boréal, la mousson du printemps commence en avril et la mousson d'automne en octobre; dans l'hémisphère austral, où les saisons sont contraires, la mousson d'automne commence en avril et la mousson du printemps en octobre. Il règne un calme plus ou moins prolongé entre deux *moussons* contraires; cette époque est sujette aux tempêtes et dangereuse pour la navigation.

L'équateur possédant une température constamment plus élevée que les autres points de notre globe, il en résulte que, des deux hémisphères, doivent affluer vers l'équateur deux courants inférieurs. Ces courants rencontrent des couches animées d'une vitesse croissante dans le sens de l'est à l'ouest, à cause du mouvement de rotation diurne de la terre; car l'air qui était sur un parallèle de plus petit rayon, venant à rencontrer l'air placé sur un parallèle de plus grand rayon, marche moins vite qu'il ne devrait pour suivre notre globe dans son mouvement, et il doit, par conséquent, paraître se mouvoir en sens contraire du mouvement *diurne*.

Les vents alizés (du vieux mot français *alis*, régulier) résultent des deux effets ci-dessus. Comme les causes qui les produisent sont constantes, ils ont lieu en toute saison, dans la direction du nord-est pour l'hémisphère boréal, et dans celle du sud-est pour l'hémisphère austral.

Contrairement au courant inférieur, le courant supérieur, en s'éloignant des régions équatoriales, rencontre des couches d'air animées d'une moindre vitesse, dans le sens du mouvement diurne. Il en résulte que le retour des vents alizés donne lieu, dans les zones tempérées, à un vent qui souffle du sud-ouest pour l'hémisphère boréal et du nord-ouest pour l'hémisphère austral. C'est pour cela que le vent du sud-ouest est le plus fréquent à Paris.

Les vents extraordinaires qui se font sentir sur les côtes de Guinée, sur celles de la Barbarie, en Égypte, dans l'Arabie, dans la Syrie, dans les steppes de la Russie méridionale, et même jusqu'en Italie, sont dus, comme nous l'avons expliqué, à la haute température de l'intérieur de l'Afrique. Ces vents, accompagnés de circonstances étranges, sont connus sous les noms d'*Harmattan*, de *Semoun* ou *Samiel*, de *Chamsin*, etc.

L'*Harmattan* souffle trois ou quatre fois par saison, de l'intérieur de l'Afrique vers l'océan Atlantique ; la durée de ce vent, qui n'a qu'une force modérée, est ordinairement de un ou de deux jours, quelquefois de cinq ou six. Lorsqu'il souffle, il s'élève toujours un brouillard d'une espèce particulière et assez épais pour ne donner passage, à midi, qu'à quelques rayons rouges de soleil. Son caractère le plus tranché est une extrême sécheresse. Lorsqu'il a quelque durée, les yeux, les lèvres, le palais de ceux qui sont soumis à son influence deviennent secs et douloureux, et, s'il dure quatre ou cinq jours, il fait peler les mains et la face. Pour prévenir ces accidents, on se frotte tout le corps avec de la graisse.

Il souffle : tout se fane et tout se décolore ;  
 La fleur craint de s'ouvrir et le bouton d'éclorre ;  
 Le midi de ses feux enflamme le matin,  
 La terre est sans rosée et le ciel est d'airain ;  
 Les monts sont dépouillés ; de la plaine béante  
 La soif implore en vain une eau rafraîchissante...  
 A peine avec effort la nymphe du ruisseau  
 De ses cheveux tordus tire une goutte d'eau.  
 Plus d'amour, plus de chants : le coursier, moins superbe,  
 En vain d'un sol brûlé sollicite un brin d'herbe,  
 Le cerf au pied léger repose au fond des bois ;  
 Partout l'air accablant pèse de tout son poids ;  
 L'homme même succombe, et son âme affaîssée  
 Sent défaillir sa force et mourir sa pensée.

Malgré ces terribles effets, il paraît que l'*Harmattan* n'est pas du tout insalubre ; au contraire, les fièvres intermittentes, par exemple, sont radicalement guéries à son premier souffle.

Le *Semoun* ou *Samiel*, vent violent et empoisonné du désert, vient du sud-est. Des tourbillons, des espèces de trombes se joignent fréquemment à ce vent, et enlèvent dans les airs, jusqu'à une grande hauteur, des masses de sable qui donnent à l'atmosphère une couleur rouge, jaune orange et même bleuâtre, suivant l'espèce de teinte du terrain.

Le *Chamsin* dure cinquante jours, ainsi que l'indique son nom en arabe ; il commence environ 25 jours avant l'équinoxe du printemps pour finir 25 jours après ; il est très remarquable par sa température élevée.

Le *Siroco* d'Italie et le *Solano* d'Espagne sont les principaux vents qui soufflent sur l'Europe ; ils jettent les habitants dans un grand état de langueur par la chaleur énervante qu'ils apportent avec eux.

Dans les savanes de l'Amérique du Sud, le *Pampero*, vent terrible du sud-ouest, est aux Pampas ce que le Semoun est au Sahara. Il s'annonce également par des signes exceptionnels, auxquels l'œil exercé de l'indigène ne se trompe jamais.

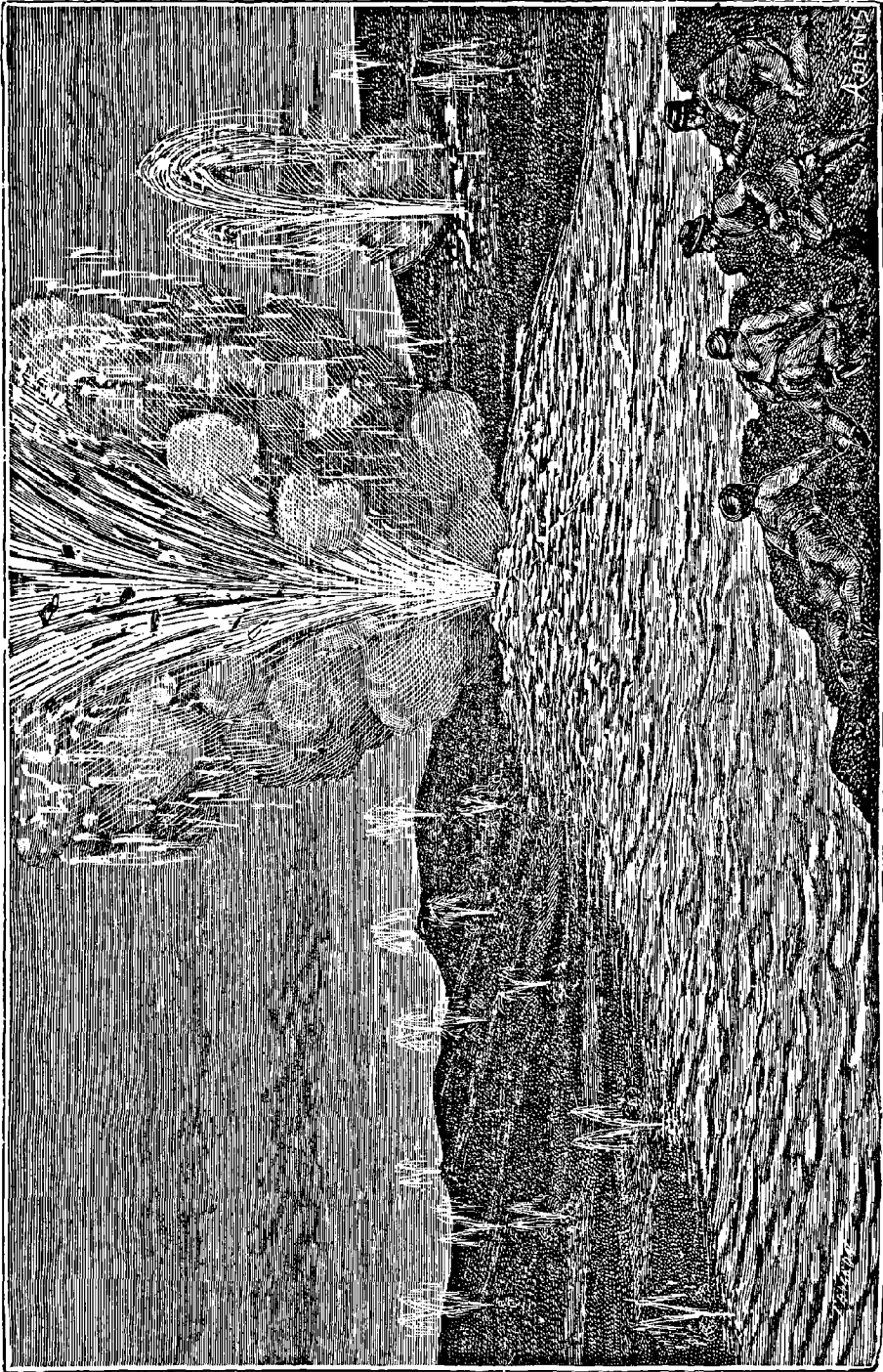
**DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE DU GLOBE.** — La température de l'air n'est évidemment pas la même sur tous les points de la surface du globe. Les causes principales de ces différences sont :

1° *Influence de la latitude.* — On sait que la *latitude* est la distance d'un lieu à l'équateur, comptée sur le méridien de ce lieu ; qu'elle se compte de 0° aux pôles jusqu'à 90° à l'équateur ; qu'elle est dite *septentrionale* dans l'hémisphère boréal et *méridionale* dans l'hémisphère austral. Ainsi, Paris est à 48° 50' 14" de latitude septentrionale. Or, il est clair que plus les rayons solaires, en tombant sur le sol, sont obliques, moins ils chauffent. C'est une conséquence des principes de la chaleur rayonnante, et la différence des saisons est due à la différence d'obliquité des rayons solaires et non au plus ou moins d'éloignement du soleil. L'action de cet astre est donc de plus en plus forte à mesure que l'on s'avance vers les régions tropicales. Cette influence est la plus considérable. M. de Humboldt a trouvé qu'en Europe le décroissement de la température était de 0°, 5, pour 1 degré de latitude.

2° *Influence de l'altitude.* — Cette influence, que démontre la présence des neiges sur les sommets élevés, aussi bien dans nos climats que dans les régions équatoriales, tient à des causes diverses. L'air moins dense absorbe une proportion moindre des rayons solaires ; il n'éprouve pas l'action échauffante du sol, comme sur la surface de la terre ; l'évaporation



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Les Geysers (page 647).



est plus intense et, conséquemment, cause de froid ; le rayonnement est plus facile à travers une atmosphère plus rare, etc. Cependant, comme ce décroissement de température dépend de causes nombreuses, il n'a point encore été trouvé, malgré les expériences de Gay-Lussac, de Barral et Bixio, une loi précise qui lie la variation de la hauteur avec la diminution de température. Toutefois, on admet, en moyenne, que le thermomètre baisse de 1° pour chaque élévation de 190 mètres ; mais cela est à peine approximatif, et l'on ne peut encore se rendre parfaitement compte des différences de limites des neiges éternelles.

3° *Influence du voisinage des mers.* — La température de la mer, en un même lieu, est à peu près constante, parce que la chaleur spécifique de l'eau est très élevée, ce qui fait que de très grandes quantités de chaleur modifient faiblement sa température. D'abord, en effet, les mouvements continuels de l'Océan font que les variations de température doivent se répartir sur d'énormes masses. Puis une élévation de température de l'air au contact de la mer produit une évaporation active, conséquemment une absorption considérable de chaleur latente ; et si la température de l'air s'abaisse, il y a condensation de vapeur et, par suite, constitution de chaleur latente. La mer restant à la même température, l'air de l'atmosphère s'en suit. Enfin, la grande découpure des côtes est encore une cause de constance, parce que l'influence de la mer s'y fait sentir davantage encore.

4° *Influence de l'orientation des côtes.* — Les brises périodiques qui, le matin, soufflent de la terre à la mer et le soir en sens opposé, modifient la température de l'atmosphère.

5° *Influence de la nature du sol.* — Les terrains humides subissent peu cette influence, d'abord parce qu'ils contiennent de l'eau dont la chaleur spécifique est bien plus élevée que celle du sol ; puis, parce qu'une portion de l'humidité se vaporisant, il y a beaucoup de chaleur absorbée à l'état latent. Mais les sols bons conducteurs s'échauffent moins, parce qu'ils gardent la chaleur qu'ils absorbent ; les plus denses perdent plus lentement la chaleur qu'ils possèdent.

6° Enfin *l'inclinaison du sol et son orientation* influent sur la température du lieu, selon qu'il reçoit plus ou moins directement les rayons du soleil.

**TEMPÉRATURE MOYENNE D'UN LIEU.** — Les météorologistes de quelques-uns des principaux observatoires de l'Europe ont observé, pendant plus ou moins longtemps, le thermomètre à chacune des vingt-quatre heures de la journée ; ils en ont pris la moyenne. En prenant ensuite la

moyenne des 30 températures quotidiennes moyennes d'un mois, ils ont eu la température moyenne mensuelle. Continuant ainsi pour une année, ils ont eu la température moyenne annuelle. En additionnant successivement les moyennes d'un grand nombre d'années consécutives et en divisant leur somme par le nombre des années, ils ont obtenu enfin ce que l'on admet généralement comme la *température moyenne d'un lieu*. Ainsi la température moyenne de Paris, calculée de 1806 à 1870, est de  $10^{\circ},67$ . Voici quelques autres nombres.

Calcutta . . . . .	$28^{\circ},5$	Bruxelles . . . . .	$10^{\circ},3$	Christiania . . . . .	$5^{\circ},0$
Mexico . . . . .	$16^{\circ},3$	Londres . . . . .	$9^{\circ},8$	Saint-Petersbourg..	$3^{\circ},5$
Madrid . . . . .	$14^{\circ},3$	Berlin . . . . .	$9^{\circ},0$	Cap Nord . . . . .	$0^{\circ}$
Constantinople . . .	$10^{\circ},3$	Copenhague . . . . .	$7^{\circ},6$	Groenland . . . . .	$-8^{\circ}$

**EXTRÊMES DE TEMPÉRATURE.** — Il est évident que les températures extrêmes observées dans différents lieux ont, en plus de la température moyenne, une grande influence. C'est en janvier, dans nos climats, rapporte M. Lévy, dans son *Histoire de l'air*, que tombent les jours les plus froids de l'année, principalement vers les 2, 3, 7 et 10 du mois. Le froid le plus vif observé à Paris a été de  $23^{\circ},5$  au-dessous de zéro. La température la plus basse observée en France a été de  $-31^{\circ},3$ , à Pontarlier. Voici les températures les plus basses officiellement constatées en Europe :

Angleterre : Londres (1796) . . .	$-20^{\circ},6$	Russie : Moscou (1836) . . . . .	$-43^{\circ},7$
Belgique : Malines (1823) . . . .	$-24^{\circ},4$	Allemagne : Brême (1783) . . . . .	$-35^{\circ},6$
Suède : Calix . . . . .	$-55^{\circ}$	Italie : Turin (1755) . . . . .	$-17^{\circ},8$

La plus basse température observée sur notre globe a été de  $-59^{\circ}$ , à Iakoutsk (Asie), en 1829. En Afrique, le thermomètre ne descend presque jamais au-dessous de zéro; si l'on a pu observer à Alger un minimum de  $-2^{\circ},5$ , il faut dire qu'à l'île Bourbon, dans la Gorée, les minima observés s'élèvent encore à  $15^{\circ}$  au-dessus de zéro.

La température la plus élevée qu'on ait observée en France a été de  $41^{\circ},4$ , à Orange, en 1849. Voici le tableau des températures maxima de l'Europe.

Angleterre : Londres (1852) . . . .	$35^{\circ},0$	Allemagne : Stuttgart . . . . .	$39^{\circ},4$
Belgique : Malines (1824) . . . . .	$38^{\circ},8$	Grèce : Athènes . . . . .	$40^{\circ},0$
Suède : Stockholm (1805) . . . . .	$37^{\circ},5$	Italie : Naples (1807) . . . . .	$40^{\circ},0$
Russie : Varsovie (1826) . . . . .	$38^{\circ},8$	Portugal : Lisbonne . . . . .	$38^{\circ},8$

La plus grande chaleur qu'on ait observée sur notre globe a été de  $56^{\circ},2$ , à Moursouk (Afrique).

**CLIMATS.** — « L'expression *climat*, dit de Humboldt, sert à désigner » l'ensemble des variations atmosphériques qui affectent nos organes » d'une manière sensible: la température, l'humidité, les changements » de pression atmosphérique, le calme de l'atmosphère, les vents, la ten- » sion plus ou moins forte de l'électricité atmosphérique, la pureté de » l'air, ou la présence de miasmes plus ou moins délétères, enfin le degré » ordinaire de transparence et de sérénité du ciel. »

Quoique cette définition soit fort juste, on désigne surtout par le mot *climat* certaines zones ou régions, caractérisées par leur température moyenne et par leurs températures extrêmes. On les divise en *climats constants* ou *marins*, c'est-à-dire ceux qui, peu éloignés de la mer, ne présentent que peu d'écart entre les températures extrêmes de l'été et de l'hiver, et en *climats continentaux* ou *extrêmes*, ceux qui, au contraire, offrent de grandes différences. Le tableau suivant présente quelques exemples de ces deux sortes de climats :

CLIMATS MARINS.				CLIMATS CONTINENTAUX.			
	Hiver.	Été.	Diffé- rence.		Hiver.	Été.	Diffé- rence.
Iles Feroë (Danemark). . .	4°,90	14°,60	6°,70	Saint-Petersbourg (Russie).	— 8°,70	15°,96	23°,66
Ile Unst (une des Sethland).	4°,05	14°,92	7°,87	Moscou (Russie) . . . . .	—10°,22	17°,55	27°,77
Ile de Man (mer d'Irlande).	5°,59	15°,08	9°,49	Slatoust (Russie) . . . . .	—16°,49	16°,08	32°,57
Penzance (Angleterre) . . .	7°,04	15°,83	8°,79	Irkoutsk (Sibérie) . . . . .	—17°,88	16°,00	33°,88
Helston (Angleterre).. . . .	6°,19	16°,00	8°,81	Iakoutsk (Sibérie) . . . . .	—38°,90	17°,20	56°,10

**LIGNES ISOTHERMES, ISOTHÈRES, ISOCHYMÈNES.** — Les lignes *isothermes* (du grec *isos*, égal; *thermos*, chaleur) sont des lignes idéales reliant tous les lieux dont la température moyenne est la même.

Les lignes *isothères* (du grec *isos*, égal, et *theros*, été) sont les courbes qui relient tous les lieux dont la température moyenne est la même en été, et les lignes *isochymènes* (du grec *isos*, égal, et *cheimon*, hiver), celles qui relient les lieux ayant la même température en hiver. La connaissance de ces courbes, qui appartient à la géographie, est importante en agriculture pour prévoir les limites des diverses cultures.

**CHALEUR INTÉRIEURE DU GLOBE.** — La température du sol varie à différentes profondeurs et suit naturellement celle de l'air; mais ces variations de température sont en retard sur les variations de la surface. A une

certaine profondeur, qui n'est pas la même (24 ou 27 mètres dans les pays tempérés, 0<sup>m</sup>,50 seulement sous les tropiques), la température devient constante; c'est ce qu'on appelle la *couche invariable*. A Paris, dans les caves de l'Observatoire, à 27<sup>m</sup>,60 de profondeur, existe la couche invariable, et la température constante y est de 11°,82. Un thermomètre qui y fut placé par Lavoisier, en 1783, marque toujours, depuis ce temps, la même température.

Au-dessous de la couche invariable, la température va en augmentant d'une manière continue avec la profondeur. Des expériences il résulte que la température croît de 1 degré par 33 mètres environ. En supposant que cette progression se maintienne, on atteindrait 200° à 6,000 mètres de profondeur, ce qui conduit à admettre que toute la masse intérieure du globe est en fusion. Cette conclusion est d'ailleurs généralement admise par les géologues, et les volcans nous donnent, en quelque sorte, une preuve de cette existence de matières à l'état de fusion ignée au sein de la terre.

**VOLCANS.** — Anciennement, on nommait *Vulcanie* une des îles Ioniennes, près de la Sicile. Cette île est couverte de rochers, dont le sommet vomissait des tourbillons de flamme et de fumée. C'est là que les poètes avaient placé la demeure habituelle de Vulcain, le dieu du feu, dont cette île a pris le nom; car on l'appelle encore aujourd'hui *Volcano*, d'où est venu le nom de *Volcan*, appliqué à toutes les montagnes qui jettent du feu.

Les éruptions volcaniques s'annoncent habituellement par des bruits souterrains et par l'apparition de la fumée qui sort du cratère; peu à peu, ces bruits redoublent, la terre tremble, la fumée s'épaissit, s'élève en colonne, et sa partie supérieure forme une cime touffue et épanouie, ou se disperse dans les airs en épais nuages, qui couvrent de ténèbres toute la contrée d'alentour. Bientôt ces colonnes et ces nuages sont traversés par des sables embrasés et des matières incandescentes, qui sortent avec explosion du volcan, s'élèvent rapidement dans les airs à de grandes hauteurs, et retombent ensuite sous la forme de pluie de cendres ou de pierres. Alors, au milieu de ces convulsions, s'échappent des torrents d'un liquide rouge de feu; ils sillonnent les flancs de la montagne, surmontent tous les obstacles, renversent toutes les barrières, et ne s'arrêtent que lorsque le refroidissement des matières leur a fait perdre leur fluidité.

Il existe aussi des volcans nommés *salses*, dont les éruptions sont constamment vaseuses, quoique précédées d'ailleurs des mêmes phénomènes que présentent les autres volcans.

Il résulte, des connaissances acquises jusqu'à ce jour, que les foyers

des volcans doivent être situés à de grandes profondeurs, au-dessous de toutes les masses minérales connues ; cela est indiqué par la position immédiate de plusieurs cratères sur les roches les plus anciennes, et les fragments de ces mêmes roches, qui sont souvent rejetés dans les éruptions. D'ailleurs, les produits des éruptions sont composés de substances qui entrent dans la composition des roches inférieures. On admet donc généralement que la cause des éruptions volcaniques est le grand phénomène du refroidissement du globe, dont la croûte solide pèse sur la matière en fusion qui se trouve au-dessous d'elle et la force de s'échapper par les ouvertures volcaniques. L'arrivée de l'eau de mer dans les cavités où se trouve la lave, l'accumulation des feux souterrains sur certains points, concourent à la production de ces phénomènes. Il est très important de remarquer que les matières lancées par les bouches volcaniques sont sensiblement de même nature et de même composition. La fumée est en grande partie composée de vapeurs aqueuses chargées de gaz sulfureux, hydrogène, acide carbonique et d'une certaine quantité d'azote. Les cendres sont pulvérulentes, grises et très fines ; c'est la matière des laves dans un état de division extrême ; elles font pâte avec l'eau, prennent une certaine consistance et forment ce qu'on appelle le *tuf volcanique*.

**LES GEYSERS.** — Nous donnerons, pour terminer ce chapitre, la description d'un phénomène naturel, application des lois de la chaleur, que jadis on attribuait à des causes mystérieuses, et que la science explique clairement aujourd'hui : les *Geysers*.

Les sources d'eau chaude, d'après M. Malte-Brun, sont une curiosité de l'Islande ; mais elles n'ont pas toutes le même degré de chaleur. Celles dont les eaux tièdes sortent aussi paisiblement que des sources ordinaires s'appellent *laugar*, c'est-à-dire bains. Les autres, qui lancent à grand bruit les eaux bouillantes, sont nommées *chaudières*, en islandais *hverer*. La plus remarquable de ces sources est celle nommée *Geysir*, qui se trouve près de *Shalholt*, au milieu d'une plaine où il y a environ quarante autres sources moins considérables ; son ouverture est du diamètre de 6 mètres, et le bassin dans lequel elle se répand en a 16 et 23 de profondeur. L'archevêque de Troil a vu la masse d'eau s'élever à 25 mètres, le docteur Lind à 30. La colonne d'eau, environnée d'une épaisse fumée, retombe sur elle-même et se termine par une large girandole.

Une autre source s'est ouverte pour rivale au *Geysir*, c'est le *Strockur*. Il est situé à environ cinquante pas du grand *Geysir* et il paraît avoir avec lui la plus grande connexion. Le *Geysir* ne jaillit pas régulièrement ; il est soumis à l'influence de la pluie, du vent, des saisons.

« Nous avons, rapporte un voyageur, établi notre tente entre les sources  
 » mêmes, afin de voir l'éruption de plus près, et nous l'attendions avec  
 » impatience dès le moment de notre arrivée. Le jour, nous craignons de  
 » nous écarter; la nuit, nous veillions chacun notre tour, afin de donner  
 » le signal à nos compagnons de voyage... Enfin, après deux jours d'at-

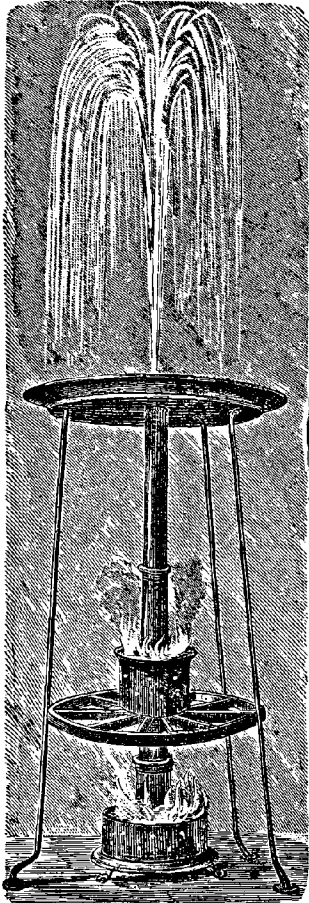


Fig. 307.

THÉORIE DES GEYSERS.

» tente, nous fimes jaillir le Strockur en y fai-  
 » sant rouler une quantité de pierres et en  
 » tirant des coups de fusil. L'eau mugit tout  
 » à coup, comme si elle eût ressenti, dans ses  
 » cavités profondes, l'injure que nous lui fai-  
 » sions; puis elle s'élança par bonds impé-  
 » tueux, rejetant au dehors tout ce que nous  
 » avions amassé dans son bassin, et couvrant  
 » tout le vallon d'une nappe d'écume et d'un  
 » nuage de fumée. Les flots montaient à plus  
 » de 27 mètres au-dessus du puits; ils étaient  
 » chargés de pierres et de limon. Une vapeur  
 » épaisse les dérobaît à nos regards; mais,  
 » en s'élevant plus haut, ils se diapraient aux  
 » rayons du soleil et retombaient par longues  
 » fusées, comme une poussière d'or et d'ar-  
 » gent. L'éruption dura environ vingt minutes,  
 » et, deux heures après, le Geyser frappa la  
 » terre à coups redoublés et jaillit à grands  
 » flots, comme l'eau du torrent, comme l'écume  
 » de la mer quand le vent la fouette, quand  
 » la lumière l'imprègne de toutes les couleurs  
 » de l'arc-en-ciel. »

La surface des eaux du bassin du Geyser est à la température de 100° centigrades; à 40 mètres de profondeur, elles indiquent 104°, à 20 mètres, 124°.

La théorie des *Geysers* est due à Bunsen, et il a imaginé une expérience qui en reproduit le principal effet, au moyen de l'appareil suivant (fig. 307) :

Un tube de fer de 2 mètres de longueur, plein d'eau et surmonté d'un bassin, est placé verticalement au-dessus d'un fourneau. Un second fourneau, formé d'une grille annulaire, est disposé 0<sup>m</sup>,60 plus haut. L'eau, chauffée à une température suffisante, s'élança dans l'atmosphère, retombe dans le bassin, rentre dans le tube, et, après quelques petites



détonations, rentre en repos. Le phénomène se reproduit, semblable, quelques instants après : c'est là ce que l'on remarque dans les Geysers.

Voici ce qui se passe. L'eau située au fond du tube doit bouillir sous



Salomon de Caus à Bicêtre.

(d'après le tableau du peintre Lecurieux) [page 656].

la pression de l'atmosphère, augmentée de la pression d'une colonne d'eau de 2 mètres, et, par suite, à la température de  $105^{\circ}$ . L'eau située à  $0^{\text{m}},60$  au-dessus, n'ayant à vaincre que l'atmosphère et une colonne d'eau de  $1^{\text{m}},40$ , doit bouillir à  $103^{\circ}$  environ. Mais si, lorsqu'elle va atteindre cette tempéra-

ture, elle cesse de supporter une telle pression, par exemple si on supprime la colonne de 1<sup>m</sup>,40, cette eau se convertit instantanément en vapeur, en descendant à 100°. On sait, en effet, que telle est la température d'ébullition de l'eau sous la pression ordinaire d'une atmosphère. Concevons donc l'eau portée presque à 103°, au point chauffé par la grille annulaire, et celle du fond mise en ébullition à 105°; la vapeur produite va soulever la colonne d'eau dans toute la longueur du tube, le bassin se remplira et la couche d'eau à 103° sera poussée vers le haut; elle supportera donc une colonne d'eau inférieure à 1<sup>m</sup>,40 et se réduira brusquement en vapeur. Cette vapeur achèvera de chasser l'eau du tube, et, à cause de la vivacité de l'effet, l'eau sera projetée au-dessus du bassin; on aura un jet d'eau mêlée de vapeur. Ce jet se refroidira dans l'air et retombera dans le bassin en gouttes liquides, qui refroidiront ensuite la vapeur restée dans le tube; toute l'eau du bassin se précipitera dans l'appareil comme dans le vide, avec un choc assez violent; quelques bulles de vapeur pourront se former au contact des parois chaudes, mais elles seront immédiatement condensées au contact des couches d'eau froide, et tout cela occasionnera de petites détonations avant le retour du repos. Les sources de chaleur, continuant à agir, rétabliront la colonne d'eau dans le même état que précédemment; une nouvelle éruption aura lieu, et ainsi de suite.

Telle est l'image des Geysers.

M. Bunsen a mesuré les températures de l'eau du grand Geysier à diverses profondeurs, et il a vu qu'elles décroissaient régulièrement de bas en haut. Il suffirait que la couche située à 9 mètres, et qui était à 2 degrés seulement au-dessous de la température d'ébullition, fût soulevée de 2 mètres pour entrer en ébullition et projeter au dehors toute la colonne d'eau supérieure. Or, la cause de ce soulèvement est dans la force élastique des vapeurs qui arrivent au fond du puits, amenées par les canaux souterrains des profondeurs volcaniques où elles sont formées.

Cette théorie explique parfaitement toutes les particularités des Geysers. On voit donc qu'il viendra un moment où, par suite de l'augmentation de la longueur du tube, la colonne d'eau sera assez haute pour arrêter toute ébullition; la vapeur souterraine trouvera alors une autre issue et le Geysier s'éteindra.

## CHAPITRE XI

## MACHINES A VAPEUR

**PRINCIPES.** — Au XIX<sup>e</sup> siècle, la science a pour caractère essentiel de tendre à des fins pratiques, et d'y tendre pour le bien du plus grand nombre. Tel est le trait saillant qui distingue sous ce rapport notre époque de toutes les époques antérieures. Jamais l'esprit scientifique n'avait reçu de telles impulsions. La science, aujourd'hui, a centuplé les forces de l'industrie ; mais aussi il faut remarquer combien les principes de la sociabilité contemporaine ont réagi jusque dans la sphère des sciences positives. Dans sa lutte contre les obstacles dont l'entoure le monde physique, l'homme n'a remporté ses victoires que le flambeau de la science à la main.

C'est pourquoi, lorsqu'une découverte scientifique importante vient apporter un progrès nouveau à l'industrie, chaque nation réclame l'honneur d'avoir fait les premiers pas, et prétend que c'est dans son sein qu'est née et qu'a mûri l'idée féconde qui a présidé à la création des nouveaux appareils. Cette prétention est peut-être mesquine ; car le génie n'est pas l'apanage d'une seule contrée.

La découverte de la *machine à vapeur*, découverte passée inaperçue à l'époque où elle fut faite, a soulevé, dans ce siècle, un grand nombre de prétentions absurdes. Il ne devrait cependant y avoir là aucune place pour des préjugés ou pour l'amour-propre national : il faut rechercher la vérité pour elle-même, et non pour le triomphe d'opinions particulières.

Sans donc nous intéresser, plus qu'il importe, de savoir à qui revient la découverte de la machine à vapeur, nous décrirons d'abord quels sont les principes essentiels de la construction actuelle et les modes d'action de la vapeur employée comme force motrice. L'historique des découvertes progressives pour atteindre cette construction nous montrera la part d'honneur qui revient à chacun.

On sait qu'une *machine à vapeur* est un appareil dans lequel on utilise la grande puissance mécanique de la vapeur d'eau resserrée dans un

espace clos. On fait donc bouillir de l'eau dans une chaudière; au moyen d'un tube fixé à cette chaudière, la vapeur est dirigée et agit sur l'une des bases d'un piston placé dans un corps de pompe. La pression que la vapeur exerce sur ce piston s'obtient en multipliant la tension de la vapeur en kilogrammes, exercée sur chaque centimètre carré, par le nombre de centimètres carrés que contient la base du piston. Lorsque cette pression est assez forte pour vaincre la résistance, le piston se meut, et la distance qu'il parcourt, sous l'influence de la vapeur, dans le corps de pompe constitue sa *course*. Pour que le piston puisse revenir à sa

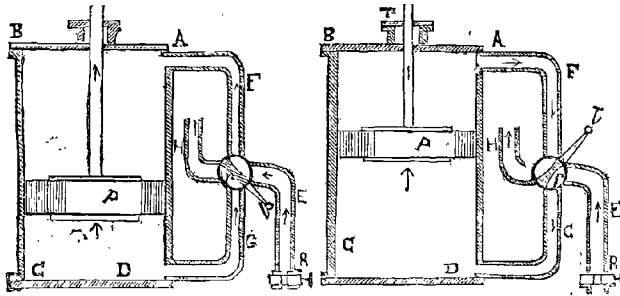


Fig. 308.

Fig. 309.

position primitive, il faut détruire l'action de la vapeur, soit en la condensant, soit en la faisant sortir du corps de pompe. Le retour du piston s'opère, soit par l'action de la résistance, soit par la vapeur qu'on fait agir sur la seconde base du piston, pour donner à celui-ci un mouvement en sens contraire du premier. On imprime ainsi au piston et à sa tige un mouvement rectiligne alternatif, qu'on transforme ensuite en mouvement circulaire progressif.

Lorsque la vapeur n'agit que sur l'une des bases du piston, son action est dite à *simple effet*; lorsqu'elle agit alternativement sur l'une et l'autre base, l'action de la vapeur est dite à *double effet*.

Nous allons donner quelques exemples des dispositions mécaniques employées pour faire agir la vapeur sur le piston moteur.

*Premier exemple (fig. 308).* Le piston  $p$  se meut dans un cylindre ABCD, et sa tige  $t$  communique le mouvement aux autres pièces mobiles de la machine. Le tuyau E part de la chaudière et conduit la vapeur au-dessus et au-dessous du piston, par l'un des tuyaux F et G. Le passage de la vapeur par le tuyau E s'établit ou se supprime à volonté, à l'aide du robinet R. Après avoir agi sur le piston, la vapeur s'échappe par un tuyau de sortie H. Les quatre tuyaux E, F, G, H aboutissent à un robinet  $r$  à double effet. C'est un cylindre circulaire portant deux

entailles latérales et opposées, dont l'une fait communiquer le tuyau E avec le dessus ou le dessous du piston, tandis que l'autre établit la communication du tuyau H avec le dessous ou le dessus du piston. La clef *l* de ce robinet est mise en mouvement par le jeu de la machine, de manière à conduire la vapeur alternativement sur l'une et l'autre base du piston.

Dans la *fig.* 308, la vapeur afflue par le tuyau E, passe par le tuyau F, vient agir au-dessus du piston, et lui imprime un mouvement de haut en bas. Le piston, en descendant, refoule la vapeur qui se trouve au-dessous, et qui s'échappe par les tuyaux G et H.

Dans la *fig.* 309, le robinet *r* ayant tourné d'un quart de tour, la vapeur de la chaudière vient agir au-dessous du piston, et celle qui se trouve au-dessus s'échappe par les tuyaux F et H.

*Deuxième exemple (fig. 310).* Le cylindre ABCD, dans lequel se meut le piston *p*, communique, par les orifices *x* et *y*, avec l'espace *efgh* qu'on nomme *boîte de distribution*, et qui reçoit la vapeur de la chaudière par le tuyau V. Le *tiroir klmn*, auquel la tige *l* imprime un mouvement alternatif de gauche à droite, dont le dessous est constamment en communication avec le canal de sortie *z*, sert à établir la communication de la boîte de distribution avec l'un des orifices *x* et *y*, tandis que l'autre se trouve en communication avec le canal de sortie. Dans la *fig.* 310, la vapeur agit à la droite du piston, lui imprime un mouvement de droite à gauche; la vapeur qui se trouve à sa gauche est refoulée et s'échappe par les orifices *x* et *z*. Dans la *fig.* 311, c'est l'orifice *x* qui est en communication avec la boîte de distribution, tandis que l'orifice *y* l'est avec le canal de sortie *z*, et le piston se meut alors de gauche à droite.

Si la vapeur continue d'affluer sous le piston jusqu'à ce qu'il ait atteint la limite de sa course, la vapeur agit en *plein*. Mais il arrive souvent que la vapeur ne pénètre dans le cylindre que pendant une partie de la course du piston, qui s'achève ensuite en laissant la vapeur se détendre peu à peu, à mesure que le piston chemine; dans ce cas, la

Fig. 310.

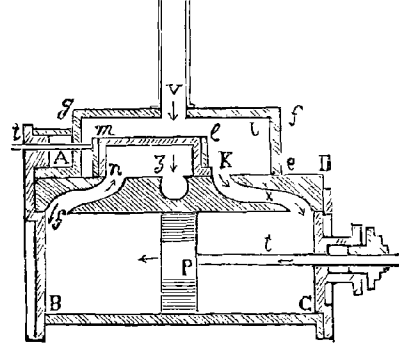
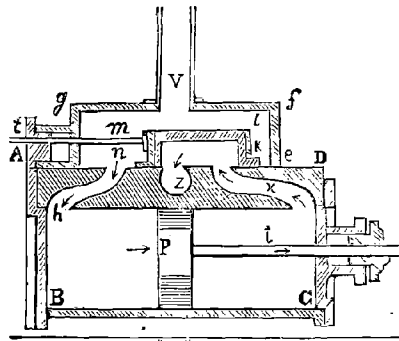


Fig. 311.

vapeur agit *avec détente*. Il est évident que, dès l'instant que la vapeur se détend pour occuper des espaces plus grands, la tension de la vapeur diminue, suivant la loi de Mariotte (page 283), et la pression exercée sur le piston diminue pareillement.

La vapeur agit à *haute pression* lorsque, par l'action du feu, elle est portée à un tel degré de tension qu'elle est capable de vaincre la pression atmosphérique et d'exécuter en outre un travail mécanique quelconque. Elle agit à *moyenne pression*, lorsque la tension est au plus de trois à quatre atmosphères.

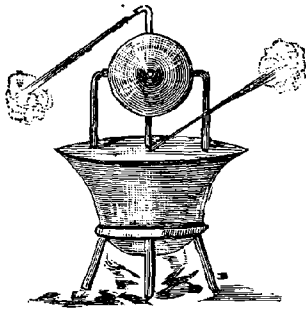


Fig. 312.

ÉOLIPYLE DE HÉRON.

Lorsque la vapeur agit en plein, ayant mesuré en kilogrammes la pression qu'elle exerce à chaque instant sur le piston, ayant mesuré en mètres la course de celui-ci, le produit des deux nombres donnera le travail exprimé en kilogrammètres.

Dans le cas où la vapeur agit avec détente, on peut supposer le piston poussé par une pression moyenne entre toutes celles qui ont été exercées entre le commencement et la fin de la course.

Ceci compris, nous allons examiner la marche de l'invention.

**HISTORIQUE DE LA MACHINE A VAPEUR.** — Nous avons dit que, dans le fond même des forêts de la Germanie, et dès la plus haute antiquité, les prêtres utilisaient la vapeur d'eau pour leurs religieuses jongleries; nous avons dit aussi que Héron d'Alexandrie avait imaginé un instrument pour montrer « comment l'impulsion de la chaleur exprime la force du vent » (page 16). Mais les appareils de Héron, dont le principal est celui que l'on désigne sous le nom de *éolipyle* (d'*Éole*, dieu du vent, et du grec *pulé*, porte), ne peuvent, en vérité, être regardés comme des machines à vapeur, d'abord parce que, si la vapeur a produit un effet quelconque entre les mains de Héron, ce n'était pas en vertu des propriétés particulières à ce fluide, mais seulement en vertu des mouvements que peut produire un gaz, un liquide quelconque, lorsqu'il s'échappe d'une certaine manière de l'appareil qui le renferme. L'*éolipyle*, tel qu'il l'avait conçu, était une simple boule creuse faite d'airain, n'ayant qu'une petite ouverture par laquelle on introduisait de l'eau. Postérieurement, on varia la forme de l'appareil; souvent on lui donnait la forme d'une poire. C'est aujourd'hui une chaudière en partie pleine d'eau placée sur un foyer et fermée par un couvercle (*fig. 312*). Sur celui-ci, un tube

creux et recourbé, muni d'un robinet, va aboutir à une sphère creuse en métal, tandis qu'un autre montant soutient la sphère de l'autre côté, tout en la laissant mobile autour d'eux. La sphère est percée de deux tubes creux d'un diamètre perpendiculaire à l'axe. Quand la vapeur monte dans la chaudière, elle pénètre dans la sphère par le tube, puis s'échappe par les issues avec bruit, en se condensant dans l'air; la réaction qui lui aurait fait équilibre en cas de fermeture complète s'exerce donc en sens contraire, et la sphère tourne avec plus ou moins de rapidité dans un sens opposé à celui de la sortie de la vapeur. Si l'on compare l'éolipyle de Héron avec le *tourniquet hydraulique* (page 178), on voit qu'un jet d'eau aurait produit absolument le même effet qu'un jet de vapeur.

En second lieu, les anciens ne connaissaient pas même l'existence de la vapeur d'eau; ils attribuaient tout l'effet à l'air et croyaient que l'eau avait la propriété de se transformer en air. Héron n'est pas plus inventeur que la première personne qui a vu se produire les effets de la force élastique de la vapeur, se manifestant par l'agitation du couvercle d'un vase contenant de l'eau bouillante.

De Héron, il faut aller jusqu'au xvi<sup>e</sup> siècle pour trouver quelque chose qui ressemble à un appareil à vapeur. On a prétendu qu'au x<sup>e</sup> siècle le fameux Gerbert, devenu pape sous le nom de Sylvestre II, employa la vapeur d'eau pour faire résonner des tuyaux d'orgues; mais cette assertion ne s'appuie sur rien. En 1543, Blasco de Garay (1) fit à Barcelone une expérience tendant à montrer la possibilité de naviguer sans voiles et sans rames. Dans la relation qui fut faite de cette expérience, on ne trouve pas une seule fois le mot de vapeur; il n'est question que d'une chaudière d'eau bouillante, destinée à un usage que l'on ne dit point. D'ailleurs, cette expérience n'a été publiée qu'en 1826. Charles-Quint récompensa, paraît-il, l'auteur du projet; mais il n'y eut rien de plus qu'un essai, après lequel Blasco de Garay enleva la machine du bateau et refusa de la montrer à qui que ce fût. Les bois en furent déposés à l'arsenal de Barcelone, et le reste de la machine fut gardé par l'inventeur.

Après Blasco de Garay, on pourrait citer Porta (2), Branca et d'autres physiciens du xvi<sup>e</sup> siècle, qui s'occupèrent beaucoup de la construction d'appareils semblables à l'éolipyle de Héron et destinés à montrer les

(1) BLASCO DE GARAY, mécanicien espagnol, capitaine dans la marine militaire. M. Hoeffler, dans sa savante *Biographie générale*, a démontré jusqu'à l'évidence la fausseté de la supposition qui le donnait pour inventeur des bateaux à vapeur. On n'a sur ce personnage aucun détail biographique.

(2) PORTA (Jean-Baptiste), physicien napolitain (1540-1615), voyagea en Italie, en Espagne, en France, fonda à Naples l'Académie des *Secreti*, que le pape Paul III prohiba comme étant une réunion de savants, découvrit la chambre obscure et fit beaucoup d'expériences d'optique. Il a laissé de nombreux ouvrages. Il cultivait aussi la poésie, et on a de lui 14 comédies et 2 tragédies.

curieux effets des forces développées par les fluides ; mais aucun d'eux ne connut vraiment la force élastique de la vapeur. On a remarqué que le mot de *vapeur*, tel que nous l'entendons, ne se trouve pas dans les œuvres de Porta. L'idée que l'eau se transforme en air par l'action du feu régnait encore sans partage, et les effets curieux que les physiciens obtenaient étaient expliqués seulement par la dilatation de l'air échauffé qui est en contact avec le liquide.

L'appareil de Porta se compose (*fig. 313*) d'une boîte rectangulaire A, complètement fermée et remplie d'eau aux trois quarts. Un tube BC pénètre dans la boîte et plonge dans l'eau. Quand on expose le tout à une haute température, le liquide renfermé dans le vase A s'élève dans le tube BC et s'écoule au dehors. Ici, la vapeur produit, il est vrai, tout l'effet obtenu ; mais Porta n'y a vu que le résultat de la dilatation, ou, comme on disait, de la raréfaction de l'air ; il ne parle pas de la vapeur.

Branca (1) obtenait un mouvement de rotation en faisant arriver un jet de vapeur sur les aubes d'une roue hydraulique, mais tout autre fluide aurait produit le même effet.

Rivault (2) a indiqué, dans ses *Éléments d'artillerie*, publiés en 1605, que *l'eau qui se convertit en air se raréfie*, et que, si l'on ferme l'ouverture de l'éolipyle, celui-ci se brise avec fracas. On a voulu trouver dans ces paroles l'origine de la découverte de la force élastique de la vapeur ; mais, en lisant le texte même, on voit que Rivault n'en avait pas la moindre idée.

En 1615, Salomon de Caus (3) publie à Francfort un ouvrage ayant pour titre : *Les raisons des forces mouvantes, avec diverses machines tant utiles que plaisantes, etc.*, dans lequel il parle d'un appareil destiné à élever

(1) BRANCA (Giovanni), architecte italien de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. On ne sait rien de sa vie : dans ses livres, il se donne le titre de *citoyen romain*. Son principal ouvrage, intitulé *la Machine* et dans lequel est une figure qui représente le moteur par la vapeur, a été publié à Rome en 1629. On lui doit aussi un *Manuel d'architecture*.

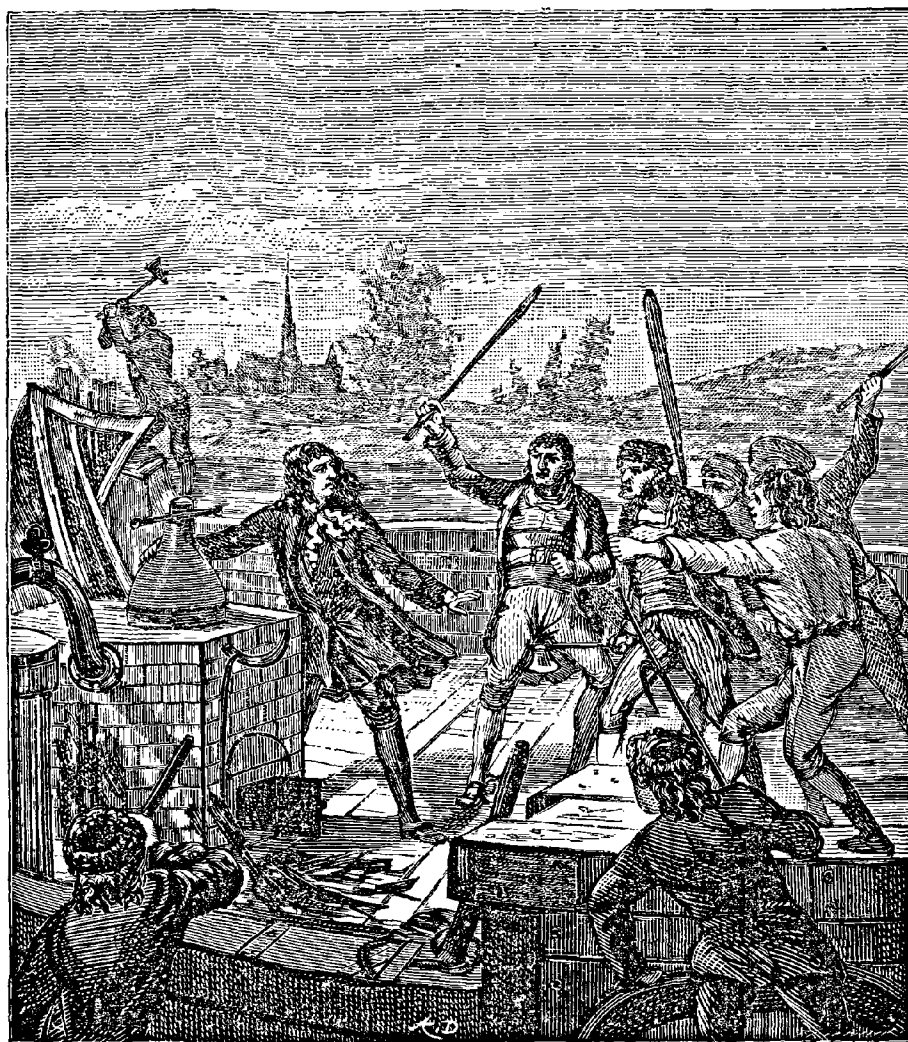
(2) RIVAULT (David), seigneur de Fleurance, gentilhomme de la chambre de Henri IV, sous-précepteur du Dauphin (Louis XIII) (1571-1616). Après avoir suivi pendant quelque temps la carrière des armes, il se livra aux lettres et publia de nombreux ouvrages sur les sujets les plus divers. Ayant osé un jour battre le chien du roi qui voulait le mordre, il fut battu lui-même, chassé de la cour et exilé, malgré la haute considération dont il jouissait et ses nombreux services.

(3) CAUS (Salomon de), ingénieur (1560-1630), résida une partie de sa vie en Angleterre, où il fut attaché au prince de Galles, puis à la reine Élisabeth ; passa de là en Allemagne, en qualité d'ingénieur de l'électeur de Bavière, où il dirigea la construction des jardins d'Heidelberg, et enfin en France, où il avait l'emploi d'architecte de la ville de Paris. C'est M. Pitre-Chevalier qui a créé cette légende par laquelle le cardinal de Richelieu, pour se débarrasser des importunités de Salomon de Caus, l'aurait fait enfermer à Bicêtre, où il serait mort fou. Ce conte du spirituel romancier a eu assez de succès pour que la peinture le reproduisit, et qu'un grand nombre de personnes soient persuadées de ce fait absolument apocryphe. Deux années avant sa mort, il publia un livre intitulé *Pratique des horloges solaires*, dans la préface duquel il parle de Richelieu avec gratitude.



l'eau par le moyen du feu. Voici la description qu'il en donne lui-même à la page 4 du livre que nous citons :

« L'eau montera, par aide du feu, plus haut que son niveau... Le troisième



Les bateliers de Münden brisent le bateau à vapeur de Papin (pages 660 et 635).

moyen de faire monter l'eau est par l'aide du feu, dont il se peut faire diverses machines ; j'en donnerai ici la démonstration d'une. Soit une balle de cuivre marquée A (*fig.* 314), bien soudée tout alentour, à laquelle il y aura un soupirail marqué C par où l'on mettra l'eau, et aussi un tuyau marqué AB, qui sera soudé

en haut de la balle, et dont le bout approchera près du fond, sans y toucher ; après faut emplir ladite balle d'eau par le soubirail, puis le bien reboucher et la mettre sur le feu ; alors la chaleur, donnant contre ladite balle, fera monter toute l'eau par le tuyau AB. »

On voit, par ce passage, que Salomon de Caus ne mérite pas tous les éloges qu'on lui a prodigués. Il n'a pas créé une machine propre à opérer des épuisements, comme on l'a tant dit ; il a seulement répété l'expérience de Héron et de Porta.

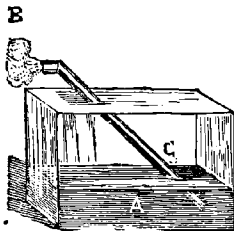


Fig. 313.

APPAREIL DE PORTA.

Cependant, Salomon de Caus, dans le même ouvrage, dit que « la violence de la vapeur (produite » par l'action du feu) qui cause l'eau de monter » est venue de ladite eau, laquelle vapeur sor- » tira après que l'eau sera sortie par le robinet avec » grande violence. » Ce passage prouve-t-il d'une manière suffisante que Salomon de Caus a connu

la force élastique de la vapeur ? C'est ce que nous n'oserions affirmer. Le petit nombre de ses écrits rend la question fort difficile à résoudre ; les expressions dont il se sert sont vagues ; de sorte que, tout en reconnaissant qu'on lui a fait jouer, dans l'histoire de la vapeur, un rôle bien au-dessus de ses forces, il nous semble qu'on ne peut rejeter absolument ses prétentions à la découverte, et qu'on doit, à son égard, se renfermer dans un doute prudent.

Les Anglais ont prétendu que la découverte de la machine à vapeur était due à un de leurs compatriotes, le marquis de Worcester (1). Ils se sont basés, pour cela, sur un passage du *Century of inventions*, publié en 1663. Dans cet ouvrage, écrit avec beaucoup de négligence, dans un style diffus incompréhensible, Worcester prétend avoir reconnu par l'expérience qu'une pièce de canon, remplie d'eau et chauffée suffisamment, éclate avec fracas. Il ajoute qu'ayant construit des vases d'une résistance suffisante, il a disposé une machine au moyen de laquelle il obtenait,

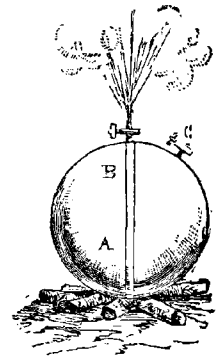


Fig. 314. — APPAREIL DE SALOMON DE CAUS.

(1) WORCESTER (Edward SOMMERSET, marquis de), de la célèbre famille du vicomte de Rochester. Lui-même passa sa vie dans des intrigues politiques, où il s'est fait remarquer par sa suffisance et sa forfanterie. C'est pendant qu'il était enfermé à la Tour de Londres, par suite d'une conspiration, que l'idée lui vint d'appliquer la force de la vapeur, en voyant le couvercle de sa marmite se soulever sur le feu.

en raréfiant l'eau par la chaleur, un jet continu de liquide de 40 pieds de haut. La description de la machine de Worcester étant fort incomplète, et le noble auteur n'ayant pas daigné accompagner son texte de figures explicatives, on est réduit à des conjectures pour savoir en quoi consistait cette merveilleuse invention. On a cru pourtant apercevoir, dans la machine de Worcester, la réunion de deux appareils semblables à celui de Salomon de Caus et fonctionnant alternativement. Les deux jets aboutissant au même tuyau d'échappement, on a un jet continu de liquide.

Le marquis de Worcester n'a jamais fait construire sa machine. Connaissant les expériences de Salomon de Caus, de Porta et d'autres, il a pris çà et là quelques idées, les a écrites sans les comprendre, et s'est donné pour l'inventeur de plusieurs machines. La meilleure preuve que l'on puisse donner de cela, c'est l'imbroglie de ses descriptions et l'obscurité qui règne dans son œuvre. D'ailleurs, si l'on en croit Robert Stuart, compatriote de Worcester, le *Century of inventions* n'est qu'un tissu d'explications mensongères, que le caractère bien connu et la réputation de l'auteur rendent indignes de toute croyance.

Dans un manuscrit qui se trouve au Musée britannique, et qui a pour titre : *Élévation des eaux par toutes sortes de machines, réduites à la mesure, au poids et à la balance*, Samuel Morland parle de la vapeur d'eau dans les termes suivants :

« L'eau étant évaporée par la force du feu, ses vapeurs demandent incontinent un grand espace (environ 2,000 fois), que l'eau n'occupait auparavant, et plutôt que d'être toujours emprisonnées, feraient crever une pièce de canon. Mais étant bien gouvernées, selon les règles de la statique, et par science réduites à la mesure, au poids et à la balance, alors elles portent paisiblement leurs fardeaux (comme de bons chevaux), et aussi seraient-elles d'un grand usage au genre humain, particulièrement pour l'élévation des eaux, selon la table suivante, etc. »

Ce passage est-il un titre en faveur de Morland ? Nous ne le pensons pas : rien n'indique qu'il connût la véritable théorie de la vaporisation. Ce passage a la même valeur que celui de Salomon de Caus, et comme son manuscrit date de 1683, c'est-à-dire soixante-huit ans après la publication des *Raisons des forces mouvantes*, toutes les prétentions de Morland sont nulles.

Dès 1680, Huyghens avait songé à utiliser la force expansive de la poudre à canon, et il construisit en 1682 une machine qui, disait l'auteur, « pouvait servir non seulement à élever toutes sortes de grands poids et

» des eaux pour les fontaines, mais aussi à jeter des boulets et des flèches  
 » avec beaucoup de force, suivant la manière des balistes des anciens. »  
 Il avait été aidé dans la construction de cette machine par Denis Papin (1), l'homme de génie auquel le monde doit réellement l'invention de la machine à vapeur.

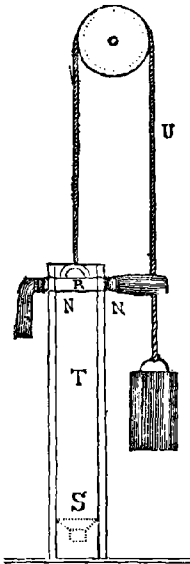


Fig. 315.  
 MACHINE À POUVRE  
 DE HUYGHENS  
 ET PAPIN.

Papin apporta quelques changements à la machine à poudre de Huyghens; mais ces changements sont très peu de chose, et l'appareil resta à peu près tel qu'il avait été construit par les deux inventeurs.

Voici sommairement en quoi consistait cette machine (fig. 315) :

Soit un cylindre parfaitement alésé T; dans ce cylindre se meut un piston R, qui peut soulever un poids au moyen d'une corde U, attachée à sa tige et enroulée sur une poulie. A la partie inférieure du cylindre se trouve une petite boîte pleine de poudre S; le piston repose dessus. Lorsqu'on enflamme la poudre, le piston est soulevé par la force expansive des gaz produits, qui s'échappent dans l'atmosphère au moyen des soupapes N, N. Une fois les gaz disparus, un vide plus ou moins complet existe au-dessus du piston, qui, obéissant alors à la pression atmosphérique lequel s'exerce à sa partie supérieure, descend avec rapidité en entraînant la corde U et le poids auquel elle est attachée.

Au point de vue pratique, cette machine ne peut être d'aucune utilité. En effet, la longueur du corps de pompe et la compressibilité de l'air font que tous les gaz produits ne disparaissent point par les sou-

(1) PAPIN (Denis), né à Blois en 1647, fut élevé, quoique protestant, au collège des jésuites de cette ville. Il fit à Paris des études médicales, et fut reçu docteur en médecine à Orléans. L'état de médecin ne lui convenant pas, il se livra avec ardeur à l'étude des sciences physiques et mécaniques, et fut admis à travailler avec Huyghens par la protection de M<sup>me</sup> Colbert, sa compatriote. Il devint alors un mécanicien distingué. La persécution contre les protestants le força de passer en Angleterre, où R. Boyle l'associa à ses travaux et le fit recevoir membre de la Société royale. Ce fut alors (1685) qu'il inventa son *digesteur* (page 592). Fatigué de l'Angleterre, Papin se rendit en Italie, où, après avoir acquis une grande renommée comme mécanicien, il tomba dans la misère, et fut obligé de retourner à Londres, où il fut méconnu par les membres de la Société royale. Ne pouvant rentrer en France à cause de la révocation de l'édit de Nantes, qui interdisait aux protestants la culture des sciences, Papin accepta la place de professeur de mathématiques à Marbourg, que lui offrait le landgrave Charles, électeur de Hesse. Il resta en Allemagne de 1687 à 1707. Ce fut pendant cette période qu'il accomploit tous ses travaux relatifs à la machine à vapeur; ce fut là qu'il inventa les bateaux à vapeur (page 685). En 1707, il retourna en Angleterre, où il vécut dans un dénuement absolu jusqu'à sa mort, en 1714. Sa ville natale lui a élevé une statue en 1860.

papes, et qu'il reste une certaine quantité d'air dans la machine. Tout cela diminue la force qui fait descendre le piston, de sorte que l'effet produit n'est pas très considérable. Aussi Papin chercha-t-il bientôt un autre moyen d'opérer le vide dans le corps de pompe.

Durant un premier séjour qu'il fit en Angleterre, en 1671, Papin s'était lié avec le savant chimiste Robert Boyle, sur la proposition duquel il avait été nommé membre de la Société royale, et il s'était livré avec lui à de nombreuses expériences sur la vapeur d'eau. Il en avait reconnu la force élastique très considérable, force qui peut disparaître par une simple condensation. Son génie vit tout de suite le parti que l'on pouvait tirer de ces observations, et il construisit, en 1690, la première machine à vapeur; car ce n'est pas dans la découverte de la puissance de la vapeur que git l'invention, mais dans l'utilisation de cette force, dans son emploi comme moteur industriel. Sans doute, l'appareil de Papin est fort imparfait; ce n'est guère qu'une machine destinée à faire des expériences; mais, le principe étant trouvé, le premier pas était fait; les autres ne sont plus qu'une conséquence.

Cette machine était ainsi construite (*fig. 316*):

Soit un corps de pompe U, fermé à sa partie inférieure par une plaque métallique fort mince. Dans ce corps de pompe peut se mouvoir un piston plein P, ayant un petit trou N, destiné à laisser passer l'air, lorsqu'on baisse le piston pour la première fois. Une tige O part du piston et porte à sa partie inférieure une échancrure Z, dans laquelle peut entrer le levier V, fixé au point B, et pressé par le ressort T. Pour mettre la machine en mouvement, on introduit une mince couche d'eau au fond du corps de pompe, on abaisse le piston jusqu'au contact de l'eau, ensuite on bouche le trou N avec la tige C, et l'on place un couvercle S sur le tout. Si l'on chauffe le fond du corps de pompe, l'eau se vaporise, la force élastique de la vapeur soulève le piston, qui monte jusqu'à ce que le levier V entre dans l'échancrure Z. Alors on retire le feu, la vapeur se condense, le vide se fait sous le piston, et, si l'on soulève le levier pour le faire sortir de l'échancrure Z, le piston descend avec une grande force et, par suite, entraîne un poids quelconque. L'opération peut se répéter autant de fois qu'on le désire, sans avoir besoin de renouveler l'eau.

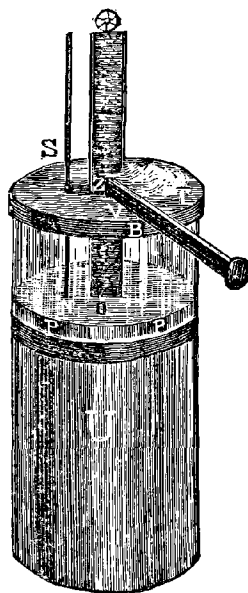


Fig. 316.  
MACHINE A VAPEUR  
DE PAPIN.

On voit tout de suite que cette machine était inutile pour la pratique, parce que l'eau était contenue dans le corps de pompe et qu'il fallait un certain temps pour refroidir la vapeur. Cependant Papin, comme tous les inventeurs d'ailleurs, croyait qu'elle pouvait être appliquée sans modifications, et, dans le mémoire qui donne la description de la première machine à vapeur, publié en 1690, sous le titre de : *Nouvelle méthode*

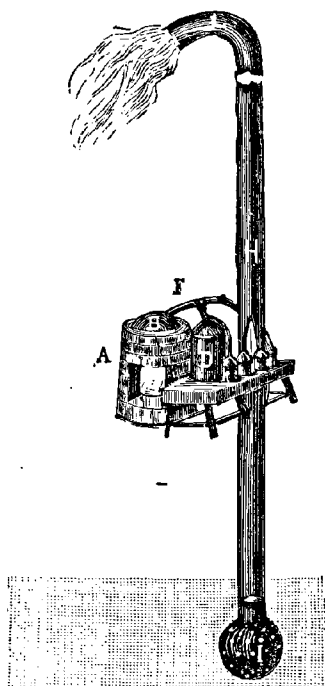


Fig. 317.

MACHINE DE SAVERY.

*pour obtenir à bas prix des forces motrices considérables*, il indique son application à la marche des bateaux. Il exposait le moyen de transformer le mouvement de va-et-vient de la tige du piston en un mouvement continu de rotation, au moyen d'une crémaillère, dont les dents s'engrenaient avec celles d'une roue, qui mettait en mouvement un arbre quelconque. Pour obtenir une rotation continue, il imaginait d'avoir deux corps de pompe dont les pistons se mouvaient en sens inverse, chaque crémaillère n'engrenant avec la roue dentée que pendant l'ascension. Cette disposition était la machine à double effet et à deux corps de pompe.

Le véritable inventeur de la machine à vapeur est donc, sans contredit, l'immortel et malheureux mécanicien de Blois.

Dès que le mémoire de Papin fut connu en Angleterre, tout le monde s'occupa de la machine à vapeur. Mais, frappé des inconvénients, on ne tarda pas à l'abandonner ; Robert Hooke

la critiqua vivement, et s'efforça de réduire à néant l'invention de Papin. Cependant Savery (1), ayant lu le mémoire de Papin et les critiques de Hooke, crut possible de construire une machine qui n'eût pas les inconvénients signalés : il y réussit à peu près, en ayant recours à une chaudière où se créait à part la vapeur, mais en ayant le tort de supprimer le piston dont se servait Papin. Voici la description de sa machine (*fig. 317*).

Une chaudière B, placée sur un fourneau A, produit la vapeur nécessaire à la marche de l'appareil. Deux tubes, munis chacun d'un robinet F,

(1) SAVERY (Thomas), capitaine au service de Louis XIV, se réfugia en Angleterre après la révocation de l'édit de Nantes, et y devint un ingénieur distingué. Il a exposé ses idées dans un ouvrage intitulé : *The miner's friend* [*L'Ami du mineur*] (1702).

amènent la vapeur dans deux vases D, placés, dans la figure, l'un derrière l'autre. De chaque vase partent deux tuyaux, l'un à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure. Les tuyaux qui partent du haut des deux vases se réunissent en un seul H, qui descend dans la mine dont on veut extraire de l'eau, et qui se termine par une boule I, percée de trous, afin d'éviter l'engorgement. Les deux autres tuyaux, qui partent de la partie inférieure des vases D, se réunissent en un seul L, qui élève l'eau à une certaine hauteur et sert à la rejeter au dehors. Des soupapes, placées dans les tuyaux H et L, ouvrent de bas en haut. Pour mettre la machine en mouvement, on amène la vapeur dans un des vases en ouvrant le robinet F correspondant ; la soupape du tuyau H se ferme, la pression de la vapeur agit sur le liquide renfermé dans le vase et le force à s'élever dans le tuyau L, dont la soupape s'ouvre. Lorsque ce vase est vidé, on ferme le robinet correspondant et on ouvre l'autre, ce qui fait vider le second vase absolument de la même manière. Pendant que cela se fait, on verse de l'eau froide sur les parois du premier vase ; la vapeur qui s'y trouve se condense, le vide se fait, la soupape du tuyau H s'ouvre, et l'eau s'élève par aspiration jusqu'au vase D qui se remplit. Lorsque le second vase est vidé, le premier se trouve plein ; on y fait passer la vapeur, qui le vide pendant que l'autre se remplit, et ainsi de suite. On a, de cette manière, un jet continu de liquide. Le tube H, devant amener l'eau par aspiration, doit avoir moins de 10 mètres ; on ne peut donc élever l'eau, par ce procédé, que d'une quinzaine de mètres au plus.

Le jeu de la machine de Savery est fort simple ; mais la manière dont la condensation s'opère, ainsi que le contact de la vapeur avec l'eau, amène une très grande perte de combustible. Papin perfectionna cette machine, surtout en y introduisant le flotteur qui empêche une partie de la vapeur produite de se condenser dans le liquide qu'il faut expulser. Mais il s'arrêta là : les dégoûts qu'il avait éprouvés l'avaient découragé et il ne poursuivit pas ses recherches de ce côté.

Savery prit, en 1695, un brevet pour cette machine et réussit à la rendre utile dans l'exploitation des mines. La nécessité de rendre les vases assez résistants pour ne pas être brisés par la force de la vapeur, et en même temps assez minces pour permettre à la condensation de s'opérer rapidement, fut un des principaux obstacles qui s'opposèrent à son emploi.

Une machine de Savery, établie dans le voisinage de la ville de Darmouth, attira l'attention de deux ouvriers, Newcomen (Thomas), quincaillier et forgeron, lequel d'ailleurs s'occupait beaucoup de sciences, et qui était connu de la plupart des savants d'Angleterre, et Cawley

(John), vitrier, qui partageait ses goûts pour les études de mécanique. Visitant chaque jour la nouvelle machine, ces deux hommes conçurent l'idée de la modifier. Newcomen était en correspondance avec R. Hooke; celui-ci lui communiqua le mémoire de Papin, en lui faisant remarquer que sa fortune était faite, s'il parvenait à opérer subitement la *condensation* de la vapeur. Cette remarque fut un trait de lumière : Newcomen et Cawley résolurent de construire une machine à vapeur analogue à celle de Papin, en y ajoutant une chaudière et en opérant la

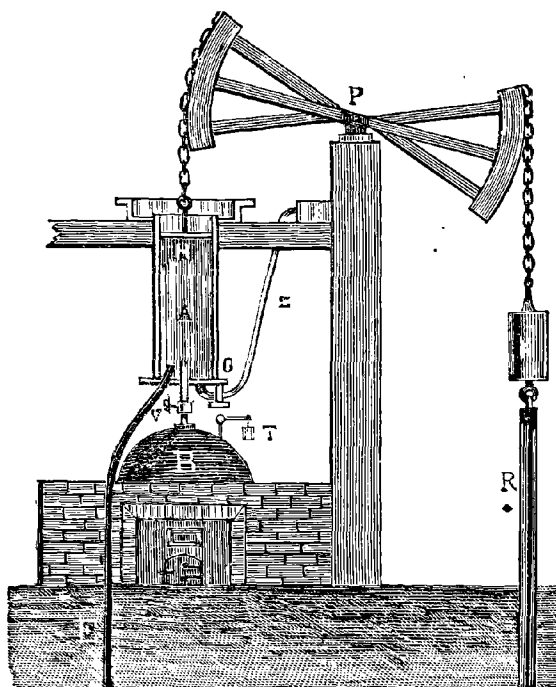


Fig. 318. — MACHINE DE NEWCOMEN.

condensation par aspersion d'eau froide; mais, dans le brevet de Savery, ce moyen était indiqué : par conséquent, on ne pouvait l'employer. Pour éviter un procès, les deux ouvriers de Darnmouth, qui étaient quakers, s'associèrent avec Savery, et obtinrent, en 1707, un brevet pour l'exploitation de leur nouvelle machine.

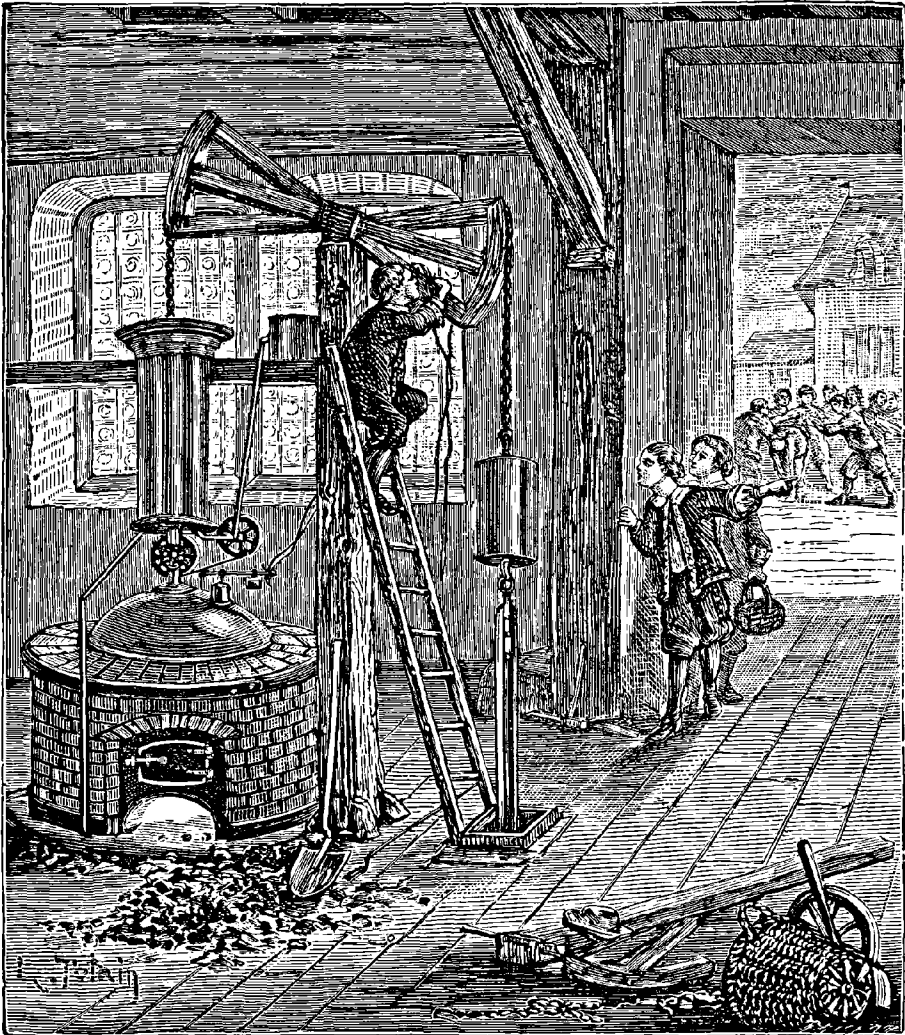
Au lieu de transformer le mouvement de va-et-vient de la tige du piston en un mouvement continu de rotation, comme Papin le conseillait, l'ingénieur Newcomen attachait, au moyen d'une chaîne articulée, le piston à l'extrémité d'un balancier dont l'autre extrémité était reliée à la maîtresse tige des pompes d'une mine.

La machine de Newcomen est donc spéciale pour opérer des épuisements.

Il y avait à peine quelques jours que le nouvel appareil fonctionnait, lorsqu'on remarqua un redoublement d'activité dans le mouvement du piston. On en chercha les causes, et on trouva que le piston était percé; l'eau que l'on plaçait au-dessus, pour contre-balancer le défaut d'alèsement du corps de pompe et prévenir les fuites de vapeur, tombait goutte à goutte dans le cylindre et accélérail la condensation de la vapeur. Dès lors, au lieu de condenser par aspersion d'eau froide sur les parois du



corps de pompe, on projeta, au moyen d'une pompe d'arrosoir, des gouttelettes liquides au sein de la vapeur, et la condensation s'opéra avec une excessive rapidité.



Un enfant, nommé Humphry Potter, réussit à attacher avec des ficelles... (page 666).

Voici les dispositions de la machine de Newcomen (*fig. 318*) :

Une chaudière hémisphérique B, munie d'une soupape de sûreté T, repose sur un fourneau. Un tuyau, fermé par un robinet V, conduit la vapeur de la chaudière au cylindre A, dans lequel se meut le piston H,

dont la tige articulée est fixée à un balancier mobile autour de son centre P. Un tube Z, réglé par un robinet O et terminé par une pomme d'arrosoir, amène dans le cylindre A l'eau du réservoir S. En vertu de l'élévation du point de départ, l'eau jaillit dans le cylindre, y forme une multitude de petits jets d'eau qui remplissent le cylindre et retombent en gouttelettes. Le liquide qui a servi à la condensation s'échappe au dehors par le tube E. Un contrepoids K et une tige R, se reliant à la maîtresse tige des pompes de la mine, sont attachés à l'extrémité du balancier, à l'opposé de la tige du piston. Pour mettre cette machine en mouvement, on ouvre le robinet V; la vapeur pénètre dans le corps de pompe et fait monter le piston H, pendant que le contrepoids K tient la chaîne tendue. Quand le piston est au plus haut point de sa course, on ferme le robinet V, on ouvre O, la vapeur se condense, le piston descend avec rapidité, pressé qu'il est par le poids de l'air, et entraîne avec lui, au moyen du balancier, le contrepoids K et la tige R.

Rien n'est plus simple que la machine de Newcomen : la pression atmosphérique y joue un grand rôle : aussi a-t-on donné à l'appareil le nom de *machine à vapeur atmosphérique*, ou simplement de *machine atmosphérique*.

Bientôt quelques perfectionnements furent apportés à la machine de Newcomen. Ainsi le robinet V, qui donnait accès à la vapeur dans le cylindre où se mouvait le piston, et le robinet O qui en réglait la sortie, devaient être ouverts et fermés par un ouvrier spécial. Or, vers 1713, un enfant, nommé Humphry Potter, chargé de ce soin, et désireux d'aller jouer avec ses camarades, réussit à rattacher avec des ficelles les robinets aux pièces en mouvement de la machine, de telle sorte qu'ils s'ouvraient et se fermaient au moment convenable. L'ingénieur Beighton n'eut qu'à remplacer les ficelles par des tringles métalliques, et, dès lors, la machine opéra elle-même la distribution de la vapeur.

Vers 1758, Fitz-Gerald transforma le mouvement rectiligne du piston en un mouvement rotatoire, au moyen de roues dentées.

L'introduction du flotteur destiné à régulariser l'alimentation de la chaudière, et imaginé en 1760 par Brindley (page 215), fut la principale modification apportée à la machine de Newcomen, qui n'en restait pas moins d'une puissance peu considérable et ne produisait d'effet utile que pendant la descente du piston.

Les résultats obtenus ne satisfaisaient point les esprits : la machine de Newcomen ne pouvait guère être employée qu'au soulèvement des fardeaux ou à l'épuisement des mines. Il était réservé à un homme de génie, dont la postérité reconnaissante écrira toujours le nom à côté

de celui de Papin, de terminer, pour ainsi dire, la construction de la machine à vapeur.

Vers 1763, un jeune ouvrier écoutait avec attention les leçons de Black sur le calorique latent : cet ouvrier était réparateur des instruments de physique du laboratoire de l'université de Glasgow. Son nom était alors ignoré de tous ; mais il devait un jour retentir par tout le monde et passer de génération en génération, répété par la reconnaissance des peuples. Ce jeune ouvrier était James Watt (1).

Le professeur d'histoire naturelle de l'université, ayant eu besoin, dans une de ses leçons, de faire fonctionner une machine de Newcomen, et en ayant une qui n'avait jamais pu marcher convenablement, eut l'idée de l'envoyer à Watt pour la réparer. Celui-ci reconnut que les dimensions de la chaudière et du corps de pompe n'étaient pas proportionnées, de telle sorte que la machine ne fournissait pas assez de vapeur pour mettre le piston en mouvement, et il corrigea facilement le défaut de l'appareil, qui, dès lors, fonctionna avec régularité.

Ce fut dans ce premier travail qu'il remarqua combien la méthode de condensation de Newcomen était défectueuse. Le refroidissement du cylindre causait une grande perte de combustible, et nuisait à la rapidité du jeu de la machine. Pour obvier à cet inconvénient, Watt étudia

(1) WATT (James), né à Greenock, en Écosse, mort dans sa terre d'Heathfield, près de Birmingham (1736-1819). — La modicité de sa fortune ne lui permettant pas de construire en grand la machine qu'il avait inventée, il chercha un associé, mais il rencontra beaucoup d'indifférence parmi les capitalistes anglais et ce ne fut qu'en 1774 qu'il trouva un homme qui voulut partager avec lui la gloire de la vulgarisation de la machine à vapeur. Boulton et Watt firent construire, dans les vastes ateliers de Soho, appartenant à Boulton, des machines à simple effet et à condenseur, et, après avoir obtenu du gouvernement le prolongement du brevet qui allait expirer, ils s'occupèrent du placement de leurs machines ; mais personne ne consentait à abandonner les machines Newcomen, qui étaient si utiles, pour des machines qu'on n'avait point vues à l'œuvre. Pour vaincre toutes les répugnances, les deux associés achetèrent, bien au-dessus de leur valeur, les vieilles machines, et les remplacèrent par les leurs, en réclamant pour prix, seulement *le tiers du combustible économisé chaque année par les nouveaux appareils*. Mais bientôt les exploiters refusèrent de payer cette redevance, qui avait pris des proportions telles que les propriétaires des mines de Chacewater payèrent, chaque année, 60,000 francs pour le tiers de l'économie en combustible. On trouva que l'inventeur recevait trop : de là des procès innombrables pour obtenir la cessation du privilège dont jouissaient Boulton et Watt. Après bien des années, en 1799 seulement, le triomphe arriva. On ne peut nier que ces longues années passées dans des procès n'aient eu une fâcheuse influence sur les destinées de la machine à vapeur. Heureusement Watt put alors revenir à ses études, inventa, entre autres choses, *en vingt-quatre heures*, la machine à copier les lettres, et peu après le chauffage à la vapeur, construisit des orgues, participa à la découverte de la composition de l'eau et perfectionna ses machines. Sa ville natale lui a élevé une statue, et, plus tard, une réunion de souscripteurs, parmi lesquels se trouvait le roi d'Angleterre, lui érigea, à Westminster, une magnifique statue de marbre, qui a le mérite de reproduire fidèlement la physionomie du grand homme. Son fils, James Watt, et Matthieu Boulton, le fils de son associé, ont repris, après eux, l'établissement de Soho. Comme l'a dit Arago, dans la biographie de cet illustre mécanicien, Watt ne fut pas l'inventeur de la machine à vapeur, car cet inventeur est, sans contredit, Papin, mais il fut le créateur d'admirables combinaisons à l'aide desquelles le petit appareil de Papin est devenu le plus ingénieux, le plus utile, le plus puissant véhicule de l'industrie.

les phénomènes calorifiques qui se produisent dans la transformation de l'eau en vapeur, et réciproquement. Le résultat de ses recherches fut la création du *condenseur*, en 1765. Il consiste en un vase séparé de la machine et constamment plein d'eau froide. Un tube conduit la vapeur du corps de pompe au condenseur; il est muni d'un robinet, destiné à régler la marche du fluide et mis en mouvement par la machine.

Cette première modification est très importante, car elle économise une grande quantité de vapeur, et permet ainsi d'augmenter la puissance de la machine, sans augmentation dans le combustible employé. Mais Watt fit plus, il remplaça la pression atmosphérique par la vapeur elle-même, en changeant le mode de distribution de celle-ci. Au lieu de la faire arriver directement dans la partie inférieure du corps de pompe, il la conduisait dans un tuyau latéral communiquant avec les deux extrémités du corps de pompe. La vapeur pénétrait sous le piston pour le soulever, comme précédemment, puis, passant à l'extrémité supérieure du corps de pompe, elle y remplissait la place de l'atmosphère, et produisait l'effet utile pour la descente du piston. C'est *la machine à simple effet*. Et, comme les parois de ce corps de pompe se refroidissaient trop vite au contact de l'air, Watt les enveloppa d'une substance mauvaise conductrice de la chaleur, et employa, pour la première fois, ces enveloppes en bois qui portent le nom de *chemise du corps de pompe*.

Il obtint pour ces perfectionnements un brevet en 1769 : mais, en 1799 seulement, il put rendre applicable à toutes les industries sa machine, destinée seulement, à l'origine, à remplacer celle de Newcomen dans l'épuisement des mines.

Reprenant l'idée de Papin pour obtenir un mouvement continu de rotation, Watt arriva au résultat cherché en se servant d'un seul corps de pompe. Pour cela, il fit d'abord arriver successivement la vapeur aux deux extrémités du corps de pompe, de sorte que la force qui soulevait le piston était égale à celle qui le faisait descendre. Un mécanisme particulier, qui depuis a reçu de grandes modifications, et qu'on désigne sous le nom de *tiroir*, servait à la distribution de la vapeur, et était mis en mouvement par la machine elle-même. Le tiroir a pour but de donner accès à la vapeur à l'une des extrémités du corps de pompe, en ouvrant en même temps à l'autre extrémité le tube qui conduit au condenseur. Le piston, possédant toujours la même force d'impulsion, pouvait produire un effet utile pendant toute la durée de son mouvement : aussi cette machine a-t-elle reçu le nom de *machine à double effet*, parce que, dans le même temps, elle produit deux fois plus de vapeur que la machine ordinaire

Ensuite il transforma le mouvement rectiligne en mouvement rotatoire au moyen d'une simple tige artificielle fixée au balancier P de la machine de Newcomen (fig. 318) et à l'axe de la roue de mouvement. Il aurait pu facilement supprimer ce balancier en couchant le corps de pompe et en attachant directement l'extrémité de la tige du piston à la bielle et la manivelle de la vanne. Mais, pour le conserver, il le modifia. Le corps de pompe, renfermant de la vapeur à une pression supérieure à celle de l'atmosphère, il fallait que la tige du piston en sortit à frottement doux; et cela ne pouvait se réaliser sans maintenir verticale la tringle métallique qui reliait le piston à l'extrémité du balancier. La chaîne de Newcomen ne pouvait plus servir, et l'extrémité de la tige devait, pour accompagner le balancier, décrire un arc de cercle, ce qui déterminait sa verticalité et produisait des flexions et des frottements considérables.

Watt trouva un mécanisme permettant à la tige de rester verticale, malgré le mouvement curviligne du balancier; c'est ce qu'on appelle le *parallélogramme articulé*, encore utilisé dans nos machines fixes. Voici en quoi il consiste :

La tige du piston (fig. 319) est reliée en D avec une lame métallique capable de tourner autour de son extrémité supérieure E. Deux tiges, dont l'une est constamment parallèle à DE et l'autre à l'axe du balancier, sont mobiles autour de leurs extrémités et forment un parallélogramme. Le point C est constamment maintenu à la même distance d'un point fixe S par une tringle métallique, mobile autour de ses extrémités. Pendant l'ascension du balancier, la tige DE tourne autour du point E, et l'angle D du parallélogramme devient de plus en plus aigu. La tringle SC empêche DE d'obéir facilement à la tige du piston, et de laisser le balancier immobile. A mesure que le point D s'élève verticalement, DE presse obliquement le balancier et lui permet de décrire un arc de cercle, sans que pour cela la tige du piston cesse d'être verticale. Le parallélogramme se rétrécit à mesure que le balancier monte, le point D s'éloigne constamment de son extrémité, mais il ne cesse d'agir sur elle à cause du point fixe S, auquel il est invariablement lié, et qui est comme le centre du mouvement. Le balancier est ainsi absolument libre dans ses mouvements.

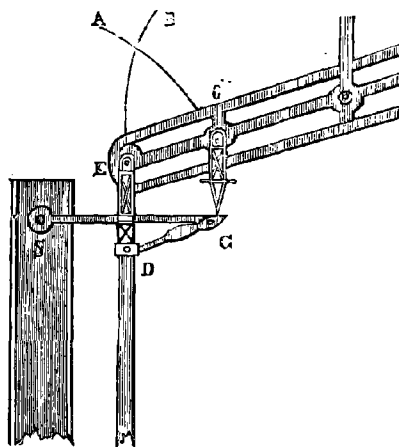


Fig. 319.

PARALLÉLOGRAMME DE WATT.

Watt réalisa une grande économie par l'emploi de la *détente de la vapeur*. Il reconnut, dans ses nombreuses expériences sur le fluide moteur de ses machines, qu'il n'était pas nécessaire d'amener de la vapeur dans le corps de pompe pendant toute la durée du mouvement du piston. La force d'expansion de la vapeur suffit pour opérer une partie du mouvement. Cette force agit comme un ressort qui se détend et pousse le piston jusqu'à l'extrémité de sa course. La détente de la vapeur est aujourd'hui universellement employée, et, toutes les fois que l'on construit une machine, il faut déterminer, par la comparaison de l'effet qui doit être produit avec la force expansive du fluide moteur, quelle partie du corps de pompe le piston peut parcourir par l'effet de la détente, afin de construire des *tiroirs* qui règlent convenablement la distribution de la vapeur.

Enfin, et pour rendre autant que possible le mouvement de la machine uniforme, Watt employa un petit appareil dont on se servait déjà pour régulariser le mouvement des meules des moulins à farine, et dota les machines à vapeur du *régulateur à force centrifuge*, dont nous avons parlé précédemment (page 78).

**MACHINE DE WATT.** — Depuis Watt, la machine à vapeur ne fut guère modifiée que dans la construction des diverses parties qui la composent. Les machines fixes sont, à peu près toutes, sur le modèle de celles qui sortaient des ateliers de Soho. Les améliorations de détail qui y ont été apportées, sauf la détente, ne touchent en rien aux principes essentiels de la construction. Nous résumerons donc tout ce que nous avons dit de l'invention de Watt dans une description générale de la machine (*fig. 320*).

La vapeur arrive par le tube A, venant de la chaudière, pénètre d'abord dans la *boîte de distribution* K. Sur la face de la boîte opposée à celle qui reçoit le tube de vapeur sont trois ouvertures juxtaposées. L'ouverture supérieure communique avec la partie supérieure du corps de pompe P; l'ouverture inférieure avec la partie inférieure, et l'ouverture intermédiaire avec le *condenseur* placé en M. Sur ces trois ouvertures se meut une pièce T, appelée *tiroir*, dont la disposition varie d'ailleurs beaucoup. Le *tiroir à coquilles*, un des plus simples et des plus employés, est une pièce en forme de prisme rectangulaire, creusée d'un côté, à bords parfaitement dressés et dont les dimensions lui permettent de couvrir deux des ouvertures à la fois. Quand le tiroir est à la partie supérieure de sa course, la vapeur arrive au-dessous du piston et pousse celui-ci en haut, et la vapeur qui est au-dessus s'échappe par l'ouverture intermédiaire, appelée

pour cette raison *lumière d'échappement*. Quand le tiroir est à la partie inférieure de sa course, la vapeur arrive au-dessus du piston, pousse celui-ci en bas et la vapeur s'échappe par la *lumière d'échappement*. Ce mouvement alternatif du tiroir est obtenu automatiquement par une pièce EE, calée sur l'arbre de la machine, à profil circulaire, mais qui est traversée par l'arbre en un point qui n'est pas son centre : de là son nom d'*excentrique circulaire*. Cet excentrique est entouré d'une bride en métal, pouvant tourner librement sur son contour en faisant corps avec un

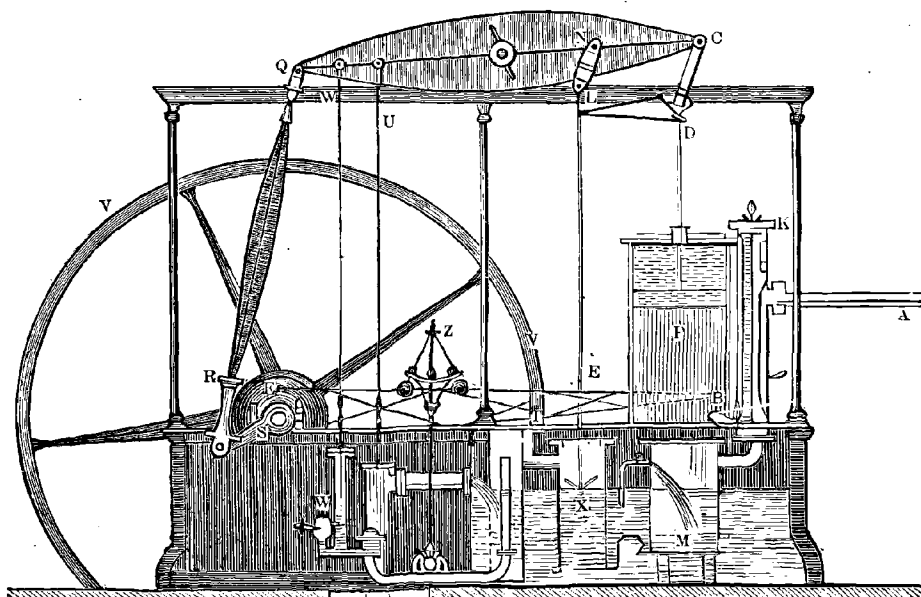


Fig. 320. — MACHINE DE WATT.

grand triangle métallique dont le sommet B s'accroche au bout d'un levier coudé, qui reçoit ainsi un mouvement d'oscillation à la suite duquel la tige à laquelle est fixé le tiroir s'élève et s'abaisse successivement.

On voit ainsi que la tige du piston, liée à l'une des extrémités C du balancier CQ, par l'intermédiaire du parallélogramme articulé CDLN, produit un mouvement alternatif, transformé, comme nous l'avons dit, en mouvement de rotation.

L'autre extrémité Q du balancier est articulée à la bielle QR, qui s'articule elle-même avec la manivelle S du volant V. Ce volant, auquel la machine imprime un mouvement de rotation, est destiné à régler le mouvement général. On détermine généralement les dimensions de façon que les plus grandes variations de vitesse ne dépassent pas  $\frac{1}{15}$  de la vitesse moyenne.

Z est le *régulateur à force centrifuge*.

Comme la condensation de la vapeur ne peut se faire sans que celle-ci cède à l'eau la chaleur qui la maintient à l'état de gaz, l'eau du condenseur M s'échauffe constamment, et il importe de la remplacer, constamment aussi, par de nouvelle eau froide. De là la nécessité d'une pompe d'épuisement X, mue par la tige XL, reliée au balancier; cette pompe refoule l'eau extraite et chaude dans une capacité où agit à son tour la pompe alimentaire WW, pour puiser l'eau et la refouler dans la chaudière. La tige de cette pompe reçoit son mouvement du balancier. A côté d'elle est la tige de la pompe U qui sert à alimenter d'eau froide la bache où plonge le condenseur. Cette pompe, plus puissante que les deux autres, va chercher au dehors l'eau d'alimentation.

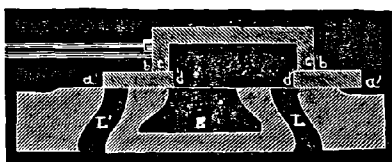


Fig. 321. — TIROIR A DÉTENTE.

Pour obtenir la *détente*, on modifie le mouvement du *tiroir* de façon que la condensation, s'opérant toujours d'un côté du piston, la vapeur cesse d'arriver de l'autre; qu'il y ait donc un temps d'arrêt dans le mouvement. Pour cela, M. Clapeyron a imaginé de fixer sur les bords *bc*, *c'b* du tiroir (*fig. 321*), deux plaques *ad*, *a'd'*, dont la longueur dépasse de beaucoup les ouvertures d'admission LL'. Cet excédent de largeur s'appelle *recouvrement*. De cette façon, l'une des ouvertures peut rester fermée pendant un temps plus ou moins long et la détente est d'autant plus grande que le recouvrement est plus considérable, sans cependant lui être proportionnelle. On peut aussi rendre la *détente* variable à l'aide de la *coulisse de Stephenson*, dont nous parlerons à propos des locomotives (page 711).

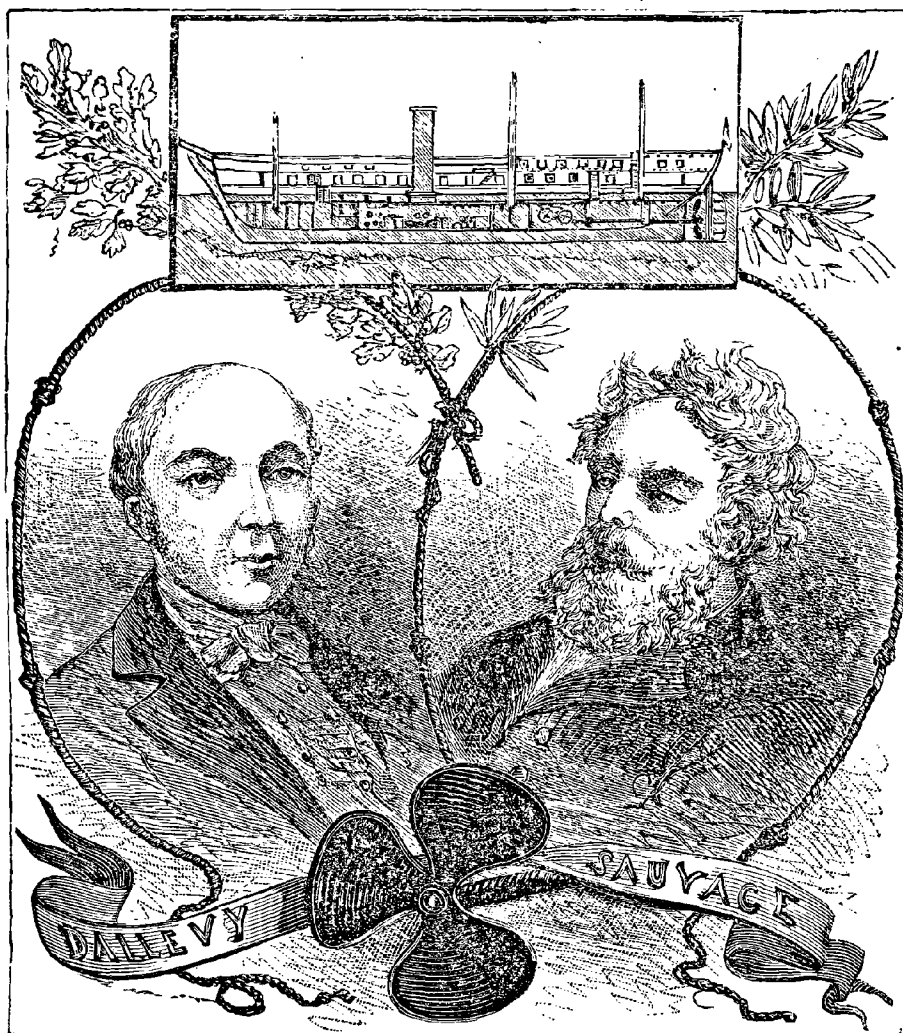
**LES MOTEURS ACTUELS.** — Nos machines à vapeur touchent aujourd'hui à la perfection : cependant il y a encore quelque chose à faire. L'Exposition de 1878 a montré les résultats déjà acquis, et l'on a pu également juger de ce qu'il fallait attendre de l'avenir. Nous résumons, d'après le livre de M. de Parville, la situation de nos moteurs actuels à vapeur.

Rappelons une fois encore le jeu si peu compliqué de la machine à vapeur. Un cylindre fermé dans lequel joue un piston, voilà la machine. La vapeur, venant de la chaudière, entre par un bout, pousse le piston, et, quand celui-ci est parvenu au fond de sa course, un orifice s'ouvre et la vapeur s'en va dans l'atmosphère. Le piston est ramené dans sa position première, la vapeur est introduite de nouveau, et ainsi de suite. A l'extré-



mité du piston qui va et vient, on attache une bielle, à la bielle une manivelle, la manivelle fait tourner un arbre, et c'est tout.

Quand la vapeur agit alternativement sur les deux faces du piston,



DALLERY et SAUVAGE (pages 690 et 691).

la machine est à *double effet*. Lorsque, au lieu de laisser fuir dans l'air la vapeur qui a servi, on la dirige dans un récipient où l'on fait le vide et où l'on projette de l'eau froide, la machine est à *condensation*. La vapeur est aspirée et condensée, et il est clair que, dans ce cas, elle ne gêne plus

le retour du piston sur lui-même ; la distance est diminuée, et le travail augmente d'autant. Si, pendant que le piston progresse, on arrête l'introducteur de vapeur, celle qui est enfermée dans le cylindre se détend comme un ressort, en foulant le piston. La machine est dite à *détente*. La détente est économique, puisqu'on dépense moins de vapeur par coup de piston. Enfin on entend par appareil *distributeur* l'appareil qui ouvre et ferme automatiquement les orifices d'entrée et de sortie de la vapeur.

Ces détails rappelés, le problème à résoudre est celui-ci :

*Un poids de vapeur sous pression pénétrant dans le cylindre, appliquer le plus complètement possible toute la force qu'il porte avec lui à la poussée du piston.*

La solution, qui paraît simple en théorie, est compliquée en pratique. La vapeur pénètre dans le cylindre ordinairement par des orifices, tuyaux qui n'ont que  $\frac{1}{23}$  ou  $\frac{1}{30}$  de la surface du piston. Ces orifices très petits laminent la vapeur et lui font perdre de la pression. A la sortie de ces tuyaux, toutes les machines ont des valves d'entrée qui gênent encore le passage. Après ces différents étranglements, la vapeur arrive dans la boîte d'admission, où elle doit s'engager à travers des orifices qui ne s'ouvrent que progressivement. Nouvelle perte. De là, elle circule encore, avant d'agir sur le piston, dans des couloirs étroits, puis l'échappement se fait de même par des conduits rétrécis qui ne permettent pas une sortie rapide. Il subsiste, par conséquent, une contre-pression derrière le piston. On conçoit sans peine que ces espaces nuisibles et ce mode de fonctionnement diminuent, dans une proportion sensible, la force initiale de la vapeur. C'est du travail inutilisé. Sur 5 atmosphères de pression, on a vu perdre 1 et même 2 atmosphères.

Les constructeurs ont imaginé un grand nombre de dispositifs pour éviter ces inconvénients. La plus connue des machines ainsi améliorées, celle, du moins, qui jouit de la vogue aujourd'hui, est celle de l'ingénieur George Corliss, des États-Unis. Dans ce système (*fig. 322*), la vapeur arrive dans le cylindre par un large conduit de  $\frac{1}{9}$  de la surface du piston. Elle pénètre immédiatement à chaque bout et au-dessus du cylindre, sans intermédiaires. Deux *distributeurs* découvrent rapidement les entrées de vapeur tout entières et les laissent ouvertes pendant l'admission. Quand la vapeur a pénétré sans aucun étranglement et sans remplir d'espaces nuisibles, le régulateur touche un déclic qui produit une fermeture instantanée des distributeurs. La vapeur est immédiatement emprisonnée dans le cylindre et produit toute sa détente. Deux autres distri-

buteurs semblables sont placés à chaque bout et en dessous du cylindre. Ils ouvrent en grand et vite l'orifice de sortie. La vapeur, en communication facile avec le condenseur, s'échappe sans donner de contre-pression derrière le piston. L'échappement ayant lieu au-dessous, l'eau entraînée s'écoule dans le condenseur.

Le mécanisme de la distribution est simple. Le distributeur d'admission est maintenu en place, fermé par un ressort. La tige qui le commande est brisée en deux parties. Le régulateur réunit brusquement les deux parties à l'aide d'un enclenchement, et l'obturateur s'ouvre; puis,

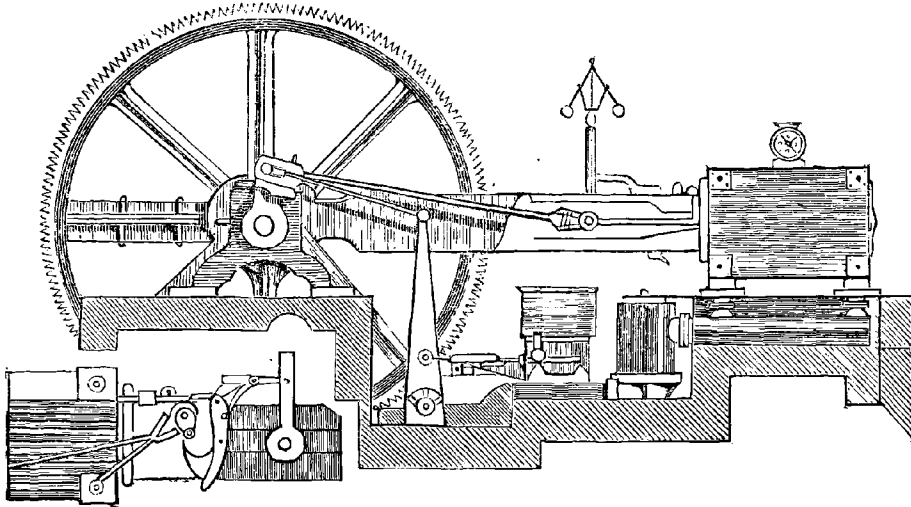


Fig. 322. — MACHINE DE CORLISS.

quand assez de vapeur est entrée, le régulateur fait tomber le déclic; le ressort entre en jeu et ferme brusquement le distributeur. Le mouvement serait même trop brusque: on le diminue à l'aide d'un petit frein à air.

Ces machines réalisent une économie de combustible relativement considérable; elles sont bien agencées, de marche régulière, et économiques d'achat et d'entretien. Évidemment elles justifient la faveur dont elles jouissent.

A côté de la machine américaine, il n'est que juste de citer le moteur Sulzer, dans lequel le mode de distribution par déclenchement rapide est différent. La distribution s'opère ici par quatre soupapes équilibrées: deux à la partie supérieure pour l'admission, deux à la partie inférieure pour l'échappement. Ces soupapes sont manœuvrées à l'aide d'un dispositif très simple, dans le détail duquel il nous semble inutile d'entrer. Qu'il nous suffise de dire que cette machine est encore un type excellent.

Les machines à déclanchement perfectionné réalisent donc de véritables progrès dans l'utilisation de la vapeur. Peut-on dire cependant que les machines à vapeur ont atteint, à notre époque, toute la perfection possible? Non : nous avons encore beaucoup à faire.

Le poids de vapeur dépensée, à chaque coup de piston, se mesure théoriquement en multipliant le volume de vapeur à l'admission par la densité de cette vapeur. Or, entre ce résultat théorique et la réalité, il existe des différences qui se chiffrent par 30, 35 et 60 pour 100; c'est-à-dire qu'une machine dépense beaucoup plus qu'elle ne devrait consommer d'après la théorie. Les travaux de plusieurs ingénieurs et notamment de M. Hirn, de Colmar, semblent mettre sur la voie d'une explication plausible. Quelle que soit la distribution employée, quand la vapeur pénètre dans le cylindre, elle se condense abondamment sur les parois. Le poids de vapeur dépensée se compose donc non seulement de la vapeur qui agit efficacement et dont l'indicateur révèle la tension, mais encore de toute la vapeur ainsi condensée en pure perte. La consommation est accrue sans profit. Au moment de l'échappement, cette buée, mise en communication avec le condenseur, distille et se refroidit, et, quand se fait l'admission suivante, la vapeur trouve toujours les parois refroidies. De là une condensation continuelle d'eau dans le cylindre et une perte de travail considérable.

Watt avait pressenti cette cause de perte, et il enferma le cylindre dans une enveloppe de vapeur. L'influence de cette enveloppe, longtemps contestée, est reconnue aujourd'hui; elle diminue les condensations. Mais le refroidissement, à chaque coup de piston, provient surtout de la communication établie avec le condenseur. Pour parer à cet inconvénient, on a imaginé d'envoyer la vapeur dans un premier cylindre, et, quand elle y est détendue, on la laisse s'échapper dans un réservoir; puis, quand les orifices d'échappement sont fermés, on introduit la vapeur détendue dans un second cylindre en relation avec le condenseur. N'est-il pas évident qu'il n'y aura plus de communication directe entre le cylindre où la vapeur travaille et le condenseur? La cause de condensation est donc évitée.

Ce dispositif ingénieux, de plus en plus répandu, imaginé, dit-on, en 1781, par Jonathan Hornblower, repris par Arthur Wolf en 1804, est connu sous le nom de *Système compound* ou *combiné, avec détente par échelons*. Étudiées par MM. Dupuy de Lôme, Benjamin Normand, Raudolphe et John Elder de Glasgow, et surtout par M. de Fréminville, ces machines sont installées sur un certain nombre de navires de l'État, où la question de combustible est une question vitale.

L'utilisation de la vapeur nous paraît être poussée aussi loin que possible dans ce système, parce qu'on évite en grande partie les condensations nuisibles et que l'on peut accroître la pression initiale dans l'un des cylindres et détendre largement dans le second cylindre. La machine actuelle, bien que déjà récepteur de force excellent, est certainement susceptible d'être perfectionnée encore un peu; son coefficient d'utilisation réel pourra s'élever de 60 à 80 pour 100, et la dépense en combustible s'abaisser proportionnellement, dans les grands moteurs, de 1,000 grammes à 600 grammes. C'est là vraisemblablement la limite extrême à laquelle on parviendra bientôt. On est donc bien près du but.

Et cependant, devons-nous considérer la machine à vapeur moderne comme un moteur parfait?

Une calorie équivaut à 425 kilogrammètres (page 405); 1 kilogramme de houille fournit, par sa combustion, 8,000 calories, soit 3,400,000 kilogrammètres. Or un cheval-vapeur, travaillant une heure, produit 270,000 kilogrammètres; il exige, dans les meilleures machines, une dépense de 1 kilogramme de houille. Le rapport entre le travail que la houille peut donner et le travail réel effectué est donc  $\frac{270,000}{3,400,000}$ , soit de 0,08 environ. Ainsi, les appareils à vapeur les plus parfaits ne transforment en travail que 8 à 10 pour 100, au maximum, de la chaleur dégagée dans le foyer, et ce rapport descend souvent, pour les machines de construction ordinaire, à 5 ou même à 2 pour 100!

Conclusion évidente: nos machines à vapeur touchent à la perfection; mais les appareils de combustion et d'emmagasinement du calorique sont encore dans l'enfance. Or, on ne saurait trop s'efforcer, au point de vue moral, de remplacer le travail d'atelier par le travail en chambre et en famille. La machine à vapeur ne peut être employée pour produire les petites forces; aussi, depuis un siècle s'efforce-t-on de la détrôner et de trouver une autre force motrice. Les moteurs à gaz, les moteurs électriques surtout sont appelés à triompher quelque jour. Nous reviendrons sur ce sujet.

**CHAUDIÈRES.** — Le nombre des formes données aux *chaudières* est considérable; nous nous contenterons de parler des chaudières le plus en usage, de celles dites *chaudières à bouilleurs*. Elles sont formées (*fig. 323*) d'un cylindre A terminé par deux surfaces hémisphériques et communiquant avec deux tubes B, où l'eau bout d'abord. Ces bouilleurs sont d'un diamètre beaucoup plus petit que celui de la chaudière, et ils ont la même longueur; ils communiquent avec elle par le moyen des tuyaux *dd*,

appelés *puisards*, *events* ou *culottes*. La flamme du foyer F circule d'abord au-dessous des bouilleurs B, d'avant en arrière, puis revient entre les puisards, et enfin longe dans l'espace CC, appelés *carneaux*, les portions latérales de la chaudière, pour s'échapper de là dans la cheminée U.

L'inspection de la figure permet de comprendre les dispositions prises pour que la chaleur soit utilisée le plus possible.

La force prodigieuse de la vapeur d'eau, dont les effets s'exercent d'abord sur les parois intérieures de la chaudière, exige de la part de celle-ci une puissance de résistance qu'on n'obtient point sans certaines

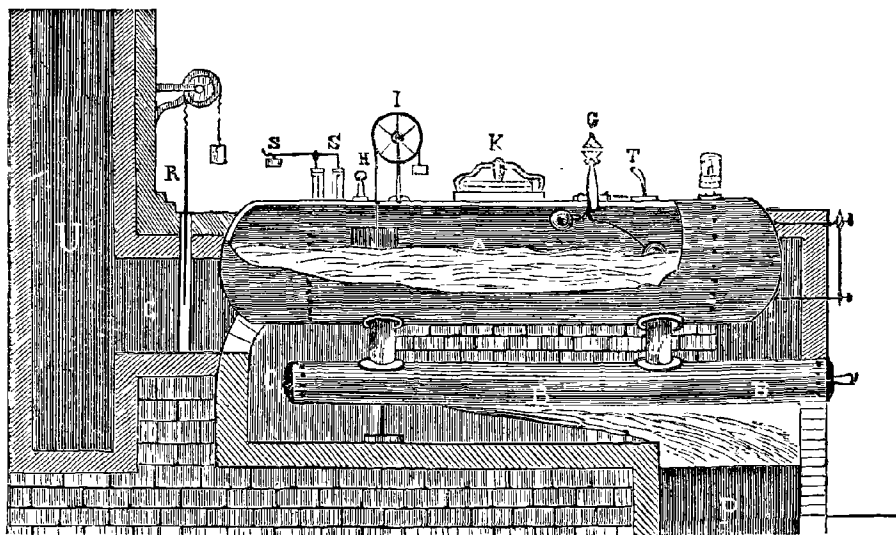


Fig. 323. — CHAUDIÈRE A DEUX BOUILLEURS.

A. Corps de la chaudière. — BB. Bouilleurs. — dd. Puisards. — F. Foyer. — CC. Carneaux. U. Cheminée. — G. Flotteur et sifflet d'alarme. — H. Tuyau d'alimentation. — I. Flotteur indicateur du niveau d'eau. — K. Trou d'homme pour le nettoyage. — SS. Soupape de sûreté. — R. Registre de tirage. — T. Tuyau de prise de vapeur.

conditions de forme, d'épaisseur, de qualité des matériaux employés. Il y a quelques années, des ordonnances officielles réglaient les épaisseurs des tôles ; aujourd'hui, on les a remplacées par une épreuve à laquelle chaque constructeur est tenu de soumettre ses appareils et dont nous avons parlé (page 186). Cependant les mécaniciens, par mesure de prudence, utilisent cette règle que voici : l'épaisseur est évaluée à  $0^{\text{m}},003$  auxquels on ajoute le produit de  $1^{\text{mm}},8$  par le nombre d'atmosphères et par le diamètre de la chaudière. Ainsi, soit une chaudière de  $1^{\text{m}},20$  de diamètre, destinée à supporter une pression de quatre atmosphères et demie. L'épaisseur de la tôle devra être :

$$3^{\text{mm}} + (1^{\text{mm}},8 \times 1,20 \times 4,5) = 3^{\text{mm}} + 9^{\text{mm}},72 = 12^{\text{mm}},72.$$

A la chaudière sont encore adaptés des appareils de sûreté, *flotteurs d'alarme* pour avertir quand le niveau d'eau de la chaudière s'abaisse d'une façon anormale, *souppapes de sûreté* quand la vapeur acquiert tout à coup une force élastique trop grande pour la chaudière, *manomètres* pour donner les variations de tension de la vapeur.

Ces chaudières sont dites à *foyer extérieur* parce que la chaudière est sur le feu; nous verrons ci-après que Dallery et Marc Seguin inventèrent les chaudières à *foyer intérieur*, afin d'accroître la *surface de chauffe*.

**DIVERS TYPES DE MACHINES A VAPEUR.** — Les différents systèmes de machines à vapeur peuvent être classés en trois catégories : 1° d'après la force élastique de la vapeur ; 2° d'après son mode d'action ; 3° d'après la disposition du mécanisme et la manière dont se transmet le mouvement du piston.

Au point de vue de la force élastique de la vapeur, les machines sont à *basse pression*, à *moyenne pression*, à *haute pression*, suivant les tensions de la vapeur donnée par la chaudière, comme nous l'avons indiqué ci-dessus.

Au point de vue du mode d'action de la vapeur, la machine peut être à *condensation* ou *sans condensation*, avec ou sans *détente*.

Au point de vue de la manière dont se transmet le mouvement au piston, les machines sont à *balancier*, comme celle de Watt, c'est-à-dire le mouvement se transmettant indirectement, ou *verticales*, *horizontales*, *oscillantes*, quand le mouvement du piston se transmet directement à l'arbre de couche.

Un traité spécial des machines pourrait seul donner les différents systèmes imaginés par les constructeurs. Les conditions d'emploi des machines à vapeur dans l'industrie et l'agriculture sont maintenant tellement variées qu'il est impossible de vouloir appliquer un type de machine à tous les cas qui peuvent se présenter. Telle considération, dénuée d'importance dans une ou plusieurs applications données, devient au contraire prépondérante dans une application spéciale. Il en est des chevaux-vapeur comme des chevaux animés ; il y a des qualités qui s'excluent, et entre lesquelles il faut donc choisir les unes ou les autres, selon les résultats qu'on veut obtenir. Remarquons seulement que l'application des machines à vapeur à l'agriculture est certes une des conquêtes les plus précieuses de notre époque. Il nous semble inutile d'insister sur ce point : l'avenir, en effet, remplacera évidemment le paysan brutal, ignorant, brisant son intelligence dans des travaux effroyables, par le conducteur

de machines dont l'esprit sera toujours en éveil et qui sera un homme, un électeur, un citoyen et non une pioche ou une bêche animée, de même qu'il remplacera le manœuvre des villes par le mécanicien intelligent.

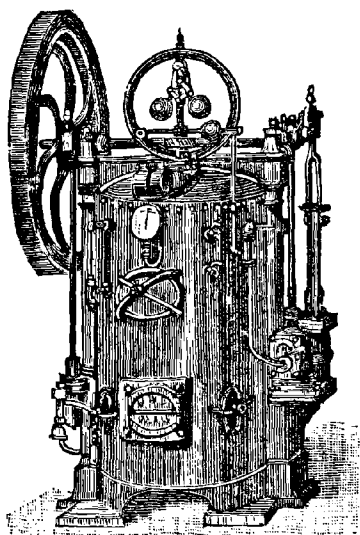


Fig. 324. — MACHINE VERTICALE  
HERMANN-LACHAPPELLE.

En France, la célèbre maison Hermann-Lachapelle, dirigée aujourd'hui par M. l'ingénieur Boulet, a créé des types de machines à vapeur de toutes sortes, qui vulgarisent de plus en plus chaque jour l'emploi des moyens mécaniques. Elles mettent à la disposition de toutes les industries manufacturières ou agricoles une force docile, sans danger, coûtant bon marché, aussi facile à déplacer, à transporter, qu'à conduire. Ces machines fonctionnent, en particulier, dans les chantiers de la marine et des travaux publics, à l'École des ponts et chaussées de Paris, pour servir à des études et à des démonstrations pratiques dans l'enseignement des élèves, à la Sorbonne pour le fonctionnement des

nouveaux appareils servant à l'éclairage électrique, etc.

Elles sont employées avec le plus grand succès dans une foule d'établissements : imprimeries, papeteries, confiseries, sucreries, ateliers mécaniques, ateliers de constructions, etc. Elles remplacent avec un avantage énorme les manèges et les moteurs à vent; elles conviennent spécialement à tous les besoins d'une exploitation agricole : mise en action des machines à battre les céréales et à préparer la nourriture des bestiaux, service des distilleries, manœuvre des pompes élévatoires, d'épuisement ou d'irrigation, aux travaux de drainage, pour le broyage des os, la préparation des engrais, etc.

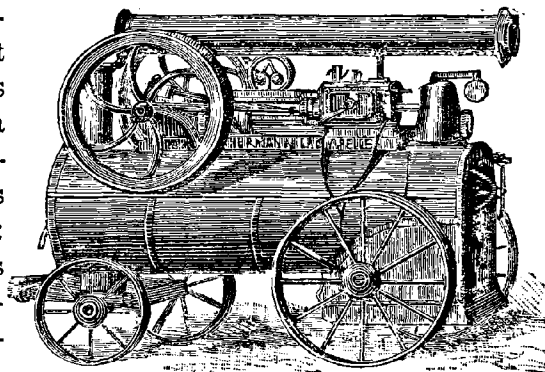
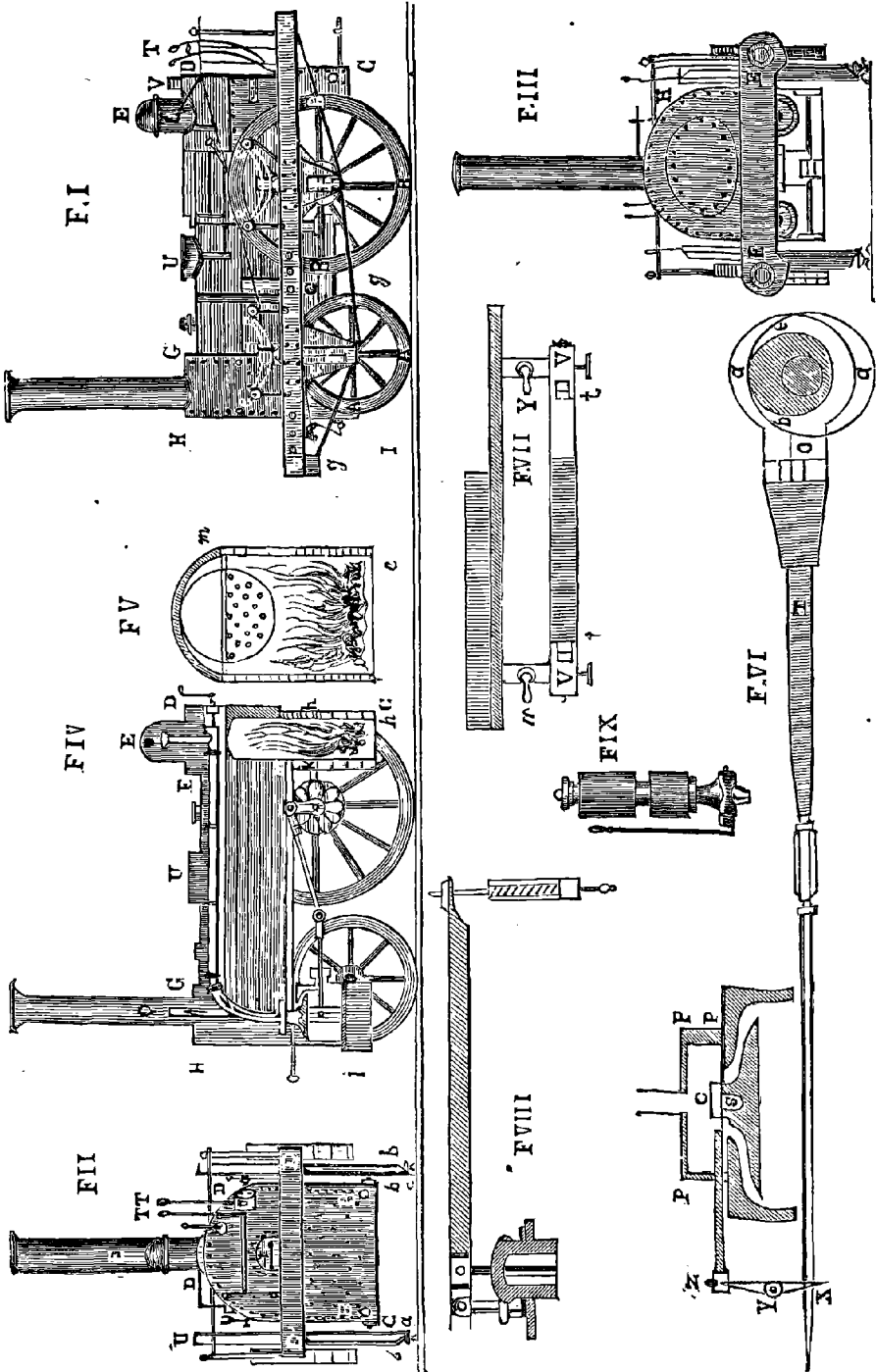


Fig. 325. — MACHINE HORIZONTALE LOCOMOBILE  
HERMANN-LACHAPPELLE.

Un grand nombre ont été spécialement installées dans des moulins,



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



La locomotive (page 705).



auxquels elles assurent, seules ou concurremment avec l'eau et le vent, un travail régulier en toute saison.

Nous nous contenterons de citer les machines à vapeur verticales, montées sur un socle-bâti isolateur, avec chaudières à bouilleurs et foyer intérieur (*fig. 324*), et ses machines à vapeur horizontales locomobiles, à chaudière tubulaire à foyer intérieur (*fig. 325*), et particulièrement son moulin sur colonne-beffroi en fonte, de forme élégante et bien appropriée (*fig. 326*). Sa construction est aussi simple que solide; possédant par lui-même son assise et une stabilité parfaite, il ne demande ni fondations, ni bâtisse, ni points d'appui extérieurs, et n'occasionne, par conséquent, aucun frais d'installation. Il n'occupe que peu d'espace, et peut se loger partout; on le place sur le plancher ou sur le sol dallé ou simplement nivelé, à l'endroit qui paraît le plus convenable. Il y fonctionne sans bruit, sans trépidations et sans occasionner le moindre ébranlement aux bâtiments, aux murs auxquels il n'adhère par aucune espèce de charpente ni d'armure. Rien ne l'attache au sol, et, s'il convient de le changer de place, de le transporter d'un endroit à un autre, on le peut sans difficulté.

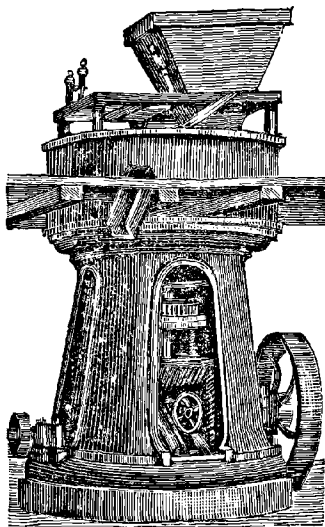


Fig. 326. — MOULIN  
HERMANN-LACHAPELLE.

Le beffroi a la forme d'une colonne creuse, percée de quatre baies latérales; il est, nous l'avons dit, en fonte d'une seule pièce, et porte toutes les parties du moulin. Le mécanisme monté à l'intérieur, réduit au plus petit nombre de pièces possible, est des plus simples et des plus solides; l'entretien en est facile, il n'est pas susceptible de dérangement; pour plus de solidité et de légèreté, l'acier a été employé partout où l'on a pu.

L'expérience a démontré que, de tous les appareils de mouture, c'est celui de deux meules circulaires, l'une fixe, l'autre mobile, qui donne les meilleurs résultats, et il n'en a pas été cherché d'autre.

La meule gisante repose dans l'entablement de la colonne-beffroi, formant cuvette et qui lui sert de socle et d'enchevêtrement, fixée à demeure, et rigidement maintenue par des vis de pression; aucun effort ne peut déranger son assise, ni son niveau, ni la coïncidence de son axe avec celui de l'arbre vertical.

La meule courante est posée en équilibre sur le pointal de l'arbre vertical, ou fer des meules, par une anille qui l'emboîte dans un chapeau

claveté lui-même sur l'arbre, de manière que celui-ci entraîne à la fois l'anillé et la meule dans son mouvement, sans qu'il puisse se produire aucun frottement nuisible.

Le *boitard*, indépendant de la meule gisante, est fixé sur une couronne qui forme le centre de la cuvette-entablement, maintient ainsi avec plus de rigidité le fer des meules et empêche mieux ses vibrations. Un palier, formé par une forte arcade boulonnée sur le socle du beffroi,

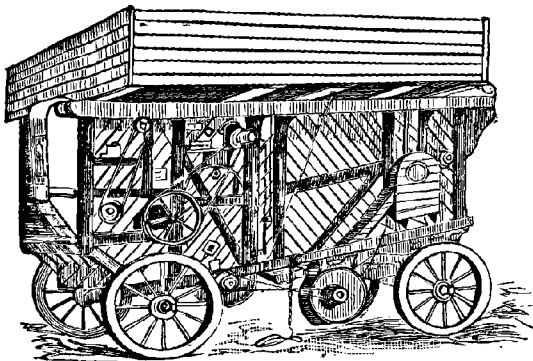


Fig. 327.

BATTEUSE PERFECTIONNÉE ANGLAISE.

porte la crapaudine dans laquelle fonctionne le pivot du fer des meules; l'arbre de couche, qui porte la poulie de commande, passe en dessous et transmet le mouvement au fer des meules par un engrenage conique.

La *trempe*, qui règle l'écartement des meules, est gouvernée par un volant, bien sous la main, et d'une manœuvre aisée.

L'*archure* porte la trémie, munie à volonté d'un

frayon ou d'un distributeur. Une potence mobile fort simple sert à enlever les meules pour le rhabillage.

Le fonctionnement de ces moulins est si régulier, tout a été si bien prévu pour éviter les pertes de forces, les complications et les frottements, que l'expérience comparative a prouvé que, pour le même rendement, il fallait *un quart de moins de force*, ce qui donne, outre l'usure en moins, *une économie de 25 pour 100*.

Nous empruntons, en terminant, à la *Chronique industrielle*, un des organes les plus autorisés de la presse scientifique, quelques mots du compte rendu de l'exposition du concours agricole de l'une des deux grandes associations anglaises, *The Bath and West of England Society*, qui s'est tenue en juin 1881, près de Londres, afin de donner un exemple de ce que l'on peut attendre des machines à vapeur.

Le nombre des *Machines à vapeur agricoles*, c'est-à-dire faisant la traction, et pourvues d'un arbre secondaire et d'une poulie, s'accroît tous les ans; ces machines peuvent non seulement se déplacer et traîner au besoin des wagons, mais aussi elles font marcher le matériel de la ferme. Il y avait, comme toujours, à cette exposition, des locomobiles ordinaires,

qui généralement faisaient fonctionner des batteuses de grain. La batteuse perfectionnée anglaise est une machine très compliquée ; aussi nous donnons ici la vignette d'une des meilleures de l'espèce (*fig.* 327), celle de MM. Marshall, Sons and Co., de Gainsborough. Cet appareil, non seulement bat le blé, mais il le livre en sacs, tout nettoyé et prêt pour la mouture. Le tambour batteur, qui a 1<sup>m</sup>,37 de largeur, comporte un tamiseur qui peut être réglé selon les besoins. Il y a de plus un élévateur de menue paille et un alimenteur automatique de sûreté.

**BATEAUX A VAPEUR.** — De tout temps, pour ainsi dire, on a essayé de naviguer sans voiles et sans rameurs. L'essai de Blasco de Garay (page 635) ne fut pas le seul ; à l'époque de Papin, il existait en Allemagne des bateaux dont les rames étaient mises en mouvement par un manège que les chevaux faisaient tourner. Papin essaya d'utiliser le moteur qu'il avait trouvé dans sa machine à vapeur pour la marche des bateaux. Il avait fait construire un bateau destiné à faire des expériences. La machine qui le faisait marcher n'a pas été décrite ; on sait cependant qu'elle faisait tourner deux roues, placées sur les flancs du bateau, et agissant sur l'eau absolument comme des rames. Ces roues étaient à aubes planes ; elles plongeaient en partie dans l'eau, et, dans leur mouvement de rotation, elles exerçaient une pression très considérable sur le liquide, de sorte qu'elles produisaient l'effet d'un grand nombre de rames. Le bateau achevé, Papin l'essaya sur les eaux de la Fulda et fut satisfait du résultat de l'expérience ; car « *la force du courant de la rivière, dit-il dans une lettre adressée à Leibniz, et datée du 15 septembre 1707, était si peu de chose en comparaison de la force de mes rames, qu'on avait de la peine à reconnaître qu'il allait plus vite en descendant qu'en montant.* » Ce succès lui donna l'idée d'aller à Londres avec son bateau et d'y faire des expériences en grand. Pour cela, il demanda la permission de faire passer son bateau de la Fulda sur le Weser ; car toutes les barques qui descendaient la Fulda étaient déchargées à Münden, la navigation sur le Weser leur étant défendue. La permission lui fut refusée, bien entendu. Malgré cela, Papin se mit en marche, espérant vaincre toutes les difficultés et passer facilement, puisque son bateau n'était pas destiné au commerce. Mais il fut trompé dans son attente, les bateliers de Münden brisèrent son bateau. Papin, dégoûté par cet échec, ne chercha pas à renouveler ses expériences.

Après Papin, il faut citer le marquis de Jouffroy (1). Il avait long-

(1) JOUFFROY (le marquis de), né vers 1751, était capitaine d'infanterie avant la Révolution. Sans fortune, sans appui, il fut longtemps sans pouvoir expérimenter ses idées ; néanmoins, il refusa

temps étudié la question des *moyens de suppléer à l'action du vent*, que l'Académie des sciences avait mise au concours en 1773. Il se rendit à Paris en 1775 et étudia les dispositions et le mécanisme de la *pompe à feu* de Chaillot. La vue de cette machine ne fit que confirmer ses idées, et il les exposa dans un petit comité, dont était membre l'ingénieur Périer, attaché à la machine de Chaillot. A peu près dans le même temps, Hulls, en Angleterre, avait disposé, pour remorquer les navires à l'entrée des ports, une machine à vapeur remplaçant tout simplement le câble et le cabestan des remorqueurs ordinaires; en France, l'abbé Gauthier avait essayé de faire mouvoir un bateau avec la machine de Newcomen, mais son essai n'avait point réussi. Jouffroy s'associa d'abord avec Périer; mais, après quelques désaccords, il résolut de poursuivre seul son idée. Il construisit un bateau ayant 12<sup>m</sup>, 99 de longueur sur 1<sup>m</sup>, 94 de largeur. Les rames furent remplacées par un appareil essayé pour la première fois, à Berne, en 1759, et désigné sous le nom de *système palmipède*. C'était une imitation de l'appareil de locomotion des canards. L'extrémité de la rame se composait de deux volets qui s'ouvraient lorsque la rame devait agir sur le liquide, et se fermaient lorsqu'elle revenait à sa position primitive. Mais bientôt Jouffroy leur substitua des roues à aubes planes. Cependant le bateau à rames palmipèdes navigua pendant les mois de juin et de juillet 1779. Un autre bateau de 46 mètres de longueur sur 5 mètres de largeur lui fut substitué et navigua à Lyon sur la Saône, ainsi que le relate un procès-verbal dressé par l'Académie de Lyon le 10 août 1783. Jouffroy, ce succès obtenu, voulut fonder une compagnie et établir des transports réguliers par bateaux à vapeur; mais, à cette époque, il fallait obtenir un privilège, et l'Académie des sciences, consultée, voulut voir des expériences; Jouffroy, ruiné, ne put établir un nouveau bateau à Paris, et la navigation à vapeur fut ensevelie dans l'oubli.

La *machine à double effet* ayant été découverte alors, Fitch et Rumsey, en Amérique, s'en servirent; leurs essais furent absolument infructueux; en Angleterre, Miller, Symmington, Stanhope ne furent pas plus heureux. Il était réservé à Fulton (1) de réaliser enfin et définitivement cet immense progrès.

de les laisser exploiter à l'étranger. Il émigra pendant la Révolution et ne rentra qu'après la chute de Napoléon. Une société s'était formée en 1816 pour l'aider à exécuter ses plans; mais il se ruina et mourut aux Invalides en 1832. L'Académie des sciences a reconnu et proclamé, en 1840, la priorité de sa découverte.

(1) FULTON (Robert), né en 1764, en Amérique, dans l'État de Pensylvanie, d'émigrés irlandais, n'eut d'abord aucune instruction, et fut placé en apprentissage chez un joaillier. Il quitta bientôt ce métier, et se fit peintre de portraits. Il gagna assez d'argent dans cette nouvelle profession pour établir convenablement sa famille. Franklin, qu'il connut, l'engagea à passer en Angleterre où il con-

La France, qui avait été témoin des premiers succès de la navigation à vapeur, s'émut enfin. En 1815, on accorda un brevet au marquis de Jouffroy, qui, de retour d'émigration, faisait valoir la priorité de ses expériences. Un bateau fut construit sous le nom de *Charles-Philippe*, et lancé le 20 août 1816. Mais bientôt on contesta à Jouffroy la validité de son brevet, et la société Pajol, qui lui fit concurrence, arrêta pendant quelque temps les progrès des bateaux à vapeur sur le continent. Ce n'est qu'en 1822 que Marestier, et un peu plus tard Hubert, qui, après des études sur la construction des machines en Angleterre et aux États-Unis, permirent à la France d'être au niveau des autres peuples, et d'avoir, la première, sur le continent, une marine à vapeur.

En Angleterre, dès 1812, la *Comète*, et, en 1815, le *Rob-Roy* faisaient des voyages; mais en 1817 seulement, les deux navires *Hibernia* et *Britannia* allèrent sur mer. En 1825, un bateau à vapeur anglais doubla le premier le cap de Bonne-Espérance et arriva aux Indes; ce voyage lui avait été facilité par le voisinage des côtes, qui permettait de s'approvisionner de combustible. Bientôt naquit le projet de traverser l'Océan sans

tinna la peinture (1786), mais il l'abandonna pour se livrer à la mécanique. Après avoir habité les villes industrielles d'Exeter et de Birmingham, il se rendit à Londres où il partagea les travaux de Rumsay. A la mort de celui-ci, il s'occupa des bateaux à vapeur, préconisant les roues à aubes plates, alors dédaignées. En même temps il inventait des charrues destinées à creuser des canaux, des moulins pour polir et scier le marbre, des machines à filer le chanvre et le lin. Mais ses ressources étant épuisées, il vint à Paris en 1796, afin de mettre son génie au service de la France, alors en guerre avec l'Angleterre, de laquelle, en qualité d'Américain, il désirait l'abaissement. Il demanda la protection du Directoire, puis de Bonaparte, devenu consul à vie, mais, quoique la plupart de ses essais de bateaux sous-marins eussent réussi, le gouvernement repoussa ses projets de bateaux à vapeur. Encouragé cependant par Livingstone, alors ambassadeur des États-Unis à Paris, et qui, lui aussi, cherchait le problème de la navigation à vapeur, il reprit ses expériences, et parvint enfin, en 1804, à faire manœuvrer sur la Seine un bateau à vapeur de 33 mètres de long sur 2<sup>m</sup>,50 de large, et ayant une vitesse de 1<sup>m</sup>,60 par seconde, contre le courant. Il s'adressa alors à Napoléon pour obtenir des secours afin de construire des bateaux semblables. On a répété que Napoléon avait méconnu le génie de Fulton : c'est une erreur. Une lettre de Napoléon, datée du camp de Boulogne le 21 juillet 1804 et insérée au *Moniteur*, prouve qu'il avait deviné le génie de l'inventeur. Néanmoins, se méfiant de ses propres lumières, il soumit son jugement à l'Institut. Une commission fut nommée pour apprécier la *vérité physique et palpable* que Napoléon avait entrevue, et cette commission conclut au rejet de la proposition de Fulton ! Le gouvernement anglais offrit alors à Fulton de lui acheter son procédé pour détruire les navires en mer; Fulton refusa et retourna en Amérique, en 1806, emportant une machine construite dans les ateliers de Watt. A peine arrivé à New-York, il fit construire un grand bateau que l'on appelait par dérision la *Folie-Fulton* et auquel il donna le nom de *Clermont*. En 1807, après quelques essais dans le port de New-York et après avoir corrigé quelques défauts, il établit un service régulier sur l'Hudson, entre New-York et Albany, situé à 60 lieues de là. Le premier voyage s'accomplit en 33 heures et le retour en 30 heures. La navigation à vapeur était créée. Un brevet fut accordé à Fulton le 11 février 1809; dès 1811, quatre bateaux sillonnaient les rivières d'Amérique, et l'on construisait une frégate à vapeur pour la défense du port de New-York. Mais Fulton ne devait pas voir son triomphe. S'étant jeté dans l'Hudson glacé pour sauver un de ses amis, il prit une fièvre grave dont il se serait peut-être guéri, s'il n'avait voulu, pendant sa convalescence, aller diriger la construction de sa frégate. Sa mort fut un deuil pour les États-Unis, et toutes les autorités de New-York assistèrent à ses funérailles (1815).

le secours de la voile. On le regarda d'abord comme une folie ; des savants en proclamèrent l'impossibilité ; mais rien ne put arrêter les spéculateurs : l'élan était donné. Le 5 avril 1838, le *Sirius* partait du port de Cork, le point de la Grande-Bretagne le moins éloigné des États-Unis ; et, le 8 avril, le *Great-Western*, frété par une compagnie rivale, appareillait à Bristol. Le 23 avril, les deux navires se trouvaient dans les eaux de New-York.

Nous allons maintenant expliquer quelles modifications a dû recevoir la machine fixe pour fournir une force motrice convenable. D'abord il a fallu

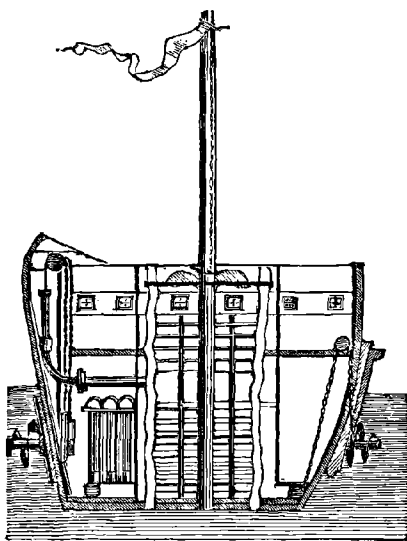


Fig. 328. — COUPE  
DU BATEAU A VAPEUR ET A HÉLICE  
DE CH. DALLERY.

changer la forme des chaudières. Il eût été fort difficile d'installer sur un bateau ces énormes cylindres que l'on emploie dans nos machines ordinaires ; aussi chercha-t-on à diminuer leur volume en augmentant en même temps la surface de chauffe. Un cylindre, d'un diamètre relativement considérable, muni de *bouilleurs* enveloppés complètement par la flamme du fourneau, compose les chaudières actuelles, qui, sous un petit volume, produisent d'énormes quantités de chaleur. En général, on adapte deux chaudières à chaque machine.

La partie la plus importante d'un bateau à vapeur est, sans contredit, l'agent propulseur. Les roues à aubes sont certainement l'appareil le plus simple et le plus facile à réparer. Elles constituent

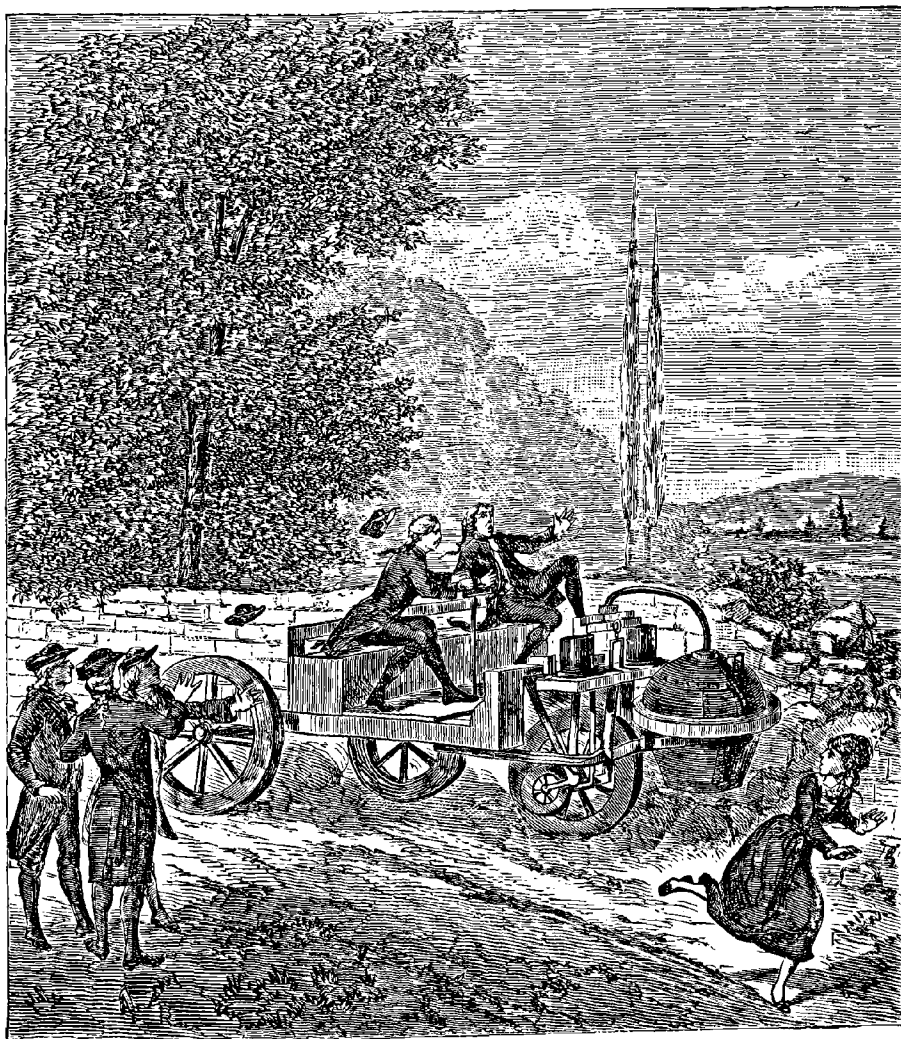
un système excellent pour la navigation des fleuves ; mais elles présentent pour la mer de graves inconvénients. Toutes les fois, en effet, que la mer est agitée, le bateau prend toutes sortes de positions. Or, dans les positions où le navire est penché sur le côté, la plupart du temps une des roues tourne à vide, ce qui produit de grandes variations de vitesse et des changements brusques de direction.

Le navire est alors fort difficile à diriger : il tend à tourner tantôt à droite, tantôt à gauche, et ces mouvements déviatoires sont la plupart du temps fort rapides et, par conséquent, dangereux.

Les navires à roues ne peuvent naviguer sur les canaux dont ils détruisent les berges ; ils entrent difficilement dans les ports, à cause des énormes tambours qui protègent les roues ; ils sont plus sujets à heurter



d'autres navires et ne peuvent être transformés en navires à voiles.  
Les roues ont dû être remplacées par l'hélice.  
L'hélice n'est pas d'invention moderne ; on l'a souvent proposée pour



Première voiture à vapeur de Cugnot, en 1769 (page 696).

remplacer la rame sur les bateaux. Avant la découverte de la vapeur, en 1577, Bushnell avait installé une hélice sur son bateau plongeur, et réussi à marcher avec une extrême facilité, sous l'eau, dans toutes les directions. En 1803, au moment même où Fulton essayait à Paris les

roues à aubes, Dallery (1) construisait un bateau à vapeur qu'il munissait de deux hélices simples, placées l'une à l'avant, l'autre à l'arrière du bateau, et au-dessous de la ligne de flottaison (*fig.* 328). La vapeur, fournie par une *chaudière tubulaire* (page 701), imprimait un mouvement de rotation à un axe qui, à son tour, faisait mouvoir des hélices au moyen de poulies et de chaînes sans fin. Une de ces hélices servait de gouvernail, et l'autre de propulseur. Dallery avait obtenu, en 1803, un brevet qui constatait sa découverte; mais, ruiné, il fut obligé d'abandonner son entreprise, et il ne put jamais renouveler ses essais.

Cette expérience avortée fit oublier les avantages de l'hélice; mais, en 1823, M. Delisle, capitaine du génie, reprit la question, et prouva la supériorité de ce propulseur sur les roues à aubes. Seulement il croyait obtenir un effet utile plus considérable en se servant d'une hélice à trois spires. Il proposa au ministre de la marine de réformer le propulseur des bateaux

(1) DALLERY (Thomas-Charles-Auguste), né à Amiens le 4 septembre 1754. Son père était facteur d'orgues; dès la plus tendre jeunesse il montra un goût décidé pour la mécanique, et, à douze ans, il avait construit une horloge de bois à *équations*, remarquable par la précision du mouvement et le fini des pièces. A peine sorti de l'enfance une fatalité sembla peser sur lui. Pour son début, il apporta une grande modification dans la construction des harpes: un facteur de Paris à qui il avait communiqué son perfectionnement s'empara de l'idée du jeune homme, prit un brevet et s'enrichit à ses dépens. Il s'occupa des orgues, ayant succédé à son père; et bientôt ses perfectionnements rendent célèbres ses instruments. C'est alors qu'il inventa la *chaudière tubulaire*, appliquée d'abord aux voitures à vapeur, utilisée ensuite pour donner une perfection inouïe à ses tuyaux d'orgues, puis reconstruite plus tard et amenée à Paris dans les ateliers de Brezin, célèbre mécanicien de l'époque, établi rue d'Enfer. Ch. Dallery commençait à se faire une position convenable, lorsque la Révolution éclata. L'industrie des orgues s'annihilant, Dallery s'attache à la construction des clavecins, et y apporte de merveilleuses modifications. En même temps, il imagine des moulins à vent dont le mécanisme présentait des avantages incontestables; mais, comme il avait jugé à propos de faire mouvoir les ailes dans un plan horizontal, son perfectionnement est méconnu par la routine. Il fabrique des *moutgolfières*, quoiqu'il ne connût que de nom l'admirable invention des frères Montgolfier. Il trouve alors une avantageuse application de la vapeur à la fabrication des limes: deux fabriques à Ambroise et à Nevers sont créées. C'est la première application de la vapeur comme moteur universel: Dallery n'y gagne rien. Il cherche alors à se faire une position dans l'horlogerie. Il débute en construisant des montres dont le cadran n'était pas plus grand qu'une pièce de cinquante centimes, montres destinées à être enchâssées dans des bagues, le plus souvent à répétition, à cylindre et d'une régularité parfaite. Dallery avait dû créer les outils nécessaires à la construction de ces montres; l'horlogerie infiniment petite n'était pas connue à cette époque, et les outils qu'il a inventés sont ceux encore en usage aujourd'hui et sont regardés comme ayant atteint leur dernier degré de perfectionnement. Ruiné encore, Dallery essaya de la bijouterie et, pendant 30 ans, il obtint des résultats admirables. La bijouterie moderne est complètement basée sur ses travaux et les outils qu'il a encore inventés pour ces travaux n'ont pas été modifiés. Cette profession eût pu lui suffire s'il n'avait ambitionné la gloire d'une autre invention, celle des bateaux à vapeur. Il construisit alors le premier bateau à vapeur à hélice, l'essaya à Bercy, réussit, mais dissipa dans cette œuvre le fruit des économies de toute sa vie. Il prit un brevet le 29 mars 1803, brevet dans lequel il rappelait sa voiture à vapeur d'Amiens perfectionnée (page 701). Il espérait que le gouvernement viendrait à son secours pour lui permettre d'achever son œuvre; mais n'ayant rien pu obtenir, il brisa lui-même son bateau, au moment où celui de Fulton passait devant son œuvre inconnue. Il mourut en juin 1833, à Jouy, près de Versailles, où il s'était retiré depuis 1825. Ajoutons que c'était non seulement un homme de génie, mais un homme honnête et un homme de cœur.

de l'État; mais sa proposition fut rejetée. L'Angleterre en profita; un constructeur anglais, M. Smith, construisit les premiers navires à hélice, mais il employait les hélices multiples, ou bien plusieurs spires d'hélice simple. Un Français prouva la supériorité de l'hélice simple à une seule spire. Quoique découverte par Dallery, comme nous venons de le dire, l'hélice simple fut alors, pour ainsi dire, réinventée par Sauvage (1). Mais, pendant que la misère encore et l'insouciance des gouvernements empêchaient l'inventeur de faire valoir ses droits et de continuer ses expériences, des ingénieurs anglais osèrent s'emparer de l'invention et spéculer sur le malheur de celui qui avait créé le nouveau propulseur.

Les avantages de l'hélice sont immenses : elle est toujours dans l'eau, quelle que soit la position d'un navire; elle fonctionne aussi facilement pendant la tempête que pendant le calme; elle est presque hors d'atteinte des boulets et ne peut être détériorée par la chute des mâts. Le bâtiment, plus étroit, offre moins de prise au vent, et manœuvre avec plus de facilité au milieu d'une flotte; l'absence de roues permet d'établir des batteries sur toute la longueur du navire. La machine des bateaux à hélice étant à l'arrière, tandis qu'elle doit être au milieu pour les bateaux à roues, on peut plus facilement, dans le premier cas, installer des mâts, et, par conséquent, transformer à volonté le navire à vapeur en navire à voiles. Elle est d'une grande utilité pour les bateaux de commerce, en ce que, occupant un espace très restreint, elle laisse disponible toute la cale du navire.

A côté de ces avantages se trouvent des pertes considérables de force motrice, une infériorité de vitesse dans les circonstances ordinaires de la navigation, le bruit désagréable des engrenages destinés à transmettre le mouvement, la difficulté de retirer l'hélice pour la réparer, etc. Néanmoins, la pratique de tous les jours a démontré la supériorité de l'hélice sur les roues à aubes; aussi, sauf des cas particuliers, n'emploie-t-on presque plus que le propulseur inventé par Dallery et par Sauvage.

(1) SAUVAGE (Frédéric), constructeur, né à Boulogne-sur-Mer en 1785, mort au mois d'août 1857, dans une maison de santé de la rue Picpus, à Paris. Poursuivant sans cesse un succès qui lui échappa toujours, il ruina sa santé et sa fortune par des travaux coûteux et incessants. En 1842, il adressait à l'Académie des sciences un mémoire réclamant la priorité de l'invention de l'hélice. Arago, dans son discours en faveur du malheureux inventeur, le montre, assistant, d'une des fenêtres de la prison pour dettes de Boulogne-sur-Mer, à des essais de son système faits, dans le port, par des ingénieurs anglais. On conçoit qu'un semblable spectacle ait pu ébranler la raison d'un homme doué d'une imagination ardente. Les dépenses excessives qu'occasionnèrent ses nombreux essais l'ayant réduit à la misère, Louis-Philippe lui accorda une pension en 1846; mais Sauvage était tombé dans un état voisin de la démence, et il y est demeuré jusqu'à sa mort. Sa ville natale lui a élevé une statue en 1881.

**MACHINES A VAPEUR MARINES.** — L'application de la vapeur à la navigation, soit militaire, soit commerciale, fait chaque jour des progrès considérables. Il n'est pas superflu d'indiquer les principaux.

D'abord il faut signaler l'accroissement remarquable des dimensions des navires, l'affinement des formes, la légèreté jointe à la solidité. On construit aujourd'hui couramment des paquebots de 130 mètres de longueur, fréquentant les ports pour lesquels, il y a quelques années encore, les longueurs de 90 mètres étaient considérées comme des limites supérieures infranchissables. Les machines pour lesquelles on n'osait employer sur mer que des tensions de vapeur de deux atmosphères et demie montent aujourd'hui à des pressions de quatre et cinq atmosphères. Ces résultats n'ont pu être obtenus qu'à l'aide de condenseurs à surface de Hall, essayés d'abord sans succès, il y a trente ans. On peut ainsi alimenter les chaudières avec la vapeur qui vient de travailler dans les cylindres. On les met de cette manière absolument à l'abri des incrustations produites par le sulfate de chaux. Au moyen d'extractions insuffisantes, il était possible, il est vrai, d'éviter les dépôts de sel marin; mais le sulfate de chaux de l'eau de mer, cessant d'y rester en dissolution à une température supérieure à 150°, tapissait les parois des chaudières dès qu'on voulait s'approcher des tensions de quatre à cinq atmosphères. Or ces incrustations devenaient une cause imminente d'explosion.

L'emploi des hautes pressions a permis de réduire le volume des appareils; la perfection de l'ajustage, les bonnes dispositions des pompes à air ont eu pour résultat d'accroître le nombre des tours de machine et d'augmenter notablement la vitesse des pistons. Les vitesses sont effectivement montées de 1<sup>m</sup>,50 par seconde à 2<sup>m</sup>,80, pour des allures très régulières. On a diminué considérablement la dépense en combustible en ayant recours à une très grande détente de la vapeur opérée dans des cylindres séparés.

Les nouvelles machines marines sont donc à condenseurs par surface, à haute pression, à mouvement rapide, et elles détendent la vapeur jusqu'à douze fois son volume primitif, dans des cylindres munis de chemise à vapeur. Elles sont cependant moins pesantes et d'un prix de vente moindre que les anciennes; enfin, leur consommation de combustible, par cheval de 75 kilogrammètres, est descendue à 900 grammes au lieu de 1,800. Les avantages sont évidents. La consommation par cheval est donc réduite de moitié, et, d'autre part, en raison de leurs grandes dimensions, les navires peuvent porter par cheval, avec une même vitesse, près de quatre fois plus de tonnes en chargement utile. Il en résulte que la consommation du charbon, par tonne portée, est réduite à près d'un huitième.

Au mois de juin 1881, l'institution des ingénieurs-mécaniciens anglais a tenu sa réunion annuelle à Newcastle, où l'on célébrait le centenaire de la naissance de Georges Stephenson, et s'est occupée spécialement des progrès et des développements de la *machine marine*. Nous résumons, d'après la *Chronique industrielle*, les conclusions prises dans cette réunion :

« Il y a des progrès à noter depuis neuf ans, surtout en ce qui concerne les points suivants : 1° la puissance des machines, construites et à construire, accuse un grand avancement ; 2° des vitesses, jusqu'ici incon-

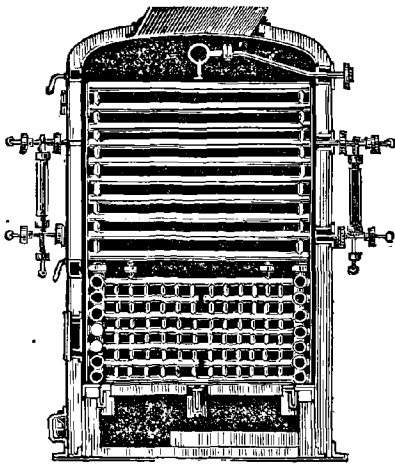


Fig. 329.

CHAUDIÈRE MARINE PERKINS.

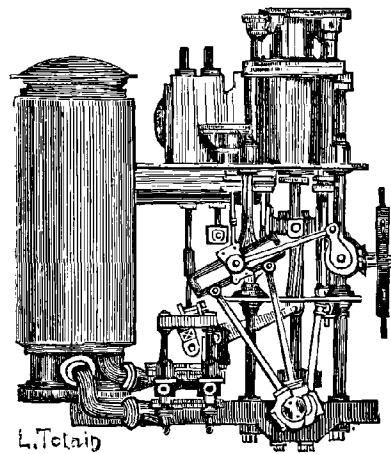


Fig. 330.

MACHINE DU YACHT *The Anthracite*.

nues, sont maintenant possibles dans les navires de diverses classes ; 3° la consommation de combustible est diminuée de 13,39 pour 100 en moyenne, en même temps que la qualité du combustible employé est inférieure, ce qui représente 20 pour 100 d'économie en tout ; 4° la pression de la vapeur s'est beaucoup accrue et tend à s'accroître encore. Plusieurs vapeurs sont en construction pour des pressions de 8 atmosphères, tandis que la pression de 6 atmosphères est encore aujourd'hui la pression moyenne. Une augmentation de pression se traduit en efficacité, et il n'y a pas de raison pour qu'une moyenne de 10 atmosphères ne soit pas adoptée à l'avenir. De grandes vitesses paraissent désirables en vue d'une grande réduction du poids, ce qui demande un parfait équilibre de toutes les pièces en mouvement. L'emploi général de l'acier permet enfin à l'ingénieur de la marine d'alléger ces pièces et d'atteindre des vitesses qu'il n'aurait osé essayer il y a neuf ans.

» La réunion a surtout parlé des machines à vapeur Perkins, essayées

récemment dans le yacht à vapeur *The Anthracite*, de 70 tonnes, dont la traversée à travers l'océan Atlantique a excité un si grand intérêt. Nous en reproduisons les principales dispositions (*fig.* 329 et 330).

» La chaudière se compose de rangées horizontales de tubes en fer de 0<sup>m</sup>,75 de diamètre intérieur, mis en communication par des tubulures verticales. Le tout est renfermé dans une chemise double en tôle, l'espace intermédiaire étant rempli de noir végétal. La chaudière est alimentée avec de l'eau distillée, fournie par un alambic muni d'un serpentín dont le tuyau à vapeur est en communication avec le condenseur. La surface de grille est de 1<sup>m</sup>,04.

» Les machines sont du type renversé et à action directe. Le diamètre du cylindre à haute pression est de 0<sup>m</sup>,20; celui du cylindre intermédiaire est de 0<sup>m</sup>,40, et celui du cylindre à basse pression est de 0<sup>m</sup>,58. La course est de 0<sup>m</sup>,38, et le diamètre des tiges de piston, dont la section est à déduire, est de 0<sup>m</sup>,07. Le cylindre à haute pression reçoit la vapeur de la chaudière pendant la moitié de la course de haut en bas.

» Pendant la demi-course suivante, de bas en haut, la vapeur qui s'échappe du cylindre à haute pression entre dans l'intermédiaire, et puis passe dans une chambre, d'où elle alimente le cylindre à basse pression, qui est en arrière de celui à haute pression. Par cette disposition, la vapeur se détend de trente-deux fois son volume. La distribution de la vapeur se fait dans le petit cylindre par trois soupapes équilibrées, actionnées par des excentriques. La distribution au cylindre à basse pression s'effectue par un tiroir ordinaire, qui a un tuilet de détente au dos, lequel reçoit son mouvement par la continuation du condenseur. Le condenseur à surface se compose d'un certain nombre de tubes en fer galvanisé, bouchés à l'extrémité supérieure; leur faisceau s'élève verticalement sur une plaque tubulaire, et chacun d'eux a, à l'intérieur, un tube plus petit, ouvert aux deux extrémités et mis en communication avec une seconde plaque tubulaire inférieure à la première. L'eau de mer passe par les petits tubes et par l'espace annulaire qui les entoure jusqu'à l'entrée de la pompe de circulation. La vapeur d'exhaure entre dans le corps du condenseur et vient en contact avec l'extérieur des tubes, qui sont bouchés à leur extrémité supérieure. L'eau de condensation est extraite par la pompe à air et refoulée dans le réservoir à eau chaude qui entoure la partie supérieure du condenseur. L'espace situé entre le piston du cylindre à haute pression et celui du cylindre intermédiaire est en communication avec la chambre qui fournit la vapeur au cylindre à basse pression. La pompe à circulation reçoit son mouvement de la tige de piston du cylindre à basse pression par le moyen d'un balancier, et la pompe à air, de celui du cylindre inter-

médiaire par le moyen d'un balancier semblable. Les pompes d'alimentation et de cale reçoivent leur mouvement des crossettes des pompes à air et de circulation. Le changement de marche s'effectue par une coulisse et un coulisseau, comme le montre la figure 330. Les cylindres, ainsi que leurs couvercles, sont chauffés par de la vapeur qui circule dans les tubes de fer renfermés dans le métal pendant la coulée, et toute perte de chaleur est empêchée par une couverture suffisante.

» Dans une expérience très soignée, conduite par sir F. Bramwell, le feu fut allumé à 6 h. 20 du matin et les machines mises en mouvement à 7 h. 18. Le robinet de vapeur fut ouvert au degré voulu pour 130 révolutions par minute, et la coulisse mise en pleine marche *avant*. Après avoir brûlé 0,75 tonne de bon charbon, on a laissé s'arrêter les machines d'elles-mêmes, ce qui s'est fait à 7 h. 23 du soir, ou en 12 h. 03 depuis leur mise en marche. Les machines ont développé une force de 80,55 chevaux-vapeur jusqu'à ce qu'on ait cessé de chauffer. La force totale développée était égale à celle de 223,38 chevaux-vapeur exercée pendant une heure, ce qui donne une consommation de combustible de 0 k. 09 environ par cheval-vapeur et par heure, y compris le temps occupé à monter en pression. La perte d'eau, pendant les douze heures, n'aurait pas atteint 107 litres. »

Ce sont là évidemment de grands progrès; seulement ils ne sauraient être attribués équitablement à aucun nom en particulier; c'est une œuvre collective qui a été accomplie, à l'étranger comme en France, par de nombreux collaborateurs, soit dans la marine de l'État, soit dans les grandes compagnies de navigation commerciale.

**HISTORIQUE DES LOCOMOTIVES.** — Ce fut Robinson qui, en 1759, eut le premier l'idée des voitures à vapeur; mais, croyant qu'elles ne pourraient jamais vaincre les inégalités du sol, il abandonna son projet. Watt avait donné, en 1784, la description d'une machine propre à faire mouvoir un chariot; mais il ne donna pas suite à cette idée. Ce fut Cugnot (1) qui fit le premier essai sérieux. Quelques études sur les fortifications et les

(1) CUGNOT (Nicolas-Joseph), ingénieur français (1725-1804), né à Void, en Lorraine, servit d'abord en Allemagne, et y inventa un fusil que le maréchal de Saxe avait adopté pour les uhlans. Il vint s'établir en 1763 à Paris, où il put faire son expérience de voiture à vapeur. Le duc de Choiseul ayant été exilé, on cessa de s'occuper de l'invention de Cugnot, qui reçut cependant du gouvernement une pension de 600 livres. Pendant la Révolution, le ministre Roland essaya vainement de faire faire une nouvelle expérience; en 1798, l'Institut nomma une commission pour examiner la voiture à vapeur; mais le rapport des commissaires n'eut pas de suites, et, en 1799, la machine de Cugnot fut transportée au Conservatoire des Arts-et-Métiers, où elle est encore. La misère avait forcé l'inventeur de se retirer à Bruxelles, où il serait mort de dénuement sans les secours d'une dame de cette ville. Revenu en France sous le Consulat, il obtint une pension de 1,000 francs jusqu'à sa mort.

armes défensives le conduisirent à construire des *fardiers à vapeur* pour le transport de l'artillerie. Il se rendit à Paris, en 1763, et en 1769 il avait imaginé une voiture à vapeur qui possédait une vitesse de 1,800 toises (3 kilom. 5) à l'heure. Encouragé par le maréchal de Saxe, il exécuta un modèle qui fut publiquement essayé devant le duc de Choiseul, ministre de la guerre, et un grand nombre d'officiers. Cette machine (*fig.* page 689), mue par une machine à basse pression, était portée sur trois roues dont la première, placée sur le devant, était la roue motrice. Elle pouvait traîner, outre son propre poids, une charge de 8 à 10 milliers, et sa marche était assez régulière. Seulement, on éprouvait de grandes difficultés à la diriger, ce qui fit qu'elle alla donner contre un mur qu'elle renversa.

Si cette expérience avorta, cela provient du reste uniquement de ce que l'on ne connaissait encore que des machines à basse pression. Aussi, dès que Leupold eut décrit la première *machine à haute pression*, un constructeur américain, Evans, reconnut l'avantage de cette machine pour la marche des locomotives, et il obtint, le 21 mai 1797, un privilège pour la construction des *chariots à vapeur*. Ce privilège ne lui fut accordé que sur cette considération : « *que cela ne nuirait à personne.* » En 1800, il avait construit un chariot dont la marche paraissait satisfaisante ; mais il ne trouva aucun capitaliste pour exploiter son invention, et, un incendie ayant détruit ses ateliers, il en mourut de chagrin le 15 mars 1819.

En même temps, en Angleterre, deux constructeurs, Trevithick (Richard) et Vivian (Andrew), construisaient des voitures à vapeur à peu près semblables à nos diligences (*fig.* à la page 697). En 1802, ils obtenaient un privilège pour l'exploitation des *diligences à vapeur*, qui, portant une machine à haute pression, réussirent passablement. Le seul obstacle qui s'opposait à leur extension fut le frottement considérable qui avait lieu entre les roues de la voiture et le sol des routes ordinaires. Comme pis-aller, ils se décidèrent à n'employer leurs voitures que sur des *chemins à rails*. Les *rails* ont été connus de tout temps. Les Égyptiens les employaient pour le transport des matériaux destinés à leurs immenses constructions. En Europe, on les utilisait aux abords des mines, pour faciliter le transport des machines. Trevithick et Vivian, en lançant leurs locomotives sur des rails de fer, jugèrent que tout mouvement progressif de leurs voitures était impossible.

Ils pensaient que deux surfaces polies, comme la roue et le rail, ne peuvent avoir aucune adhérence et ils concluaient que la roue tournerait sans avancer. Le meilleur moyen de décider la question était de faire des expériences ; mais, — chose curieuse ! — on adopta le fait sans le vérifier et on s'occupa activement à parer un inconvénient qui n'existait pas.



Vivian proposait de dépolir les surfaces en contact, afin que leurs aspérités augmentassent l'adhérence. M. Blenkinsop transforma, en 1811, les rails en crémaillères et les roues des wagons en roues dentées, créant



Premières diligences à vapeur, en Angleterre  
(d'après une gravure du temps) [page 696].

ainsi d'énormes frottements. En 1812, MM. Williams et Edward Chapman remplacèrent les locomotives par des machines fixes, qui faisaient mouvoir les wagons au moyen d'un système de poulies et de câbles. M. Bruntow, en 1813, imagina de faire agir la vapeur sur des béquilles

en bois qui, appuyant tantôt contre le sol, tantôt se soulevant, agissaient à peu près comme la jambe des chevaux. Il y avait de quoi briser en mille pièces, par suite des secousses, les plus robustes machines. Dès le premier essai, la chaudière éclata, un grand nombre de personnes furent tuées ou blessées et l'on abandonna cette malencontreuse conception.

Disons cependant que le procédé de M. Bruntow a été repris de nos jours, perfectionné par M. Fortin Herrmann, le petit-fils de l'éminent constructeur d'instruments de précision, et qu'il semble destiné à résoudre les difficultés que présentent à gravir les chemins à grande pente.

Sans adhérence, en effet, il n'y a pas de traction possible. Or, s'il faut traîner un poids plus lourd, il faut naturellement augmenter l'adhérence; autrement la machine patinerait; mais, pour augmenter l'adhérence, il faut augmenter le poids. On explique ainsi pourquoi, sur nos chemins de fer à grand trafic, on a été conduit à construire des locomotives du poids énorme de 60 tonnes. Le poids augmentant, la force motrice doit augmenter en conséquence; la machine absorbe ainsi la force qui devrait être employée à traîner un poids utile. L'adhérence coûte finalement très cher. Le poids mort à remorquer s'accroît lorsque le poids utile à traîner augmente lui-même. De là une limite infranchissable.

Ce n'est pas tout. Quand le chemin n'est plus de niveau, il faut bien que la locomotive se tienne elle-même sur la pente, et, si elle est lourde et la rampe forte, le poids remorqué devient presque nul. C'est élémentaire; mais encore est-il qu'il faut y songer. Si la rampe est très forte, la locomotive seule peut monter, et, à la limite, elle redescend elle-même impuissante et emportée par la gravité. Dès lors, comment utiliser une locomotive sur une rampe très inclinée?

Sur palier, une locomotive ordinaire, à la vitesse de 20 kilomètres à l'heure, peut traîner 570 tonnes. Avec une pente de :

0,005	270 tonnes.	0,025	70 tonnes.	0,045	30 tonnes.
0,010	170 —	0,030	60 —	0,050	20 —
0,015	120 —	0,035	50 —		
0,020	90 —	0,040	40 —		

La charge traînée devient donc vite insignifiante, comme on le voit par les chiffres précédents

Aussi est-il de règle, en matière de construction, de ne pas dépasser des pentes très faibles : 25 à 31 millimètres. Quand il s'agit de chemin de fer en pays mouvementé, on est obligé de prendre des pentes plus fortes; mais la vitesse de marche est réduite et le poids remorqué est diminué. En montagne, on a recours à des artifices particuliers : système Leguier

à rail central avec rouleaux de friction, système à crémaillère comme au Rigi, système locomoteur à brins du type Agudio, etc. Pour que la locomotive ordinaire fût applicable aux grandes pentes, il faudrait pouvoir diminuer le poids des machines tout en augmentant l'adhérence et la puissance motrice, problème qui a paru jusqu'alors insoluble.

Quand une difficulté ne peut être vaincue en face, on essaye de la tourner; c'est ce qu'a fait M. Fortin Herrmann, en construisant un type de locomotive dont les jambes s'appuient à volonté sur le rail. Le point d'appui est aussi énergique qu'on le désire, et il est inutile de faire la machine lourde; l'adhérence dépend du moteur, et nullement du poids. On la règle selon la pente à gravir. L'inventeur a réalisé une première machine qui a été essayée en 1874 sur le chemin de fer de l'Est. Les expériences ont montré qu'en appuyant sur les rails les patins des quatre jambes motrices, garnis de semelles en caoutchouc, avec une pression de 1 kilogramme par centimètre carré, on pouvait obtenir une adhérence égale aux  $\frac{75}{100}$  du poids de la machine. Il résulte de là que l'emploi des

patins permet de traîner un train quatre fois plus lourd que par les moyens actuels, et de circuler sur des pentes de 10 centimètres par mètre, absolument inabordables par nos machines actuelles. L'inconvénient, que seule l'expérience nous peut démontrer, est que l'usure des organes pourrait être considérable et la machine mise rapidement hors de service.

A la même époque que M. Bruntow, M. Blckett (1) chercha à résoudre la question par l'expérience. Il plaça une voiture à vapeur sur des rails en fer, voulant déterminer la quantité de force que le glissement de force faisait perdre. O surprise! la voiture avançait sur le rail avec une facilité merveilleuse; il se trouvait que l'adhérence des roues et des rails était plus que suffisante pour produire un mouvement progressif. Le poids de la machine, joint aux aspérités que le métal le mieux poli possède à sa surface, produisaient une sorte d'engrenage naturel qui satisfaisait à toutes les exigences, sans produire des frottements inutiles.

On avait travaillé pendant plusieurs années pour produire une adhérence qui existait par elle-même.

La facilité avec laquelle les voitures à vapeur se mouvaient sur les rails imprima une impulsion nouvelle au perfectionnement des locomotives. En 1814 sortait des ateliers de Stephenson (2) la première voiture

(1) BLACKETT (Williams), propriétaire du charbonnage de Wylam, où débuta Stephenson. Ce ne fut qu'après plusieurs accidents causés par la résistance des rails dentés qu'il eut l'idée de déterminer la quantité de force enlevée par le glissement.

(2) STEPHENSON (Georges), fils d'un pauvre mineur, né à Wylam, village près de Newcastle

qui eût fonctionné avec quelque avantage sur un chemin de fer ; mais la lourdeur et le peu de vitesse de cette machine (6 kilomètres à l'heure) s'opposaient à ce qu'elle reçût une grande extension.

Il nous semble inutile d'entrer dans le détail de ses études sur la locomotion à vapeur. Stephenson ne se faisait pas illusion, raconte un de ses biographes, sur les défauts de ses *machines voyageuses*, et il cherchait activement les moyens de les perfectionner, quoique, en 1822, elles fussent

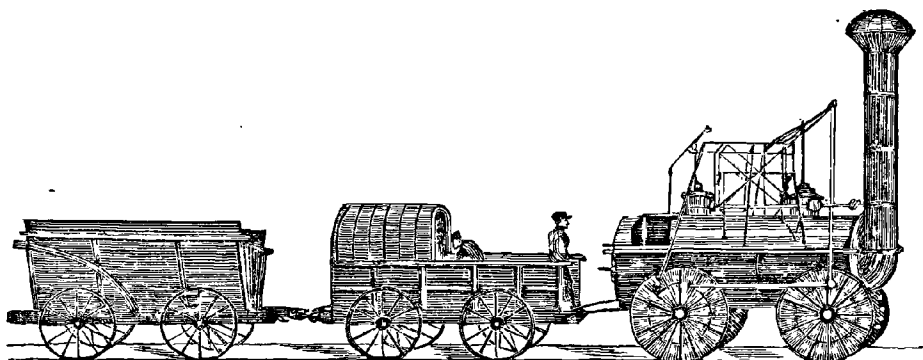


Fig. 331. — LA « PUFFING-BILLY. »

employées, concurremment avec des machines fixes, pour le transport des trains dans les houillères de Killingworth. En 1823, on conçut le projet d'établir une ligne de chemin de fer entre Stockton-sur-Tees et Darlington, centre d'un riche district houiller. Le directeur de cette entreprise, M. Pease, obtint que l'emploi des locomotives serait fait exclusivement, et il chargea Stephenson d'établir ce *railway*. Le premier rail en fut posé le 23 mars 1823 ; le chemin de fer fut ouvert le 27 septembre 1825, et, malgré les oppositions les plus vives, ce jour-là, le premier train de trente-

(Angleterre), le 9 juin 1781. Mis au travail de la mine dès l'âge de huit ans comme nettoyeur de charbon, il apprit à lire à dix-huit ans et, peu à peu, s'éleva jusqu'au poste de garde-frein de la mine de charbon de Callerton. Marié alors, père de famille, il occupait ses rares loisirs par des travaux de mécanique, réparait les horloges et les montres, et la misère le torturait. En 1810, une réparation qu'il fit par hasard à une machine de Newcomen, placée pour puiser l'eau d'une nouvelle mine où il travaillait, décida sa vocation. Encouragé par lord Ravensworth, un des administrateurs des mines de Newcastle, il imagina successivement une *machine à molettes* pour monter le charbon, une pompe, etc. ; puis s'occupa exclusivement de la locomotive. Il avait précédemment trouvé une *lampe de sûreté* pour les mineurs, comparable à celle de Davy, mais que celle-ci fit oublier. Ses travaux enfin furent appréciés, et, en 1822, il entra comme ingénieur d'une des premières compagnies de chemins de fer qui aient été tracés, aux appointements de 7,500 francs. Plus tard, il adopta les perfectionnements apportés par M. Seguin à ses locomotives, et créa ainsi les voies ferrées en Angleterre. Il est mort le 12 août 1848. Une statue lui a été élevée à Newcastle en 1862. Son fils Robert est devenu un ingénieur distingué auquel on doit, entre autres choses, le pont à haut niveau de Newcastle, qui sert en même temps au chemin de fer, au roulage et aux piétons, et que représente notre gravure (page 705)

huit wagons, chargés les uns de charbon, les autres de voyageurs, circula, traîné par la première véritable locomotive, la *Puffing-Billy* (fig. 331).

La France était en retard sur l'Angleterre dans la création des chemins de fer, et pourtant c'est de son sein que jaillit alors l'idée féconde qui a métamorphosé subitement les locomotives.

En 1826, on avait établi un chemin de fer de Saint-Étienne à Rive-de-Gier et on se servait pour moteur de machines fixes. En 1827, le gouvernement acheta en Angleterre deux locomotives de Stephenson, et l'une d'elles fut livrée à M. Seguin, ingénieur du chemin de fer de Saint-Étienne (1). M. Seguin s'aperçut bientôt que le principal inconvénient de la machine anglaise consistait dans la grandeur de la chaudière et dans le poids énorme d'eau qu'il fallait traîner pour obtenir une quantité suffisante de vapeur. Il résolut d'alléger les locomotives en se servant de chaudières plus petites, tout en augmentant la surface chauffée. Pour cela, il imagina de placer à l'intérieur des chaudières des tubes métalliques que la flamme et la fumée traversaient en se rendant du foyer à la cheminée : 45 tubes suffirent à M. Seguin pour voir l'avantage de son système. Plus tard, on éleva le nombre de ces tubes à 120.

La petitesse de la cheminée s'opposait à un tirage actif, et, par conséquent, au passage des gaz échauffés à travers les tubes de la machine. Il n'était pas possible d'augmenter la hauteur de la cheminée, soit pour éviter les effets désastreux d'un vent violent, soit à cause de la très grande hauteur qu'il eût fallu donner aux tunnels et aux ponts. M. Seguin para à cet inconvénient au moyen d'un ventilateur à force centrifuge, mis en mouvement par la machine elle-même, et, le 20 décembre 1829, il prit un brevet qui constatait ses modifications à la locomotive.

Ajoutons que l'idée qui a dirigé M. Seguin dans la création de sa *chaudière tubulaire* se trouve exprimée dans le brevet de Dallery, en 1803. Vers 1780, celui-ci avait construit une voiture à vapeur, portant une *machine à haute pression* et une *chaudière tubulaire*. Cette voiture marcha dans les rues d'Amiens, et, après cette expérience décisive, l'inventeur, ne pouvant exploiter industriellement son invention, utilisa la machine à vapeur de cette voiture pour battre l'étain de ses tuyaux d'orgues.

(1) SEGUIN (Marc), né à Annonay le 20 avril 1786, mort en 1875. Neveu des Montgolfier, il abandonna le commerce auquel le destinait son père, marchand de drap, pour s'occuper de sciences sous la direction de ses oncles. Il importa en France des machines nouvelles pour le cordage de la laine et son génie inventif les perfectionna. En 1820, il débuta dans la carrière par la construction des premiers ponts en fil de fer (page 51). En 1825, il fit les premières tentatives de navigation à vapeur sur le Rhône, et appliqua pour la première fois les chaudières tubulaires de Dallery oubliées, qu'il réinventa, et dont il fit usage un des premiers. On lui doit encore le remplacement des rails placés sur le sol, par des traverses en bois qui rendent la voie plus douce, et diminuent les déraillements. M. Seguin est mort pauvre et seulement chevalier de la Légion d'honneur.

Tout Amiens visita, dans les ateliers de Dallery, cette machine encore inconnue au vulgaire.

La chaudière tubulaire de Dallery, adaptée à son bateau, ainsi qu'on peut le voir dans la *fig.* 328, est différente, il est vrai, de celle de M. Seguin ; mais l'on peut dire que Dallery a créé les *chaudières tubulaires*, et que M. Seguin a créé *une chaudière tubulaire particulière*, en usage aujourd'hui dans les locomotives (1).

Cette création fit une révolution dans les chemins de fer. Stephenson fut un des premiers à reconnaître les immenses avantages résultant de l'emploi des chaudières tubulaires. Il les adopta dès leur origine.

Il nous semble bon de raconter à quelle occasion.

L'état déplorable des routes entre Manchester et Liverpool avait suggéré l'idée de construire un canal qui monopolisa longtemps le transport des marchandises ; mais, durant les grands froids, les bateaux étaient arrêtés par la glace. On songea à établir une voie ferrée entre les deux villes. On envoya des ingénieurs à Darlington, afin d'examiner le système de Stephenson, et, grâce à leur rapport favorable, celui-ci fut chargé des premières études de la ligne projetée.

La mission n'était pas sans péril. Les paysans furent persuadés que l'air empoisonné des locomotives tuerait leurs volailles, que le bruit affolerait leurs bestiaux, que le feu des foyers incendierait leurs maisons et leurs récoltes. Les employés du canal, craignant de se voir sans travail, se montraient les plus hostiles. Le duc de Bridgewater, propriétaire de ce canal, avait donné l'ordre à ses gens d'empêcher par la force toute opération cadastrale ; l'accès des terres de lord Derby fut interdit aux ingénieurs sous les peines les plus sévères. Le Parlement, c'est-à-dire la réunion de la haute aristocratie britannique, rejeta le bill relatif à ce chemin de fer, en s'appuyant sur des raisons aussi sérieuses que celles-ci :

— L'action des locomotives, disait un lord à Stephenson, dépend des temps : un coup de vent assez fort rendrait impossible le voyage d'une machine à vapeur, soit en éteignant le feu, soit au contraire en l'attisant de manière à produire une explosion.

— Admettons, ajoutait un autre, qu'une de vos machines circule sur la voie avec une vitesse de trois à quatre lieues à l'heure, et que, par

(1) Il est évident que Dallery est bien l'inventeur de l'hélice et de la chaudière tubulaire et que, comme tel, il mérite d'être placé à côté de Papin et de Watt, dans l'histoire de la machine à vapeur. L'Académie des sciences a reconnu la validité des titres de Ch. Dallery, sur le rapport favorable qui en avait été fait par MM. Arago, Poncelet et Martin. Ajoutons que l'Académie reconnut encore qu'on doit à Dallery l'invention des mâts rentrant en eux-mêmes, c'est-à-dire s'allongeant ou se raccourcissant à volonté, et un procédé pour activer le tirage de la cheminée des machines.

hasard, une vache s'y rencontre, ne serait-ce pas là une circonstance très fâcheuse ?

— Certes, pour la vache, répondit Stephenson, qui ne put s'empêcher de sourire.

Malgré ces oppositions, Stephenson persévéra dans son projet, et bientôt un ruban de fer s'étendait entre Liverpool et Manchester ; mais aucun des administrateurs n'était fixé sur le moteur à employer. Sur l'avis de Stephenson, un concours fut ouvert. Aidé de son fils, Stephenson avait résolu de prendre part à ce concours, et il s'ingéniait à trouver le moyen de corriger le défaut principal de ses machines, qui était une production insuffisante de vapeur, et, conséquemment, de force et de vitesse. Il s'épuisait en vaines tentatives, quand le perfectionnement capital, rêvé par lui, fut trouvé en France par Marc Seguin. C'est alors qu'il construisit sa machine *Rocket*

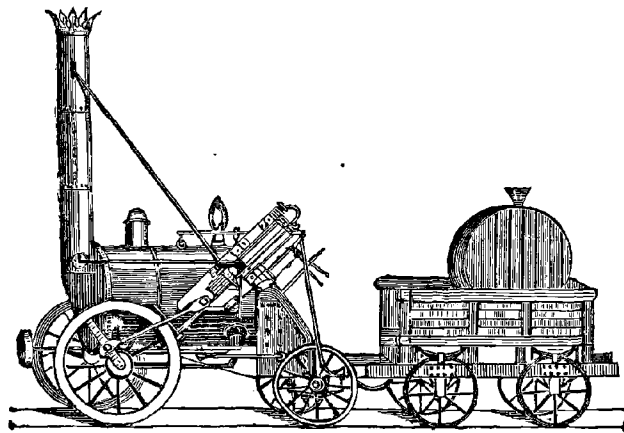


Fig. 332. — LA ROCKET.

(*la Fusée*), avec laquelle il gagna le prix au concours de Liverpool, et avec laquelle il commença, le 14 juin 1830, le service public de la ligne de Manchester à Liverpool (*fig. 332*).

Stephenson chercha ensuite à supprimer le ventilateur à force centrifuge, qui était sujet à de graves dérangements. Il y réussit par un moyen fort simple.

Dans les locomotives, le condenseur de Watt ayant procuré plus d'embarras que d'utilité, on l'avait supprimé, et la vapeur, après avoir servi, était tout simplement rejetée dans l'atmosphère. Stephenson eut l'idée de diriger cette vapeur dans la cheminée de la machine, afin que, par la condensation rapide du fluide, un vide se formât, et par conséquent un *appel d'air* qui provoquât un tirage considérable. L'expérience confirma pleinement ses vues théoriques, et la locomotive moderne, presque exactement semblable à celle que nous possédons aujourd'hui, se trouva créée, grâce à cet ingénieux système de tirage artificiel et aux chaudières tubulaires de Seguin et de Dallery.

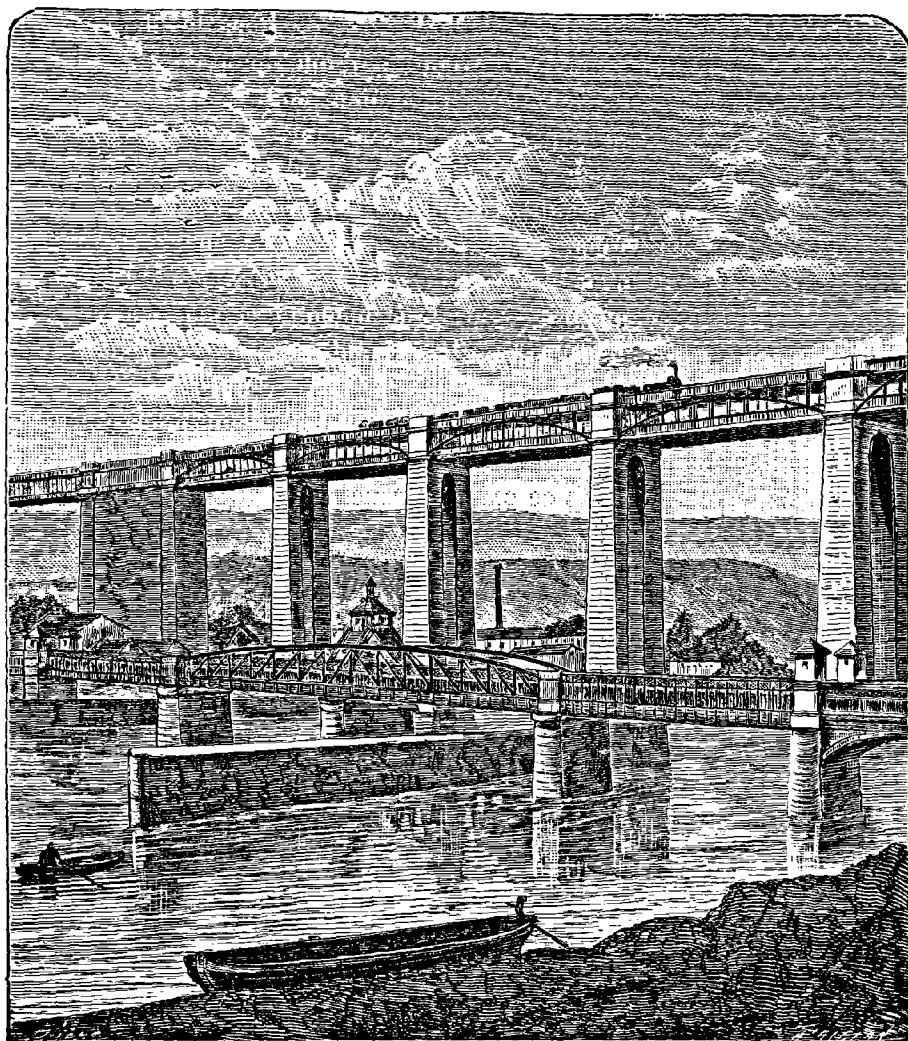
**LOCOMOTIVE.** — Évidemment aucun progrès ne devait être accepté avec faveur par tous ceux-là qui, en 1815, en 1830, — comme aujourd'hui d'ailleurs, — n'ont rien appris et rien oublié, et voudraient revenir au bon vieux temps, au coche, aux corvées, à l'exemption d'impôts pour les gens nobles ; évidemment, les chemins de fer furent accueillis par eux avec rage, car ce genre de locomotion permettait à un simple ouvrier de voyager comme un grand seigneur. Nous avons vu leurs luttes contre Stephenson en Angleterre ; en France, tout, jusqu'à leur poésie — une poésie de noble!!! — les attaqua. L'un d'eux regrette, en des vers d'un goût douteux, l'aristocratique chaise de poste, où ne pouvaient tenir que deux ou trois personnes *bien nées* :

« La poste va périr !... Ami, je le confesse,  
 Tel est le vrai succès de ma juste tristesse.  
 La poste, hélas ! combien je lui dois d'heureux jours !  
 Tu le sais, ce Paris, le plus beau des séjours,  
 Après un long hiver nous fatigue et nous pèse :  
 Il nous faut, sans tarder, sortir de ce malaise ;  
 Plus de club, de souper, de jeu, de réveillon.....  
 — Le vois-tu s'avancer, ce colosse de fer,  
 Avec ses ailes d'aigle et ses poumons d'enfer ?  
 On dirait qu'il a pris au dragon d'Hespéride  
 Ses sifflements aigus et son souffle fétide.  
 Ah ! je me souviendrai de ce jour où le sort  
 Me jeta follement sur le chemin du Nord !...  
 Quel tumulte, grand Dieu !... Dans la foule insensée  
 Sur le seuil des bureaux bruyamment entassée,  
 Ce n'est pas sans effort que ma main au guichet  
 Peut glisser mon argent et saisir un billet.  
 Au son de cloche on part, et déjà sous la terre  
 S'avance sourdement le convoi solitaire :  
 Une lampe funèbre, aux sinistres lueurs,  
 Projette son reflet sur tous les voyageurs,  
 Qui, la face verdâtre et la prunelle ardente,  
 Rappellent ces damnés que fait hurler le Dante...  
 Le jour a reparu quand le tender, fumant  
 Comme un coursier fougueux, indomptable, écumant,  
 S'élança !... Adieu, villas, châteaux, villes, villages !...  
 J'entrevois enfin Lille, opulente cité,  
 Avec tous les comforts de l'hospitalité ;  
 O vaine illusion ! ô visite tardive !  
 Dans ses brillants hôtels, tout est plein quand j'arrive ;  
 Je grimpe en un faubourg fangeux où le destin,  
 Avec douze rouliers, me loge au *Pot-d'Étain* ! »

. . . . .



Nous décrivons, d'après M. N.-J. Didiez, le type primitif, type général, ordinaire d'une *locomotive* (*fig.* à la page 681). Nous la représentons dans son ensemble par les figures I, II, III.



Pont de Newcastle, construit par Robert Stephenson (page 700, biographie de G. Stephenson).

La figure I est une vue latérale; la figure II, une vue par derrière; la figure III, une vue par devant.

Les deux roues de l'avant-train vues en A, A', A'' (*fig.* I) sont montées sur un essieu droit, en fer, sur lequel elles tournent librement, à la

manière des roues ordinaires. Les deux autres roues, vues en B, B', B'', sont fixées à leur essieu, de telle sorte que l'essieu et les roues tournent à la fois. Cet essieu n'est point droit, il a deux coudures, ou deux manivelles coudées, disposées perpendiculairement l'une à l'autre, et mises en mouvement par deux tiges ou bielles, dont les extrémités sont articulées, d'une part aux coudures, et de l'autre aux tiges des deux pistons moteurs. Dans le mouvement de rotation d'une manivelle, lorsque le rayon se trouve dans la direction de la force motrice, celle-ci n'a pas plus de tendance à la mouvoir dans un sens que dans l'autre; par la perpendicularité des rayons, il arrive ici que l'une des manivelles a toujours son plein effet quand l'autre cesse d'agir. Cette disposition des deux coudures fait que la vapeur agit sans intermittence pour faire tourner l'essieu et les roues, et communiquer ainsi le mouvement à toute la machine. Le mouvement progressif de la machine a lieu par suite de l'adhérence des roues sur les rails; il en résulte que les roues avancent au lieu de glisser.

Une autre disposition en usage consiste à fixer aussi les roues de l'avant-train sur leur essieu droit, de sorte que l'essieu et les roues tournent en même temps. Dans ce cas, les roues ont toutes le même diamètre; les essieux portent à leurs extrémités des rayons de manivelles, reliés entre eux, sur chaque côté de la machine, par une bielle qui communique le mouvement de l'un à l'autre. L'essieu de derrière reçoit son mouvement de l'action de deux pistons moteurs, et communique lui-même le mouvement à l'autre essieu. On obtient ainsi une plus grande force d'adhérence sur les rails.

Pour maintenir les roues sur les rails et empêcher toute déviation latérale, chaque roue porte un rebord intérieur assez saillant *a* (*fig. II*). De plus, pour éviter le frottement de ce rebord sur le côté intérieur du rail, la bande de roue n'est pas tout à fait cylindrique; elle est légèrement conique, comme l'indique (*fig. II*) le profil *bb*; son diamètre est un peu plus grand du côté du rebord que du côté extérieur. D'où il résulte que si la machine est poussée à gauche, par exemple, la roue de gauche, marchant alors sur la partie qui correspond à un plus grand diamètre, tend à avancer un peu plus vite que la droite, et ramène par conséquent la machine dans la place moyenne qu'elle doit occuper sur les rails.

Toutes les pièces de la machine, à l'exception des roues et des essieux, sont portées par un châssis ou *cadre de support*, rectangulaire, qui s'appuie lui-même sur l'extrémité des essieux. Ce cadre se compose de deux pièces jumelles JJ' (*fig. I*), réunies à l'arrière et à l'avant de la machine par deux traverses DD', EE' (*fig. II et III*); il est en bois, solide-

ment assemblé, et revêtu de lames de fer boulonnées. Il est porté par les essieux, au moyen de quatre fourchettes vues en *cccc* (*fig. I*). Des montants *dddd*, fixés aux jumelles, portent des ressorts *ee*, auxquels sont fixées des tiges *ff*, qui, après avoir traversé les jumelles, vont s'engager dans des coussinets en cuivre, lesquels reposent immédiatement sur les extrémités des essieux, en les embrassant par moitié, de sorte que l'essieu, en tournant, frotte sur les coussinets. L'effet des ressorts est d'amortir les secousses de la machine. Les coussinets sont à coulisses dans les fourchettes. Des boulons et des triangles de consolidation *ggg* servent à lier la charge par-dessous les essieux, pour qu'elle ne puisse être soulevée trop haut et jetée de côté. Les deux jumelles latérales portent à leurs extrémités des tampons ou coussins, garnis en crin et recouverts de cuir, dont le but est d'amortir les chocs que la machine peut donner ou recevoir.

La *chaudière* est vue intérieurement, en coupe longitudinale en CDEFGHIKLMN (*fig. IV*) ; extérieurement et latéralement en CDHI (*fig. I*) ; en CDED'C' et IHH'I' dans les représentations de l'arrière et de l'avant (*fig. II* et *III*). Elle est fixée à chacun des grands côtés du cadre par trois fortes pattes ou attaches P, P', P'' (*fig. I, II, III*), boulonnées d'une part à la chaudière, et de l'autre au cadre de support. La chaudière, dans son ensemble, présente trois compartiments distincts, formés par des feuilles de forte tôle, solidement rivées à toutes les jointures.

Le compartiment de gauche, ou d'arrière, CDEFN (*fig. I*) contient le *foyer* ou *boîte à feu*, une partie de l'eau, une partie de la vapeur, et la prise de la vapeur dans le dôme E. Le compartiment du milieu, ou la chaudière proprement dite FGLM, contient la plus grande partie de l'eau, dont le niveau est *mm'* (*fig. IV*) ; la vapeur formée et non employée ; le tube à vapeur OO'O'', qui conduit la vapeur de la chaudière aux cylindres ; les tubes de chaleur *nn'*, fixés aux parois *hh''h'''* et GL, et plongés dans la masse liquide. Cette partie de la chaudière a une forme cylindrique circulaire, de 1 mètre de diamètre sur environ 2 mètres de longueur. Elle est revêtue de fortes douves en bois, assemblées et serrées par des cercles de fer. Le compartiment de droite, ou d'avant GHIK contient les deux cylindres, dans lesquels se meuvent les pistons moteurs, dont l'un est vu en coupe en *oo'o''o'''* ; les deux boîtes de distribution de la vapeur, dont l'une est vue en coupe en *pp'p''* avec la soupape à tiroir *qq* ; deux tubes *rr'* en communication avec le tube à vapeur OO'O'' et conduisant la vapeur dans les boîtes de distribution ; le tube *tt'*, par lequel la vapeur, après avoir agi sur les pistons, s'échappe en déterminant un grand tirage dans le foyer ; la boîte à fumée LGIIP, et la cheminée QQ' dans laquelle aboutit le tube *tt'*.

La partie inférieure du foyer  $hh'h''h'''$  est en communication avec l'air extérieur, au moyen de la grille  $ii'$  qui laisse passer la quantité d'air nécessaire à l'entretien de la combustion. Cette grille est formée de barreaux de fer séparés, disposés les uns à côté des autres, et s'appuyant par leurs extrémités sur deux supports fixés aux parois du foyer; ils sont arrondis à un bout et recourbés à angle droit, ce qui permet de les écarter facilement par l'autre bout, pour faire tomber les scories, et de les ramener ensuite à leurs positions respectives. De plus, par cette disposition, on peut, au besoin, à l'aide d'un crochet, renverser tous les barreaux et, par conséquent, faire cesser l'action du feu, en le laissant tomber sur la route avec les barreaux qui le supportaient.

Le foyer laisse, entre les parois latérales et celles du compartiment qui le contient, un espace  $h$ , qui est en libre communication avec le reste de la chaudière, et, par conséquent, rempli d'eau. De nombreuses traverses maintiennent la distance des parois, et donnent de la solidité à cette partie de la chaudière, qui, n'étant point arrondie, offre moins de résistance que les parties cylindriques. Les deux parois  $hh'$  et CD sont percées de deux ouvertures raccordées au moyen d'une espèce de manchon cylindrique  $l$ , formant l'ouverture de chargement du foyer. Cette ouverture se ferme extérieurement par une porte, qu'on voit en L (*fig. II*). C'est par cette porte que le chauffeur jette le charbon sur la grille du foyer. La porte L étant fermée, il s'agit de donner issue à la flamme et aux autres produits de la combustion opérée dans le foyer. De nombreux tubes  $nn'$ , qu'on nomme tubes de chaleur, établissent la communication entre le foyer, la boîte à fumée et la cheminée. Ces tubes sont recouverts par l'eau, et, présentant à celle-ci une grande surface de chauffe, ils contribuent puissamment à l'augmentation de sa température. Ainsi l'eau est chauffée par les parois du foyer et par celles des tubes de chaleur. La *fig. V*, représente en coupe les parois du foyer et du compartiment qui les renferme, les traverses qui les unissent, et les barreaux qui composent la grille; elle indique aussi la disposition des tubes de chaleur et la forme cylindrique circulaire de la chaudière proprement dite.

Le tube à vapeur est placé dans la partie supérieure de la chaudière, celle qu'occupe la vapeur. Il est ouvert à son extrémité O (*fig. IV*), et conduit la vapeur dans les cylindres. La prise de vapeur se fait en O, dans la partie supérieure du dôme E, afin que les secousses de la machine ne puissent jamais projeter l'eau, de manière à la faire pénétrer dans l'ouverture du tube conducteur de la vapeur. Dans l'intérieur du tube, en O', se trouve un robinet régulateur, à l'aide duquel on peut, à volonté, ouvrir ou fermer le passage à la vapeur. La clef de ce robinet se voit en  $u$ , au

dehors de la machine, à la portée du conducteur qui peut, par conséquent, en la tournant plus ou moins, régler à volonté la quantité de vapeur qui arrive dans le tube  $OO'O''$ , et, de là, dans les *boîtes de distribution*.

La vapeur étant formée dans la chaudière, le robinet régulateur placé en  $O'$  étant ouvert, cette vapeur afflue par les tubes  $OO'O''$  et  $rr'$  dans les *boîtes de distribution*  $pp'p''$ , et de là peut agir alternativement sur les deux bases de chaque piston  $P$ , au moyen des soupapes à tiroir, qui ouvrent et ferment alternativement les orifices tels que  $o$  et  $o'$ , par lesquels la communication s'établit entre la boîte de distribution et les extrémités intérieures des cylindres. Le tiroir  $qq'$  est animé d'un mouvement rectiligne alternatif, communiqué à sa tige  $v$  par le mouvement de la machine. Le mouvement alternatif de la tige  $v$  s'opère au moyen de l'excentrique représenté par la *fig. VI*. Le cercle  $C$  indique la position de l'essieu coudé; le cercle  $abc$  représente l'excentrique, fixé à l'essieu  $C$ , et tournant avec lui. Le centre du cercle  $abc$  n'étant pas sur l'axe de rotation de l'essieu, les distances de cet axe aux divers points de la circonférence  $abc$  sont inégales, et le point  $a$  est le plus éloigné. L'excentrique est entouré d'un anneau métallique dans lequel il tourne à frottement doux. La rotation de l'excentrique fait décrire au point  $a$  la circonférence  $aa'a''a'''$ , et imprime à cet anneau un mouvement alternatif, qui se communique à la tige  $v$  du tiroir, au moyen de la tige  $TT$  et du levier  $xyz$ .

Dans la position de l'excentrique représentée par la figure VI, l'extrémité  $a$  du plus grand rayon  $Ga$  se trouvant au haut de la circonférence  $aa'a''a'''$ , le tiroir ferme à la fois les deux orifices  $o$  et  $o'$ ; le piston est alors parvenu à la limite de sa course vers la droite, et le rayon de la manivelle coudée, mue par le piston, se trouve dans la direction  $Ca'$ , perpendiculaire à  $Ca$ . Lorsque le point  $a$  de l'excentrique parvient en  $a'$ , l'orifice  $o'$  est en communication avec la boîte de distribution, l'orifice  $o$  est en communication avec le dessous  $s$  du tiroir, et avec le canal de sortie  $s'$ , par lequel la vapeur qui se trouve à la gauche du piston se rend dans la cheminée. La vapeur agit alors à la droite du piston, qui, dans cet instant, se trouve au milieu de sa course de droite à gauche. A l'arrivée du point  $a$  en  $a''$ , les orifices  $o$  et  $o'$  sont de nouveau fermés à la fois, le piston est parvenu à la limite de sa course vers la gauche, et le rayon de la manivelle mue par le piston se trouve dans la direction  $Ca'''$ . Le point  $a$  étant parvenu en  $a'''$ , l'orifice  $o$  est en communication avec la boîte de distribution, et l'orifice  $o'$  l'est avec le canal de sortie  $s'$ ; la vapeur agit à la gauche du piston, qui à son tour presse la vapeur qui se trouve à sa droite, et la refoule vers le canal  $s'$ . On voit donc qu'à chaque révolution de l'essieu coudé, le jeu de l'excentrique et du tiroir amène la vapeur alternative-

ment sur les deux bases du piston, ce qui produit deux courses en sens contraires; ces deux courses du piston agissent, en tirant et en poussant alternativement, sur le rayon R (*fig. IV*) de la manivelle coudée, au moyen de la bielle S, et font faire à l'essieu un tour complet. Le jeu du tiroir produit le mouvement du piston et de l'essieu, et la rotation de l'essieu et de l'excentrique produit le mouvement alternatif du *tiroir*.

Comme il y a deux pistons et deux manivelles coudées, il y a aussi deux excentriques. Nous avons vu que, pour que la vapeur agisse sans intermittence sur l'essieu coudé, il faut que les coudures soient dans des directions perpendiculaires entre elles, afin que les pistons soient, au même instant, l'un au milieu, et l'autre à la fin de sa course. Il s'ensuit que les grands rayons Ca (*fig. VI*) des excentriques, respectivement perpendiculaires aux rayons des coudures, sont aussi perpendiculaires entre eux. La tête de la tige de chacun des pistons glisse entre les guides horizontaux qu'on voit en GG' (*fig. I*), pour maintenir leur mouvement dans la direction de l'axe du cylindre.

Pour expliquer comment on produit le mouvement de la machine en arrière, considérons la position du piston (*fig. IV*). La vapeur agit à sa gauche, le fait tirer sur la bielle, et fait avancer la machine de gauche à droite. Supposons qu'on déplace le tiroir, qu'on dirige l'action de la vapeur sur la droite du piston, il est évident qu'alors le piston se mouvra de droite à gauche, agira sur la manivelle R, au moyen de la bielle S, et imprimera à la machine un mouvement rétrograde de droite à gauche. On voit par là que, pour changer le sens du mouvement de la machine, il faut changer le jeu des tiroirs, en donnant aux grands rayons des excentriques des positions diamétralement opposées à celles qu'ils avaient d'abord sur l'essieu qui les porte. Ce changement s'opère au moyen du mécanisme qui lie chaque excentrique à l'essieu. Quelquefois l'essieu porte quatre excentriques; deux servent à produire le mouvement dans un sens, et les deux autres servent au mouvement contraire. Afin que le conducteur de la machine puisse, au besoin, mouvoir lui-même les tiroirs, indépendamment de tout mouvement de l'essieu coudé, les tiges des excentriques ne sont pas invariablement attachées aux leviers qui font mouvoir les tiges des tiroirs; elles sont seulement unies par une encoche qu'on voit indiquée en *x* (*fig. VI*). Au moyen d'une tige *mn* (*fig. I*), mue par la manivelle *ml*, du levier *npq* et de la tringle *qr*, le machiniste peut soulever les tiges des excentriques et dégager l'encoche. Alors les tiroirs sont libres de se mouvoir indépendamment de l'essieu; et, au moyen de deux leviers, dont les poignées sont vues en TT, et qui communiquent par les tiges *tt'* avec celles des tiroirs, on peut donner à

ceux-ci, avec la main, le mouvement qui convient à l'effet qu'on veut obtenir. Il existe de nombreux moyens pour atteindre le même but. Celui que nous venons d'indiquer, quoique imparfait, à certains égards, est d'une si remarquable simplicité qu'il a été généralement adopté. Il est connu sous le nom de *coulisse de Stephenson*.

Lorsque la machine est en mouvement sur les rails, elle fait une consommation d'eau qui peut être de 20 à 30 litres par minute. Cette consommation doit être réparée à chaque instant, afin de maintenir l'eau au niveau qu'elle doit avoir dans la chaudière. Ce niveau est de la plus grande importance, et réclame une attention soutenue de la part du machiniste. En effet, si ce niveau venait à baisser au point de laisser des surfaces de chauffe exposées à nu à l'action du feu, ces surfaces seraient portées promptement à une très haute température (page 594) et il pourrait y avoir explosion, malgré le secours des soupapes de sûreté.

Le niveau de l'eau dans la chaudière peut être vérifié à volonté, au moyen de deux robinets  $r$  et  $r'$  (*fig. I*), disposés sur le côté de la chaudière et à la portée du conducteur. Le premier, qui est le plus élevé, doit toujours donner de la vapeur, sans quoi le niveau serait trop haut, et il faudrait ralentir l'introduction de l'eau; le second, qui est le plus bas, doit toujours donner de l'eau, sans quoi le niveau serait trop abaissé, et il faudrait activer l'introduction. Le conducteur peut, d'un instant à l'autre, tourner ces robinets pour s'assurer de l'état de la chaudière. De plus, un niveau d'eau NN' (*fig. II*) est fixé à l'arrière de la machine, sous les yeux du conducteur, auquel il donne une indication approximative de l'état de la chaudière. Ce niveau se compose d'un tube de verre  $tt'$  (*fig. VII*), encastré à ses deux extrémités dans deux viroles à robinets  $v$  et  $v'$ , communiquant avec l'intérieur de la chaudière. Lorsqu'on ouvre les robinets  $r$  et  $r'$ , l'eau afflue dans le tube par la partie inférieure, et la vapeur par la partie supérieure; la pression étant la même, l'eau prend le même niveau dans le tube et dans la chaudière. Le robinet  $s$  sert à vider l'appareil.

L'alimentation de la chaudière s'opère au moyen de deux pompes aspirantes et foulantes symétriquement placées au-dessous de la chaudière. L'une de ces pompes se voit en XX'YY'Z (*fig. I*). XX' est le tuyau d'aspiration, YY' le corps de pompe, et Z le tuyau par lequel l'eau est refoulée dans la chaudière. Le tuyau d'aspiration prend l'eau dans le fourgon d'approvisionnement qui suit la machine. Il porte un robinet X, mû par une clef, dont la poignée est à la portée du conducteur, qui peut, à volonté, activer ou ralentir le passage de l'eau. Le piston de cette pompe est un cylindre métallique, qui traverse une boîte à étoupes et n'exerce aucun frottement sur le corps de pompe. La tige de ce piston est liée à

celle du piston moteur, de sorte que l'une mène l'autre et règle son mouvement. Afin de pouvoir s'assurer que l'eau arrive effectivement dans le corps de la pompe, on y adapte un robinet de sûreté qui s'ouvre et se ferme au moyen d'une tige *yy*. On reconnaît que la pompe fonctionne bien lorsque, le robinet étant ouvert, l'eau refoulée par l'action du piston produit un jaillissement.

La machine porte deux *soupapes de sûreté* S et S' (*fig. I*), dont l'une est placée hors de la portée du conducteur, afin qu'il ne puisse la surcharger dans l'intention d'obtenir de la machine un plus grand effet. La *fig. VIII* représente l'un de ces appareils. La soupape proprement dite *s* ferme hermétiquement l'ouverture et peut se mouvoir de bas en haut par l'action de la vapeur, pour donner issue à celle-ci, lorsque la force de tension est plus forte que la pression exercée sur la soupape. Le levier *abc*, qui opère cette pression, est fixé en *a* par un axe autour duquel il peut tourner; il porte en *b* une tige verticale au moyen de laquelle il presse la soupape; son extrémité libre *c* est engagée sur une tige taraudée *t*, et se trouve maintenue par un écrou *ce'*. L'extrémité inférieure de la tige porte une traverse *rs*, et peut comprimer plus ou moins un ressort à boudin renfermé dans un tube, auquel on adapte une plaque à rainure divisée *pq*. La traverse *rs* se termine par un style ou index qui se meut dans la rainure et se voit au dehors. En tournant dans un sens ou dans l'autre l'écrou qui se meut sur la tige *t*, on bande ou l'on débände le ressort, et par là on augmente ou on diminue à volonté la pression que le ressort exerce à l'extrémité du levier, et par suite sur la soupape; le style indique le degré de cette pression. La pression sur la soupape est à la pression en *c* comme la distance *ac* est à la distance *ab*. Les soupapes de sûreté ont pour but de laisser échapper la vapeur dans l'atmosphère, aussitôt que sa force de tension atteint une certaine limite, au delà de laquelle il pourrait y avoir danger pour la chaudière. Elles peuvent servir aussi à mesurer la tension actuelle de la vapeur, en les desserrant convenablement, jusqu'au point où la vapeur de la chaudière peut mouvoir la soupape.

Un sifflet V, dit sifflet d'avertissement (*fig. I*), est fixé à la partie supérieure de la chaudière. La *fig. IX* le représente; il consiste en une sorte de gobelet renversé, contre les rebords duquel on peut, en ouvrant un robinet, faire arriver la vapeur qui, en s'y précipitant avec force, produit le sifflement.

Enfin quelques autres ouvertures existent à la chaudière, servant à différents usages. La chaudière porte à sa partie supérieure une ouverture U (*fig. I* et IV) qu'on appelle *trou d'homme*, par laquelle un homme peut pénétrer dans l'intérieur de la chaudière, lorsque quelque réparation



l'exige. Cette ouverture est fermée par un couvercle boulonné. Au-dessous de la chaudière, vers le milieu, se trouve une autre ouverture pareillement fermée par une plaque boulonnée, et par laquelle on peut faire



GEORGES STEPHENSON (page 699).

sortir tous les dépôts qui se font dans la chaudière. Deux robinets R et R' (*fig. II*) sont placés à la partie inférieure de la face d'arrière, et servent à vider la chaudière de tout ce qu'elle contient; ils ne peuvent être ouverts qu'avec une clef particulière. Les robinets *r* et *r* (*fig. III*) servent à vider

l'eau qui pénètre quelquefois dans les cylindres des pistons. Le *trou à boue* est une ouverture O (fig. I) pratiquée au double fond du foyer, fermée par un bouchon métallique taraudé, et sert à nettoyer le double fond en y injectant de l'eau avec une pompe.

**TYPES ACTUELS DE LOCOMOTIVES.** — Les types de locomotives sont aujourd'hui excessivement nombreux; chaque pays, chaque compagnie

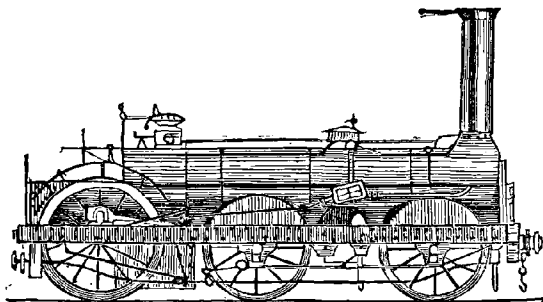


Fig. 333. — LOCOMOTIVE CRAMPTON.

en essaye tous les jours de nouveaux. Il appartient à des ouvrages spéciaux d'entrer dans les détails qui différencient les divers systèmes. Nous nous bornerons à citer, d'après M. Guillemin, les trois grandes catégories dans lesquelles peuvent rentrer les différentes locomotives qui parcourent les grandes lignes:

Ce sont : les *machines à voyageurs*, exclusivement affectées au service de la grande vitesse; les *machines à marchandises*, exclusivement affectées au service de la petite vitesse; les *machines mixtes*, employées au service des voyageurs ou des marchandises indifféremment.

Les machines à voyageurs marchent avec la vitesse effective minimum de 40 kilomètres à l'heure; mais elles atteignent le plus souvent une vitesse de 60 à 75 kilomètres, et même de 80 kilomètres à l'heure. Cette vitesse s'obtient en donnant aux roues motrices un diamètre considérable et aux cylindres

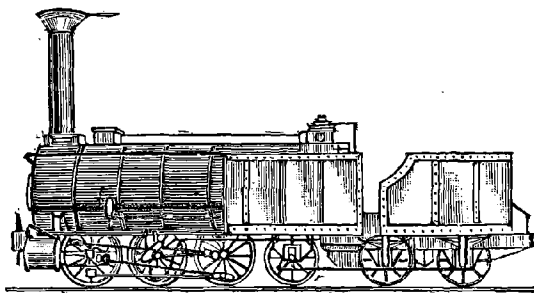


Fig. 334. — LOCOMOTIVE ENGERTH.

une faible longueur. Le type le plus tranché de cette catégorie est la locomotive *Crampton* (fig. 333). Une grande stabilité, qui tient à l'abaissement du centre de gravité général et à l'écartement de l'essieu, une haute puissance de vaporisation, puisque la surface de chauffe a plus de 100 mètres carrés, enfin une grande facilité de surveillance en marche, sont les caractères qui la distinguent.

La seconde catégorie de locomotives remorque de lourds convois de

marchandises, mais à faible vitesse. Contrairement à celles employées dans les machines à voyageurs, celles-ci ont des roues de petit diamètre et des cylindres de grandes dimensions, qui permettent au piston une plus longue course. En outre, chose importante, les roues motrices sont réunies par le moyen d'une bielle d'accouplement avec une ou plusieurs roues, souvent avec toutes. La vitesse de ces locomotives ne dépasse guère 30 kilomètres à l'heure ; mais la charge remorquée sur un chemin où les

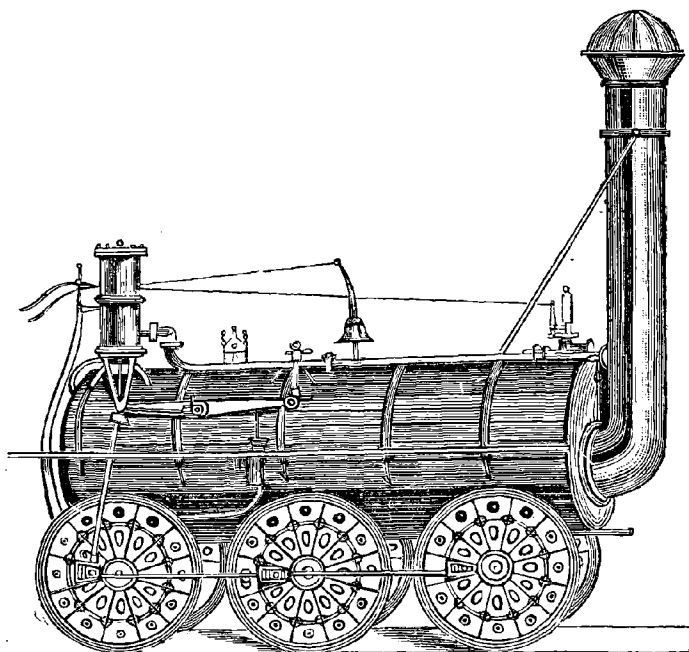


Fig. 335. — LE « ROYAL-GEORG ».

rampes maximum sont de 0<sup>m</sup>,005 peut aller jusqu'à 45 wagons, chargés chacun de 10,000 kilogrammes. Le type extrême de cette locomotive est l'*Engerth*, employée par le chemin de fer du Nord (*fig.* 334). Le tender est en partie réuni à la locomotive, qui porte, dans des caisses entourant le foyer, une partie de l'eau nécessaire à l'alimentation. La surface de chauffe est considérable, à cause de la longueur du corps cylindrique et des tubes, et aussi des dimensions exceptionnelles du foyer.

La troisième catégorie comprend les locomotives destinées à un service de moyenne vitesse, et remorquant, soit de forts trains de voyageurs, soit des convois ordinaires de marchandises, soit enfin des trains composés de voitures de voyageurs et de wagons. Leur vitesse varie entre 35 et 40 kilomètres, et la charge est de 20 à 24 véhicules.

Les premières machines construites étaient portées sur quatre roues seulement. La première locomotive à six roues accouplées fut une machine anglaise (*fig. 335*), le *Royal-George*. La principale raison qui motiva cette disposition fut qu'avec six roues, on peut accroître jusqu'à moitié le poids de la machine, sans que les rails aient à supporter une charge plus lourde; de là, possibilité d'augmenter dans une proportion correspondante la puissance des machines. On pare aussi au danger terrible qui résulte de la rupture d'un essieu dans une locomotive à quatre roues. La machine bascule alors, laboure la voie, déraile et entraîne la perte du train qu'elle remorque. L'effroyable catastrophe arrivée ainsi, sur le chemin de fer de Versailles, le 8 mai 1842, montre combien il importe d'augmenter le nombre des essieux.

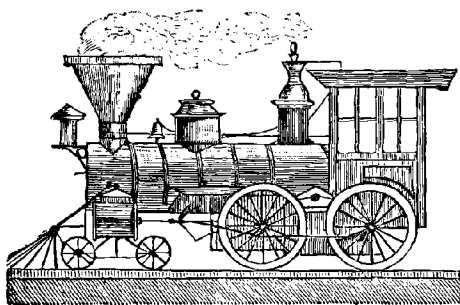


Fig. 336. — LOCOMOTIVE AMÉRICAINNE.

Il y a aussi les machines sans tender, dont l'emploi est général pour le service des gares ou de banlieue. En supprimant le tender, en rassemblant sous le cylindre toutes les roues de manière à les charger d'un poids égal, en donnant

à ces roues un petit diamètre, en plaçant sur la machine des caisses à eau et une provision de coke suffisante, on obtient une grande puissance de traction et de démarrage, ce qui les rend propres aux manœuvres multipliées, et une grande facilité pour pénétrer dans les parties d'un espace restreint d'une gare.

Citons, en terminant, les *locomotives américaines* (*fig. 336*). Dans ces locomotives, les deux roues d'avant, d'un très petit diamètre, sont indépendantes des roues d'arrière, et leurs essieux peuvent prendre une direction oblique à celle des essieux des autres roues. La cheminée a la forme d'un cône évasé, dont l'ouverture supérieure est recouverte d'un tamis métallique laissant passer la vapeur et la fumée, mais arrêtant les étincelles nombreuses qui proviennent de la combustion du bois. La cabine du mécanicien est construite pour l'abriter contre les intempéries. De plus, la locomotive porte un appareil appelé *chasse-bœuf* (*cow-catcher*), destiné à écarter de la voie les buffles, qui, dans la traversée de *la Prairie*, par exemple, se présentent en masses épaisses; et, en outre, une cloche que le mécanicien fait sonner à l'approche d'un passage à niveau.

**CHEMINS DE FER PORTATIFS.** — La question des transports à *grande*

*distance* des matières lourdes et encombrantes; dit M. Turgan dans son *Histoire des grandes usines*, se trouve à peu près résolue par la navigation fluviale et par l'immense réseau de chemins de fer qui sillonne aujourd'hui tous les pays industriels. Il n'en est pas de même des charrois à *petite distance*, nécessaires dans l'agriculture et l'industrie, et qui sont cause d'une élévation considérable dans le prix de production de beaucoup de marchandises. Or, comme l'industriel ne peut à sa volonté faire monter le prix des produits qu'il fabrique, il doit apporter toute son attention à produire aussi économiquement que possible, et, à l'époque où nous sommes arrivés, les machines de tous genres ont été tellement perfectionnées qu'il faut chercher à améliorer l'outillage à un autre point de vue, trop négligé jusqu'ici, c'est-à-dire en organisant des moyens de transport économiques dans les charrois à petite distance.

Jusqu'ici, toutes les tentatives qui avaient été faites pour établir les petites lignes d'usines n'avaient pas donné de résultats satisfaisants, parce que l'on construisait ces petites voies de la même façon que les grandes lignes des compagnies, et, s'il était possible d'établir ainsi une voie droite, la difficulté devenait telle, quand on arrivait aux courbes et aux croisements, que, la plupart du temps, on renonçait à ces installations si utiles. Quelques industriels, plus persévérants, réussissaient à se procurer un ouvrier poseur, formé sur les grandes lignes, ouvrier spécial fort coûteux, avec lequel on menait à bien la première installation, mais que l'on ne pouvait conserver pour les réparations qui se présentaient à mesure que les traverses en bois pourrissaient; et ces réparations mal faites rendaient au bout de peu de temps la ligne absolument impraticable.

Pour rendre les petits chemins de fer réellement pratiques dans les usines et dans les exploitations agricoles, minières, forestières, il fallait donc trouver un système dans lequel le bois fût absolument proscrit et

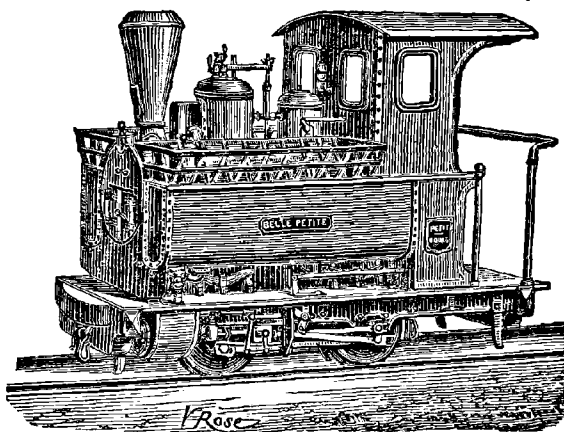


Fig. 337.

LOCOMOTIVE DU CHEMIN DE FER DECAUVILLE  
A PETIT-BOURG (SEINE-ET-OISE).

dont toutes les parties, voie droite, voie courbe, croisements, fussent construits d'une seule pièce, et pussent être livrés à la demande de chaque industriel, sans qu'il y eût besoin d'envoyer aucun ouvrier spécial pour en faire le montage.

C'est ce problème qui a été résolu de la façon la plus complète et la plus satisfaisante par M. Decauville aîné, ingénieur-constructeur à Petit-Bourg (Seine-et-Oise).

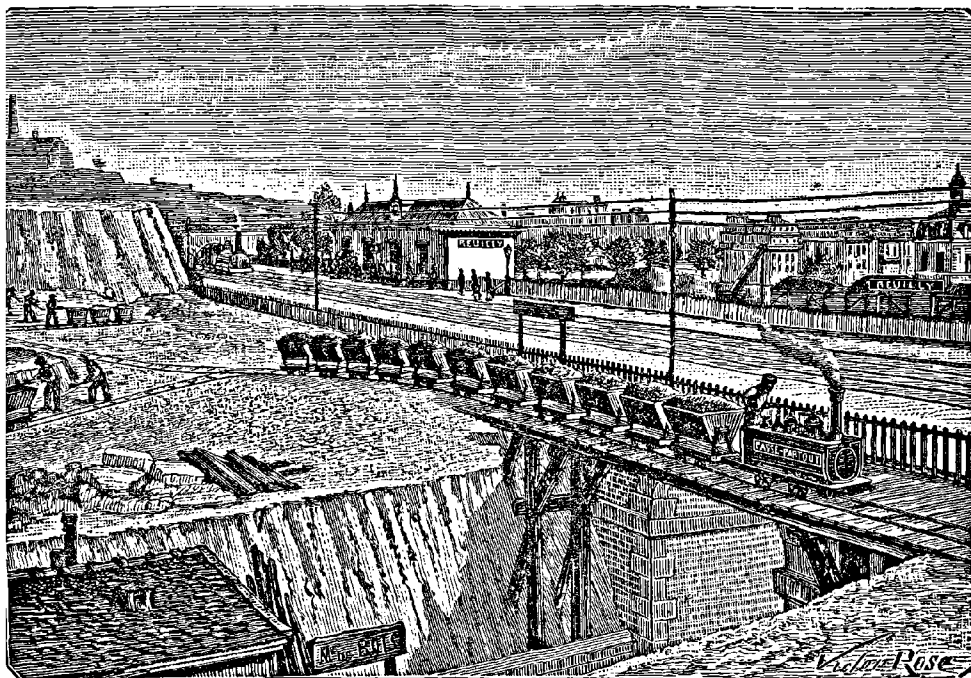


Fig. 388. — TRAVAUX D'AGRANDISSEMENT DE LA GARE DE RBUILLY.

Ce nouveau chemin de fer est basé sur le principe de la division des charges et de leur fractionnement raisonné sur un grand nombre d'essieux, de telle sorte que les accidents habituels des chemins de fer, c'est-à-dire les déraillements, n'ont plus aucune importance, l'homme étant plus fort que son wagon et le remettant instantanément sur la voie au lieu de perdre son temps à attendre du secours.

Lorsqu'il s'agit de charges fractionnables, comme les produits des mines, des briqueteries, des fermes, etc., on divise la charge en fractions de 250 à 500 kilogrammes, mises chacune sur un petit wagon à deux essieux; s'il s'agit, au contraire, de charges non fractionnables, comme les canons d'un fort, on répartit la charge sur deux wagons à fourche

pivotante, ayant chacun deux ou trois essieux. L'ensemble de ce nouveau chemin de fer a été appelé *porteur*, et sa particularité la plus importante, c'est que les rails ne faisant qu'une seule pièce avec les traverses et les éclisses, la voie peut instantanément être établie n'importe où, et enlevée, transportée et réinstallée avec la plus grande promptitude.

La voie se compose de travées de 5 mètres en rails fabriqués spécialement pour cet usage. Ils sont la miniature des gros rails des compagnies avec une largeur de patin aussi grande que possible, et arrivent par con-

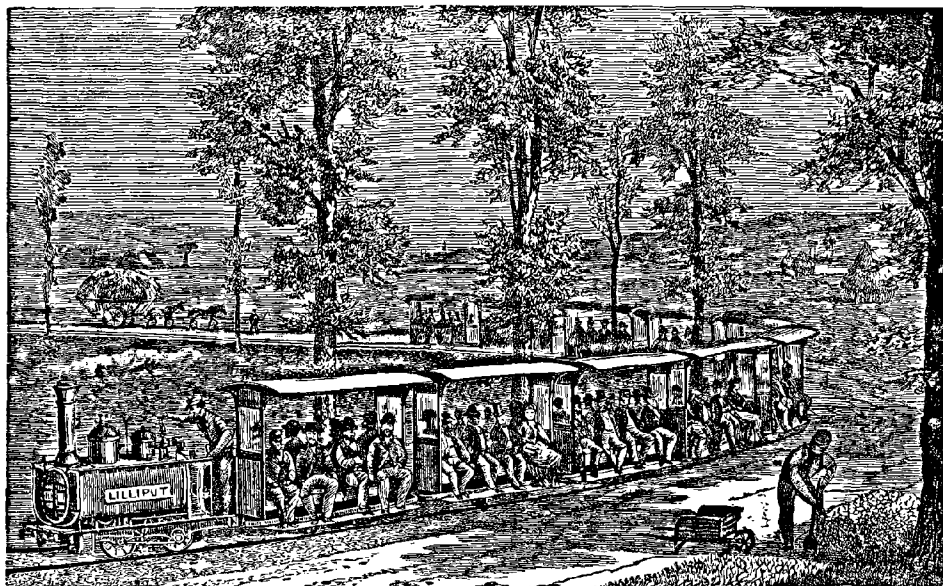


Fig. 339. — CHEMIN DE FER DE PETIT-BOURG.

séquent à la plus grande résistance que puisse obtenir le fer travaillé. La locomotive (*fig. 337*) est une locomotive en miniature, les wagons sont lilliputiens, et, néanmoins, leur force est assez grande pour que l'application en ait été faite industriellement dans les travaux d'agrandissement de la gare de Reilly (*fig. 338*). A l'usine de Petit-Bourg, près de Corbeil, fonctionne également un petit chemin de fer, sur une voie de 0<sup>m</sup>,50, pour le transport des voyageurs, et les résultats obtenus l'ont fait adopter par le Jardin d'acclimatation du bois de Boulogne, pour le parc du casino d'Arcachon, etc. (*fig. 339*). L'application la plus extraordinaire qui ait encore été faite de ce petit chemin de fer a lieu en ce moment dans l'Afrique équatoriale.

La Société de géographie cherchait depuis longtemps à s'assurer si le fleuve Ogôoué communique réellement au fleuve Congo par un de ses

affluents, comme le font supposer certains voyageurs, dont le témoignage est cependant mis en doute. Une expédition, formée sous son patronage et ayant à sa tête M. Savorgnan de Brazza, enseigne de vaisseau, accompagné du docteur Balay et de M. Mizon, enseigne de vaisseau, avait déjà tenté de remonter l'Ogôoué avec des chaloupes à vapeur qui pouvaient se démonter pour franchir les rapides, très fréquents sur ce fleuve; et, après démontage, c'est sur le dos des nègres que toutes les pièces devaient être portées, quelquefois pendant deux ou trois cents mètres, mais le plus souvent pendant plusieurs kilomètres, pour retrouver le fleuve navigable.

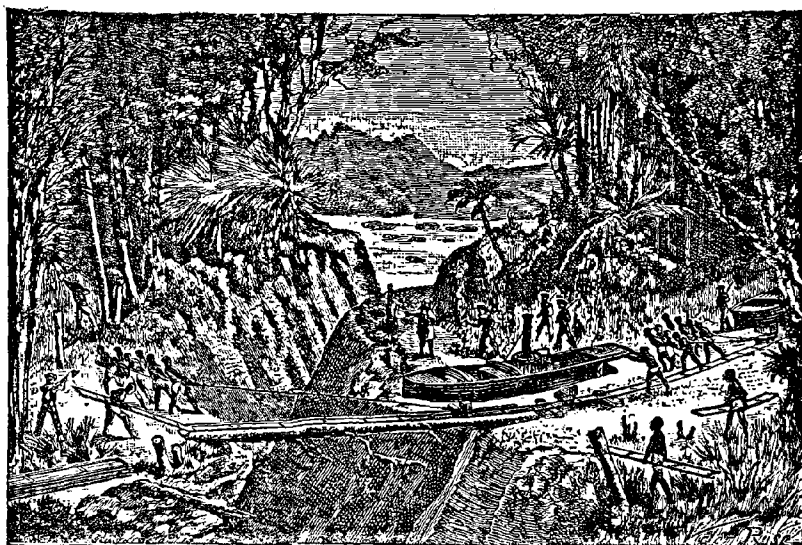
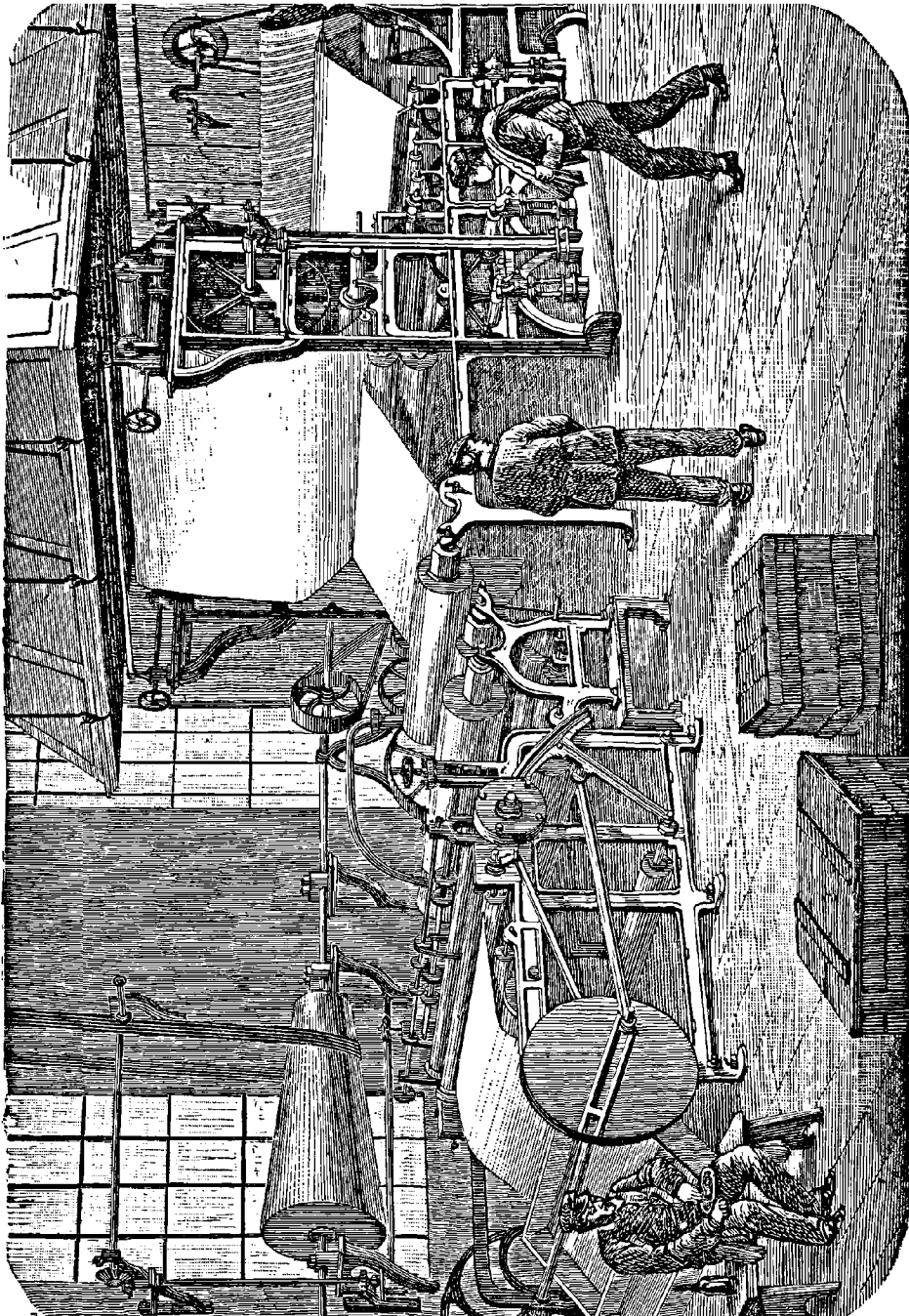


Fig. 340. — PASSAGE D'UN RAVIN AU MOYEN DES CHEMINS DE FER DECAUVILLE.

Les difficultés devenaient telles, à mesure que l'on avançait, que la dernière expédition dut s'arrêter définitivement devant les rapides appelés les Roches-de-Cristal et eut beaucoup de peine à redescendre l'Ogôoué jusqu'à l'estuaire du Gabon.

A leur retour en France, le docteur Balay et M. Mizon entendirent parler des chemins de fer portatifs Decauville et pensèrent qu'ils pourraient peut-être en tirer parti dans une nouvelle expédition. Ils vinrent donc à Petit-Bourg le 26 octobre 1880. M. Decauville leur proposa immédiatement de transporter leurs chaloupes sans les démonter et avec leur petite cargaison. La proposition fut acceptée, et les dernières nouvelles reçues permettent de croire que le résultat cherché par les hardis explorateurs pourra être atteint, la grande difficulté du transport des chaloupes et des bagages étant vaincue (*fig. 340*).





Machine à vapeur pour la fabrication du papier (page 753).



Ajoutons que M. Decauville a fourni les 106 kilomètres que le gouvernement russe emploie pour les transports de troupes dans le Turkestan, et qu'il livre en ce moment le matériel nécessaire aux travaux du canal de Panama, des chemins de fer du Sénégal, des ports de Sébastopol, de Newhaven, etc.

**VOITURES A VAPEUR.** C'est de 1873 que date, chez nous, l'ère des *tramways*. Presque aussitôt, l'esprit de spéculation se passionna de cette idée nouvelle, comme il est d'usage. Puis les inventeurs se sont ingénies à découvrir un mode de traction mécanique, et nous avons parlé ci-dessus du tramway à air comprimé (page 326). Mais, jusqu'à présent, la machine à vapeur s'est montrée supérieure à tous les autres moteurs. Lorsque, en 1861, les ingénieurs du service municipal s'avisèrent de montrer sur les boulevards de Paris un rouleau compresseur mu par la vapeur, le préfet de police crut devoir imposer la condition que cet appareil ne circulerait que la nuit, afin d'éviter les accidents. Les chevaux s'effrayent, en effet; mais l'éducation des chevaux se fait aussi bien que celle des hommes. Nous avons vu les petites locomotives des tramways circuler à toute heure du jour sur certains boulevards, et, s'il y a eu des accidents, ils ont été en petit nombre. Ce n'est point à cela qu'est dû leur remplacement par la traction avec des chevaux; mais seulement parce qu'ils coûtaient plus cher. Aussi, certainement ils reparaitront, perfectionnés de telle sorte que le prix de revient du transport soit inférieur. Ce n'est donc point les voitures publiques à vapeur qu'il faut ambitionner, elles seront bientôt établies; mais bien les voitures particulières, les voitures de famille.

Il est évident que le temps n'est pas loin où nous aurons de véritables voitures à vapeur, circulant dans les rues aussi docilement que les fiacres et les omnibus. Nous avons tous vu, entre autres, en 1875, une voiture à vapeur se promener sur les boulevards extérieurs et se diriger dans tous les sens avec une facilité remarquable. M. Tresca, membre de l'Académie des sciences, avait pris place dans cette voiture et a fait connaître le résultat de l'expérience. Cette voiture avait été combinée par M. Bollée, constructeur au Mans, dans le but de faire ses courses, de conduire ses matériaux à la gare du chemin de fer, et de lui servir, à l'occasion, de voiture de chasse et de voyage. Avec les provisions d'eau et de charbon, elle pèse 4,000 kilogrammes, 4,800 avec douze voyageurs. Ce poids est porté, savoir : 3,500 kilogrammes sur les deux roues motrices de 1<sup>m</sup>,18 de diamètre et 0<sup>m</sup>,12 de largeur de jante, les 1,300 kilogrammes restants sur les deux roues d'avant-train de 0<sup>m</sup>,95 de diamètre. A l'arrière se trouve une chaudière verticale : diamètre, 0<sup>m</sup>,80; hauteur,

1 mètre. Elle alimente quatre cylindres groupés deux par deux entre les roues, sous un angle de  $45^\circ$ . Chaque groupe commande une paire de roues par l'intermédiaire d'un engrenage et d'une chaîne sans fin. Les pistons ont  $0^m,10$  de diamètre et  $0^m,16$  de course. A l'avant du véhicule sont réunis tous les organes de commande à la disposition du conducteur. Le service de la chaudière est exclusivement confié à un chauffeur. Le conducteur, à l'aide de pédales, règle l'entrée de la vapeur dans les cylindres, accélérant ou retardant ainsi la vitesse de marche : une coulisse Stephenson lui permet au besoin de reculer le véhicule. La main droite repose constamment sur le gouvernail, qui agit sur les roues d'avant-train. La machine parcourt facilement 20 kilomètres en plaine, 12 à 15 kilomètres sur les voies fréquentées ; elle maintient une vitesse de 9 kilomètres sur des rampes de 5 centimètres par mètre, et peut même y remorquer une voiture du même poids que le sien. Elle n'évolue pas certainement aussi facilement qu'un de nos fiacres parisiens, mais plus facilement qu'un omnibus, par suite de la suppression de la flèche et de l'attelage. Elle s'arrête, repart, se range, évite avec une surprenante précision les autres voitures. En réduisant les dimensions, en employant la vapeur sous haute pression, on parvient à la vraie voiture de promenade : on pourra la guider aussi facilement que le premier cocher venu conduit ses chevaux. C'est le véhicule de l'avenir.

Depuis, en 1881, une nouvelle voiture à vapeur a été imaginée par M. L. de Cambiaire, et essayée avec succès à Lavour (Tarn).

L'appareil est un chariot à siège transversal, porté par quatre roues de  $0^m,30$ , et pourvu d'un avant-train. La force motrice s'exerce sur l'essieu des roues d'arrière par l'intermédiaire de deux chaînes mises en mouvement par un arbre parallèle à l'essieu, et actionné lui-même par les cylindres moteurs. Le générateur se compose d'un cylindre en cuivre rouge de  $0^m,20$  de diamètre, surmonté d'un dôme de vapeur également en cuivre et du même diamètre. Sur le cylindre en cuivre rouge, qui sert de réservoir de vapeur, est placé un coffre en forme de tronc de cône, qui contient plusieurs tubes en hélice en forme de serpentins. La caisse du foyer s'emboîte dans le coffre, et les serpentins reçoivent l'action directe du foyer. Cette caisse peut être descendue ou détournée sur la droite, au moyen d'une manivelle. La chaudière ne contient pas plus de deux à trois litres d'eau chaude. L'appareil présente une sécurité complète et peut porter une demi-douzaine de personnes.

Nous verrons ci-après les appareils de M. Trouvé, entre autres, appliquant des moteurs électriques à ces véhicules de famille, destinés, nous le répétons, à remplacer nos fiacres et nos calèches.

**MARTEAU-PILON.** — « La famille des Naesmyth est d'origine écossaise : lors des querelles qui éclatèrent si souvent entre les rois d'Écosse et leurs puissants sujets les comtes de Douglas, une rencontre eut lieu près d'un village des frontières. Le parti royal fut vaincu et dispersé. L'un des fuyards se réfugia dans une forge voisine ; il avait à peine eu le temps de s'affubler d'un tablier de cuir, quand les ennemis firent irruption dans l'atelier. L'ouvrier improvisé se mit à travailler avec ardeur, mais si maladroitement, que le manche du marteau se brisa dans sa main. Un des Douglas s'élança aussitôt sur lui, en s'écriant : « Vous n'êtes pas forgeron ! » (*Ye re nae smyth*). Se voyant reconnu, l'homme de guerre tira son épée, qu'il avait cachée près de lui, et se défendit vigoureusement ; il tua son agresseur, tandis que le maître assommait un autre assaillant. Quelques soldats étant alors survenus, les ennemis furent obligés de s'enfuir. L'armée royale parvint à se rallier, retourna au combat, et sa défaite momentanée devint une victoire. Le roi concéda un domaine à son fidèle soldat qui prit le nom de Naesmyth (*Vous n'êtes pas forgeron*) (1). »

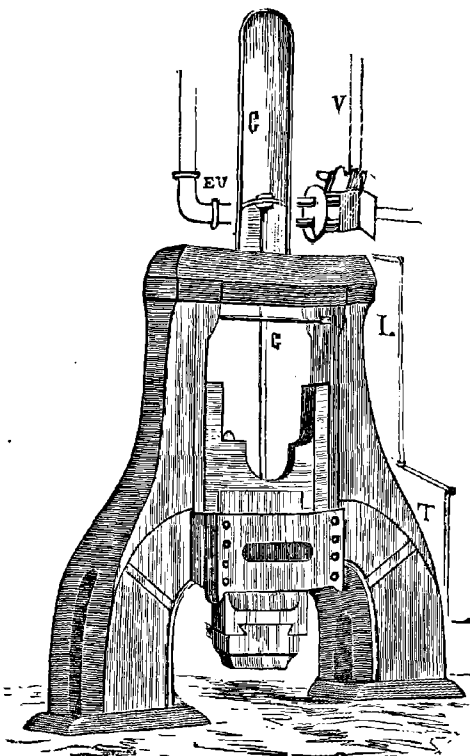


Fig. 341. — MARTEAU-PILON.

Le descendant de ce guerrier qui montrait un si grand dédain pour la métallurgie est précisément Naesmyth, que l'on peut appeler à juste titre le Forgeron du XIX<sup>e</sup> siècle, et l'inventeur du *marteau-pilon* (2).

Pour forger de grosses pièces, on avait reconnu l'insuffisance du marteau à main : le marteau de forge fut inventé ; il était habituellement mû par l'eau, ou bien par des chevaux ou des bœufs. On se servait aussi de *martinets*, dont les plus petits étaient mis en mouvement par le pied.

(1) Émile Jouveaux, *Histoire de quatre ouvriers anglais*.

(2) Cependant M. Naesmyth n'est pas le seul ingénieur qui ait des titres à cette invention. On cite encore M. Cavé, et, d'après Poncelet, ce serait même à M. Bourdon que reviendrait la priorité.

Watt en inventa un d'une puissance considérable, auquel une roue hydraulique servit d'abord de moteur, et, plus tard, une machine à vapeur, réglée au moyen d'un volant qui pesait sept quintaux et demi et donnait trois cents coups à la minute; mais il n'y eut de changement essentiel que vers 1837, époque à laquelle fut trouvé le marteau-pilon mû par la vapeur.

Ce marteau est un énorme mouton de fonte M (*fig.* 341) dont le poids atteint jusqu'à 15,000 kilogrammes, se mouvant entre deux montants ou

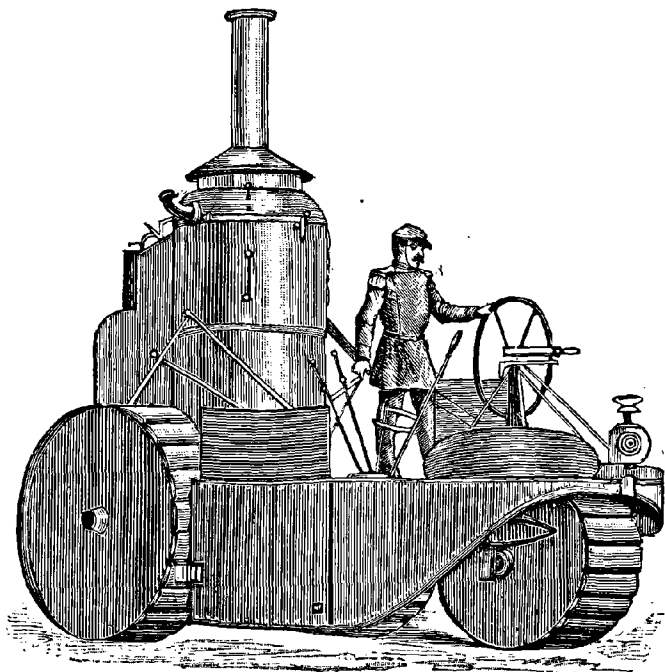


Fig. 342. — LOCOMOTIVE MILITAIRE.

glissières A et B, suspendu à la forte tige C du piston d'un cylindre où la vapeur peut pénétrer à volonté. Celle-ci arrive par le tuyau V, et, de là, par une lumière pratiquée au bas du corps de pompe, sous le piston, qui est alors chassé de bas en haut par la force élastique du fluide. A l'aide d'un levier L, on agit sur une tige T qui abaisse un tiroir latéral, et la vapeur s'échappe par une cheminée UE. La vapeur agit ici par simple effet; mais on construit des marteaux-pilons où elle sert à la fois à soulever l'énorme masse et à la précipiter dans sa chute.

A l'usine d'Essen (Prusse), où se fondent les fameux canons Krupp, le marteau-pilon pèse 50,000 kilogrammes et a coûté plus de trois millions à établir.

**LOCOMOTIVE MILITAIRE.** — On vient de faire des expériences intéressantes sur l'application des *locomotives routières* aux transports militaires de seconde ligne, parcs d'artillerie, approvisionnements, ambulances, etc. Les Allemands s'étaient déjà servis, en 1870, d'une locomotive routière entre Nanteuil et Villacoublay, pour aider au transport du matériel nécessaire au bombardement de Paris. L'essai n'avait pas été très satisfaisant ; les nouvelles expériences sont, au contraire, décisives, en adoptant la locomotive routière Aveling Porter (*fig.* 342). La vitesse de marche ne dépasse pas 6 kilomètres à l'heure, et elle traîne un convoi d'un poids triple du sien, si la pente ne dépasse pas 4 pour 100, double si la pente est de 7 pour 100 ; enfin égal au sien, si la pente est comprise entre 7 et demi et 10 et demi. Dans ce cas, on tourne la difficulté, si la rampe n'est pas très longue, en la lui faisant franchir isolément, et en l'employant ensuite comme machine fixe. On monte les voitures à l'aide d'un câble qui s'enroule sur un cône fixé à l'arbre d'un volant. Si la rampe est longue, on recommence l'opération plusieurs fois. La locomotive peut, dans tous les cas possibles, passer dans les prairies, les terres labourées, sur les routes récemment gelées, ou couvertes de sept à huit centimètres de neige. Enfin elle peut également être utilisée comme force motrice pour charger et décharger les fardeaux. L'armée allemande, l'armée italienne sont pourvues de *locomotives routières*. Il est évident qu'elles remplaceront le train auxiliaire si coûteux.

**CANON A VAPEUR.** — Parmi toutes les conceptions, toutes les inventions proposées pendant l'horrible guerre de 1870 par un patriotisme exalté, il en fut quelques-unes d'intéressantes qu'il nous semble bon de rappeler. Peut-être tant d'efforts mieux dirigés eussent porté leurs fruits ; chacun s'était mis à la besogne suivant ses moyens, et ce n'est certes pas aux industriels, aux savants, aux ingénieurs que peuvent s'adresser, après la défaite, les reproches et les récriminations.

M. Girard, l'habile ingénieur hydraulicien, qui a été si malheureusement tué par une balle prussienne après le siège, avait mis toutes les ressources de son précieux génie d'invention au service de la défense nationale. On lui doit une mitrailleuse à cheval, un pylône ascenseur pour poste d'observation dans les forts, et un canon à vapeur.

On craignait alors une attaque de vive force et un assaut prochain ; on s'était préoccupé d'empêcher l'ennemi de battre en brèche, et l'on se proposait de le recevoir sous une pluie de feu, en lançant sur les tranchées un liquide inflammable, renfermé dans des bouteilles. La commission des études de défense, présidée par M. l'inspecteur général Reynaud,

avait demandé à M. Girard son projet. Quelques jours après, l'habile ingénieur présentait un appareil qui permettait de lancer des bouteilles pleines de sulfure de carbone à 200 ou 300 mètres, jusque dans les parallèles de l'ennemi.

Il ne nous est point permis de décrire l'appareil Girard ; qu'il nous suffise de dire qu'il est basé sur le principe des machines hydrauliques, mais animé par la vapeur ; il fonctionne avec une extrême douceur et une grande puissance. L'inventeur, après l'essai de son système, n'a pas hésité à affirmer que les places fortes trouveraient avantage à se servir des canons à vapeur. Avec des chaudières à haute pression, de 25 à 50 atmosphères, on remplacerait très utilement, dans certains cas, la balistique actuelle. L'économie résultante serait importante, puisqu'un kilogramme de charbon coûte cinquante-six fois moins qu'un kilogramme de poudre et développe une puissance plus de deux fois plus grande ; on parviendrait ainsi à envoyer des projectiles à une distance énorme.

**MACHINES PERFORATRICES.** — Nous avons déjà parlé (pages 479 et 347) des travaux relatifs au percement du mont Cenis et du mont Saint-Gothard. Nous dirons un mot de la machine qui a servi à creuser les roches d'une extrême dureté rencontrées dans le percement de ces tunnels, et qui sont aujourd'hui généralement employées.

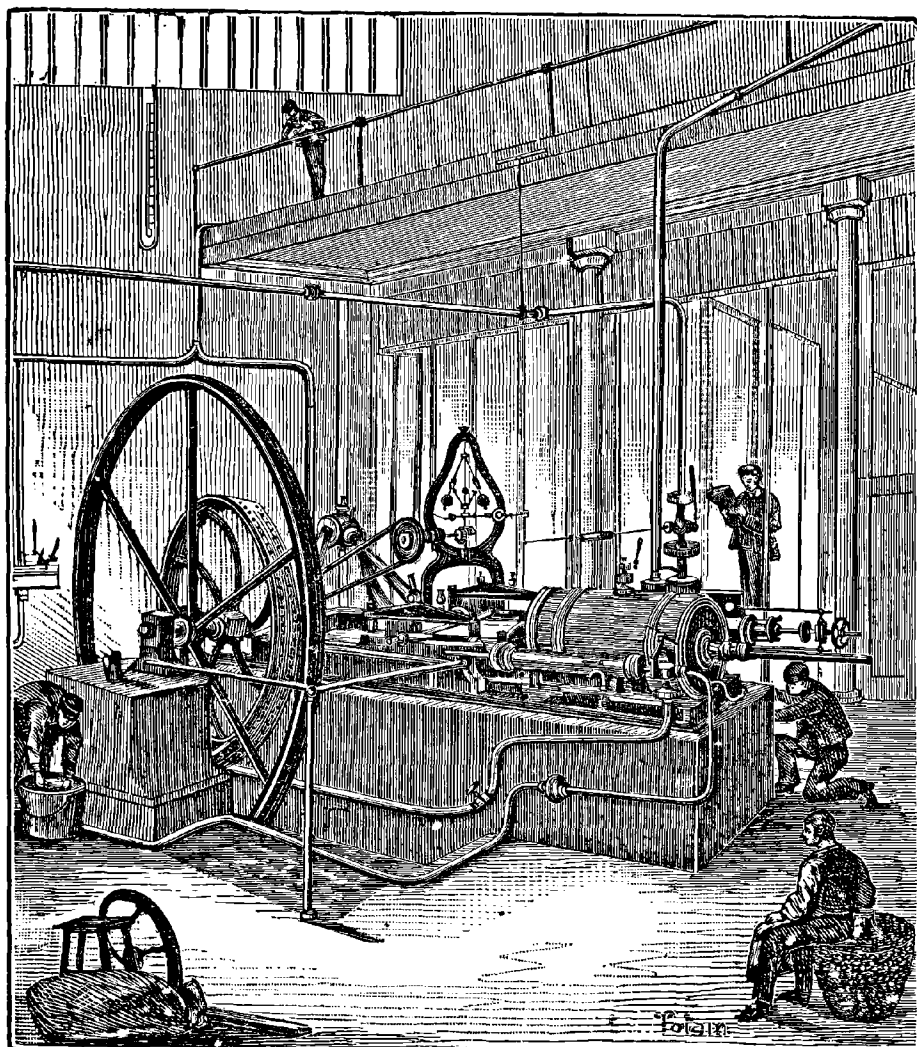
Pour pratiquer des trous dans le roc, il y a différents procédés. Le plus ancien est celui de la percussion accompagnée d'un mouvement de rotation intermittente de l'outil. Dans d'autres cas, l'outil avance en tournant d'une manière continue. Enfin, il y a un troisième type dans lequel l'outil avance et tourne d'une manière continue en formant un canal annulaire et un noyau central que l'on détache ensuite.

Il y a une vingtaine d'années, l'outil à forer était manœuvré presque exclusivement à la main. On frappait directement avec un marteau pour faire avancer l'outil, ou bien celui-ci, après avoir reculé sous l'action d'un mécanisme quelconque, était lancé en avant par un ressort. On eut ensuite l'idée de se servir d'un cylindre à vapeur ou à air comprimé, en reliant l'outil à la tige du piston qui produisit ainsi la percussion, le mouvement de rotation étant obtenu de différentes façons.

Telle qu'on la construit ordinairement, la machine perforatrice se compose d'une machine à double effet (*fig.* 343) ; l'outil à forer s'assemble directement avec la tête du piston. La distribution doit être aussi simple et aussi solide que possible. Généralement le mouvement de rotation de l'outil s'obtient en faisant agir la tige du piston sur une roue à rochet, munie à cet effet de cannelures intérieures. L'avance de l'outil peut être



obtenue de différentes façons, soit en allongeant la course du piston à chaque coup, soit en faisant avancer le cylindre. Cette avance de l'outil peut être automatique ou réglée à la main; si elle est automatique, elle peut être



Machines à vapeur de l'imprimerie V<sup>o</sup> P. LAROUSSE et C<sup>ie</sup>, à Paris (page 734).

régulière et indépendante de la dureté de la roche, ou bien, au contraire, varier en raison inverse de cette dureté.

Quant au montage de l'appareil, il dépend de la nature de l'ouvrage. S'il s'agit de creuser des trous verticaux sur une surface horizontale, on

se sert d'un trépied pour disposer l'appareil. Dans le cas d'une galerie, d'un tunnel, où l'on a des trous horizontaux à percer, la machine est montée sur une colonne maintenue par des vis qui font pression sur le sol et sur le toit de la galerie. Dans certains cas, cette colonne est filetée de manière à permettre de faire monter ou descendre l'appareil. Dans d'autres cas, la colonne est placée sur un chariot au moyen duquel on peut lui imprimer un mouvement transversal. Quand on emploie une

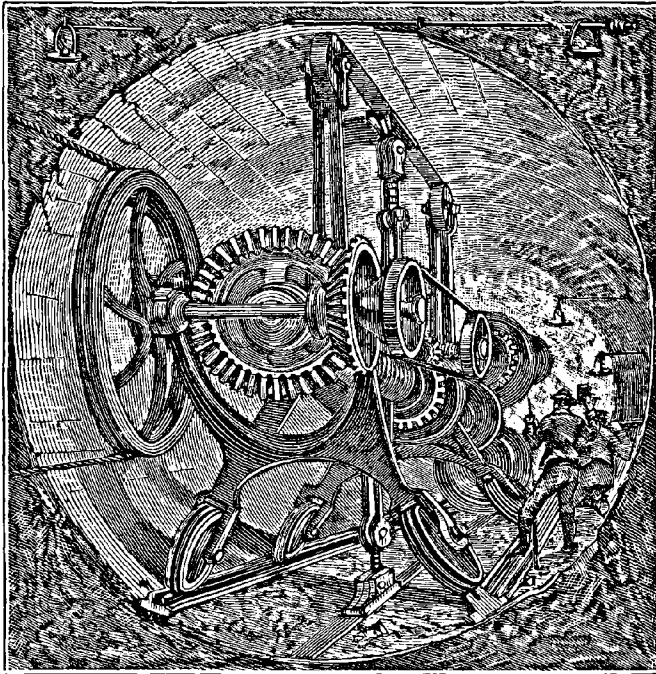


FIG. 343. — MACHINE PERFORATRICE.

colonne, on peut disposer également la perforatrice suivant un angle quelconque par rapport au plan horizontal et par rapport à un plan vertical donné.

La forme des outils varie beaucoup ; les plus employés ont l'extrémité en forme d'*X* ; pour certaines roches, cependant, la forme en *Z* convient mieux.

**APPLICATIONS DIVERSES.** — Les applications de la machine à vapeur sont innombrables, et il faudrait des volumes pour en parler en détail. Indiquons-en seulement quelques-unes, remarquables par quelque particularité, et d'abord la *pompe de Behrens, machine à vapeur rotative*, ainsi

nommée parce que la pièce sur laquelle la vapeur agit directement, celle qui correspond au piston des machines à cylindre, reçoit un mouvement qui est immédiatement circulaire et continu (*fig. 344*). Nous avons donné la description de cette machine, de son fonctionnement (*fig. 174*, page 348); il nous suffira ici de dire un mot de la disposition du mécanisme moteur et de la distribution.

Sur les deux arbres parallèles A et B sont fixées deux portions de couronne massive C et D, jouant le rôle du piston dans les machines ordinaires.

Leurs faces extérieures et convexes s'emboîtent dans le cylindre parfaitement alésé, et leurs faces intérieures et concaves se meuvent autour de deux douilles cylindriques à l'arbre. La forme des différentes pièces est calculée de telle sorte que chacun des pistons, dans son mouvement, vient s'engager dans une entaille concentrique à son arbre de rotation, pratiquée dans la douille fixe de l'autre piston. Il résulte de cette disposition que jamais la vapeur ne peut passer entre l'un des pistons et la douille de l'autre.

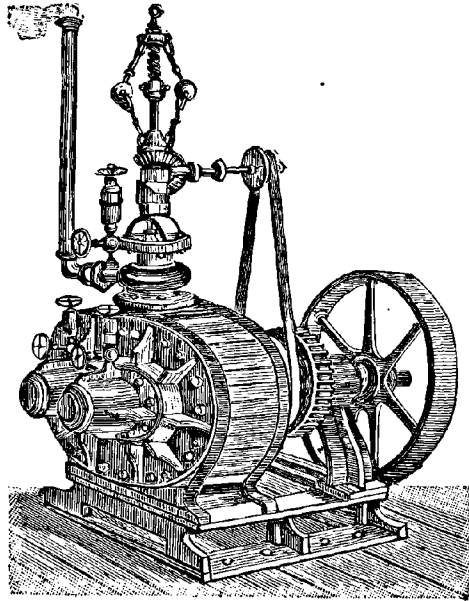


Fig. 344. — POMPE DE BEHERENS.

La vapeur arrive par le tuyau d'admission de la chaudière, pénètre dans l'espace compris entre les deux pistons et la douille. Elle pousse, en s'appuyant sur la face convexe, la face concave du piston, fait tourner ce piston et son arbre. Comme les deux arbres portent extérieurement des engrenages destinés à les faire tourner en sens inverse et avec la même vitesse, chaque arbre se meut en sens contraire du premier. La vapeur agit sur chaque piston pendant un peu plus de la moitié d'un tour, et alternativement chacun des arbres reçoit son mouvement de la vapeur même et de l'autre arbre avec lequel il engrène. L'un des deux arbres est l'arbre moteur de la machine; on le munit d'un volant.

Cette machine rotative est donc une machine à vapeur sans détente et sans condensation; mais il est possible, à l'aide d'une valve convenablement disposée, de la faire fonctionner avec détente.

Comme machines d'épuisement, les machines à vapeur ont rendu

d'immenses services. En Hollande, plus de 200,000 hectares de terre ont été rendus à la culture; en Angleterre, l'étendue des terres desséchées dépasse 90,000 hectares. Parmi les grands travaux exécutés à la vapeur, citons, d'après M. Guillemin, le creusement du canal de Suez. Les deux jetées de Port-Saïd ont été construites en blocs artificiels de béton pesant jusqu'à 20,000 kilogrammes chacun, et au nombre de 25,000. C'est la



Fig. 345. — POMPE A INCENDIE AMÉRICAINE A VAPEUR.

vapeur qui donnait le mouvement aux broyeurs employés pour la trituration des matières dont le béton est formé; c'est la vapeur qui soulevait ces masses. L'*excavateur à vapeur* faisait les déblais et les chargeait sur les wagons; les *dragues à vapeur* creusaient le canal, et des *pompes à vapeur* versaient sur les débris des volumes d'eau pour les entraîner au loin.

Dans les tailleries de diamant où la vapeur imprime aux meules la prodigieuse vitesse de 25,000 tours à la minute; dans les brasseries, où elle met en mouvement les pompes qui transvasent les masses liquides; dans la fabrication du papier (*fig.* à la page 721), dans les tuileries, dans

les fabriques d'orfèvrerie, à la Monnaie de Paris, où la presse de Thonnelier (*fig.* 23, page 62) frappe 24,000 pièces à l'heure ; dans les fabriques de chocolat, de tissus, partout, la vapeur donne un moteur puissant, régulier, rapide, continu.

Un emploi de la vapeur qui est précieux, et qui promet de prendre un immense développement dans les grandes villes, est celui qui s'applique à la *pompe à incendie*. C'est en Amérique qu'a fonctionné d'abord cet appareil (*fig.* 345) qui peut donner 1,000 litres d'eau par minute et lancer le jet à 45 mètres de hauteur. Depuis, de nombreux constructeurs ont perfectionné de plus en plus cet instrument. M. Thirion en a construit une, laquelle se compose de trois corps de pompe attelés sur un même arbre qui reçoit le mouvement des bielles de deux cylindres à vapeur latéraux. Avec un orifice de 56 millimètres, elle donne un jet portant à 50 mètres.

Citons encore, d'après M. Guillemin, l'application de la vapeur à l'imprimerie.

C'est en novembre 1814, au moyen d'une presse inventée par F. Kœnig, qu'eurent lieu les premiers tirages de feuilles imprimées par la vapeur. Le journal anglais le *Times* avait eu l'honneur et le profit de ce premier essai, qui permit d'obtenir mille exemplaires à l'heure. Voici ce que dit M. A.-F. Didot de cette application dans son *Essai sur la typographie* :

« Dans cette machine, la *forme* ou châssis contenant les types passe horizontalement, par un mouvement de va-et-vient, sous le cylindre d'impression sur laquelle la feuille de papier est enroulée et retenue par des cordons. Dans l'origine, l'encre, chassée par un piston de la boîte cylindrique placée au sommet, tombait régulièrement sur deux rouleaux de fer qui la communiquaient à une série d'autres rouleaux, dont les deux derniers, de cuir, l'appliquaient sur les caractères. Une importante amélioration fut le remplacement du cuir, dont les rouleaux étaient d'abord recouverts, par une composition de colle forte et de mélasse formant une substance élastique très favorable à l'impression des caractères. La prise d'encre et sa distribution furent postérieurement améliorées. Enfin, M. Kœnig réunit deux machines semblables, de manière à pouvoir imprimer un journal des deux côtés à la fois. La feuille, conduite par les rubans, était portée d'un cylindre à l'autre en parcourant le chemin dont la lettre S couchée horizontalement (*m*) donne l'idée. Pendant sa course sur les cylindres, la feuille recevait sous le premier cylindre l'impression d'un côté, et sous le second cylindre, elle recevait l'impression sur le deuxième côté. Mais il faut avouer qu'en 1814, lorsque M. Bentley me

montra cette admirable et immense machine, encore fort compliquée, le second côté de la feuille (la *retiration*) ne tombait pas exactement *en registre*. Ce n'est qu'après de longues recherches que MM. Applegath et Copwer sont parvenus à donner à leur presse mécanique un tel degré de perfection, que la feuille conduite par les cordons, après avoir reçu la première impression, passe du premier cylindre sur deux tambours de bois qui la retournent, et va s'appliquer sur le contour d'un second cylindre, avec une telle précision, qu'elle rencontre les types de la seconde forme, juste au même point où se trouvent imprimés du côté opposé les caractères de la première forme; après quoi, elle vient se déposer sur une table placée entre les deux cylindres, où un enfant la reçoit et l'empile. »

Veut-on savoir à quel degré de rapidité l'impression est parvenue, grâce à l'emploi des presses mécaniques mues par la vapeur? Voici quelques faits caractéristiques à cet égard.

La presse d'Applegath à huit cylindres, employée à l'impression du *Times*, fournit 11,520 exemplaires à l'heure. Le *New-York Sun*, journal américain, imprimé par la presse Hoe, dont chaque page comprend huit colonnes, renfermant chacune deux cents lignes de quarante lettres, tire de 16 à 20,000 épreuves à l'heure. Le cylindre central sur lequel s'applique la forme a 6 mètres de développement : huit autres cylindres, comme la presse d'Applegath, se chargent successivement des feuilles, et les impriment sur huit faces différentes du cylindre central. A l'aide de seize ouvriers, deux par cylindre, on obtient une quantité de travail qui eût jadis exigé plus de trois cents pressiers. Au moyen des presses Bullock, le *New-York Herald* tire 25,000 exemplaires, ce qui permet aux journalistes de fournir des informations presque jusqu'au moment où le journal est mis en vente : de plus, les feuilles sortent toutes pliées et toutes coupées de la machine.

Ajoutons que, si l'impression mécanique était jadis inférieure au point de vue de l'art typographique, à l'impression faite au moyen de l'antique presse à bras, aujourd'hui elle a été tellement perfectionnée, que les amateurs les plus difficiles auraient de la peine à distinguer les produits des deux modes d'impression.

Nous donnons (page 729) une vue des ateliers de la maison Pierre Larousse, où s'impriment, au moyen de presses mues par la vapeur, des systèmes Wibart et Rebourg, tant de beaux ouvrages, parmi lesquels nous citerons le *Grand Dictionnaire du XIX<sup>e</sup> siècle*, la *France illustrée*, la *Physique populaire*, etc.

### CONSÉQUENCES MORALES DE L'INVENTION DES MACHINES A VAPEUR.

— Nous voulons terminer ce chapitre par une citation d'un livre de M. Benjamin Gastineau (1). Cette citation nous semble le complément indispensable de ce que nous avons dit : elle sera la conséquence morale que l'on doit toujours retirer d'une nouvelle étude ; elle répondra à des objections trop souvent répétées, de nos jours encore, par les ennemis de tout progrès :

« La science, après avoir lutté victorieusement contre une série de préjugés se renouvelant comme les têtes de l'hydre, a créé un nouveau monde ; elle a rayé l'esclavage des institutions sociales, consacré la liberté et rendu le bonheur possible à l'homme, qui, affranchi définitivement d'un misérable joug, a laissé et laissera de plus en plus la besogne douloureuse à la machine pour s'élançer dans les hautes sphères de la pensée, assurer son indépendance des hommes et des choses, accroître son bien-être par les inventions brillantes, par les découvertes ingénieuses dans tous les ordres de faits.

» La science et l'industrie, dans leur expression la plus élevée et la plus vraie, sont donc synonymes de délivrance ; elles peuvent, sans trop d'orgueil, se proclamer les libératrices du genre humain. Et, en remontant à la source de tant de progrès, à la cause philosophique de tant de découvertes, de tant de merveilles industrielles, on peut dire avec Diderot : *Tout se réduit à revenir des sens à la réflexion et de la réflexion aux sens...* La philosophie qui s'en dégage est consolante. La science est essentiellement pacifique, solidaire, fraternelle. Elle rapproche les mains, groupe les forces, unit les cœurs, méthodise les vues générales, synthétise les œuvres individuelles qu'elle rattache aux œuvres nationales, et celles-ci à la grande œuvre humanitaire de tous les siècles. La science, par ses applications industrielles, représente le vaste atelier dans lequel chaque nation vient forger son morceau de fer, son chef-d'œuvre, suivant l'expression pittoresque des ouvriers compagnons : elle construit, avec tous les matériaux, tous les produits de la main et de la pensée, l'édifice où tous les hommes, toutes les nations peuvent se contempler victorieuses, rayonnant dans leur force créatrice du bien-être, de l'utile et du beau. »

Enfin, au point de vue économique, nous donnerons les renseignements statistiques suivants, publiés récemment, en Allemagne, par le docteur Engel, et qui nous semblent intéressants.

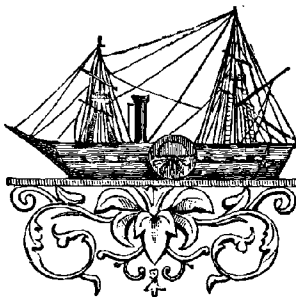
Dans l'espace de temps qui s'est écoulé entre 1829 et 1879, soit

(1) Benjamin Gastineau, *Les Génies de la science et de l'industrie*. (Bibliothèque utile, Germer Baillière, éditeur.)

cinquante ans, il a été construit sur la surface de notre globe 350,000 kilomètres de chemins de fer, pour l'exploitation desquels il a fallu 105,000 locomotives, 210,000 voitures de voyageurs et 245,000 wagons de marchandises, ayant donné lieu à une dépense totale de 80 milliards de marks. A ce titre déjà, les chemins de fer font partie des inventions les plus importantes; mais ce qui ajoute encore à ce titre, c'est l'économie de temps, de force et d'espace qu'ils permettent de faire. L'économie de temps est prouvée par l'exemple suivant : à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, les onze routes principales s'éloignant de Paris, avec une distance totale de 5,000 kilomètres, étaient parcourues en poste en 1,478 heures; tandis que les 5,391 kilomètres de chemins de fer, construits à leur place, sont parcourus, avec une vitesse de 43 kilomètres à l'heure, en 124 heures.

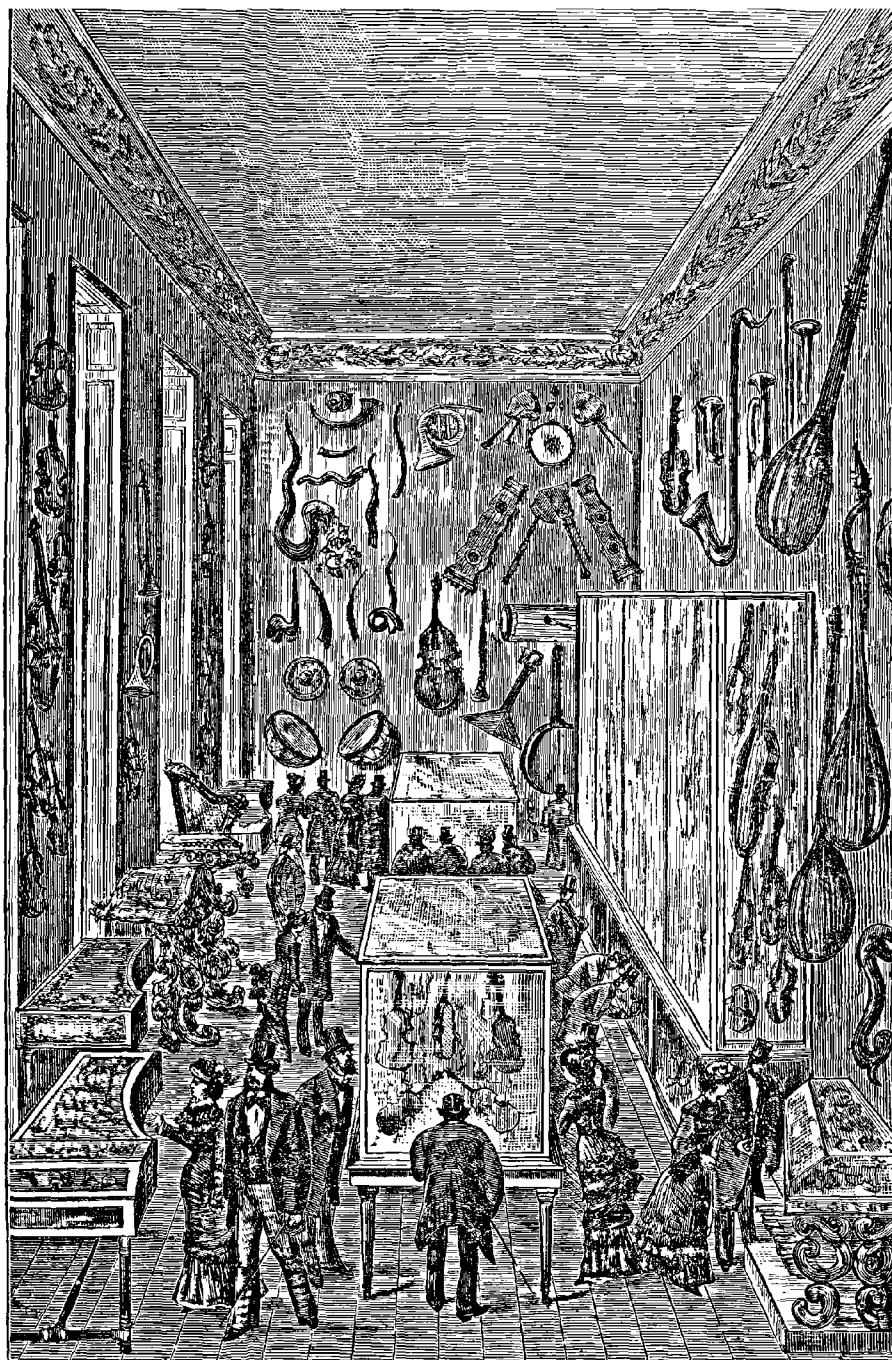
L'économie de force est prouvée par ce fait qu'en moyenne, pour un mark, on peut obtenir le transport d'un kilogramme, par locomotive à 224,5 kilomètres, par chevaux à 8,5 kilomètres, par hommes à 1,9 kilomètre. D'après la statistique des chemins de fer prussiens, en 1844, 19,603,272 kilomètres furent parcourus pour 3,466,500 marks. En 1878, 8,032,576,014 kilomètres furent parcourus pour 371,540,309 marks. Le total des kilomètres parcourus pendant tout cet espace de temps s'élève à 87,087,549,083 pour 4,690,985,774 marks. Dans cet intervalle, le prix des transports est tombé de 15 pf. à 4,5 pf.

En admettant que le transport sans vapeur revienne à 27 pf. par kilomètre, il a été économisé pendant lesdites années, sans égard au temps gagné, 18,561,889,798 marks. En outre, pendant cet espace de temps, il a été parcouru 53,074,166,920 kilomètres par des trains de voyageurs, pour 2,030,302,847 marks. Le prix de transport des voyageurs par kilomètre est tombé, dans le même intervalle, de 4,50 pf. à 3,95 pf. En admettant que le transport par chevaux revienne, pour les voyageurs à 5,53 pf. par kilomètre, il a donc été économisé, grâce aux chemins de fer, 800,319,384 marks, et à peu près 1,061,483,340 heures; ce qui, en évaluant à 10 pf. seulement l'heure, représenterait une nouvelle économie de 106,148,335 marks. Ces chiffres ont leur éloquence!



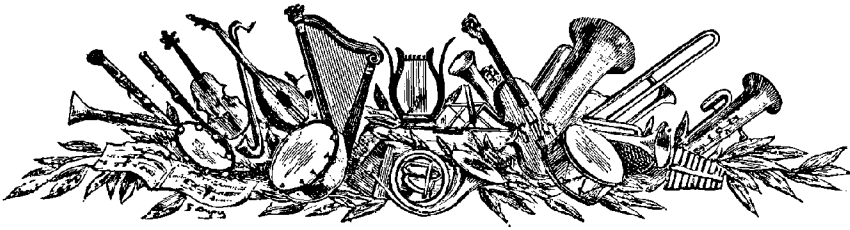


PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Sal.e du musée du Conservatoire national de musique de Paris.





## LIVRE IV

### ACOUSTIQUE

---

#### CHAPITRE PREMIER

##### PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

**DÉFINITIONS.** — L'*acoustique* (du grec *acouō*, j'écoute) est la partie de la physique qui a pour objet de déterminer les lois suivant lesquelles les *sons* se produisent et se propagent, et aussi les rapports qui existent entre les divers sons, mais abstraction faite des sensations ou des sentiments qu'ils peuvent éveiller en nous, lesquels sont du domaine de la musique.

Dès la plus haute antiquité, l'*acoustique* avait été étudiée par les philosophes, sous le nom de *musique théorique* ou *contemplative*, laquelle comprenait l'*astronomie*, ou harmonie du monde; l'*arithmétique*, ou harmonie des nombres; l'*harmonique*, qui traitait des sons, des intervalles, des systèmes, etc.; la *rythmique*, qui traitait des mouvements, et la *métrique* ou prosodie. Mais ce ne fut qu'au XVII<sup>e</sup> siècle que les physiciens firent des recherches sur les lois physiques de la production et de la propagation des sons.

Le *son* est la sensation particulière que nous percevons par le sens de l'ouïe. Il ne faut pas confondre le *son* avec le *bruit*, quoiqu'il y ait entre eux une différence bien difficile à préciser d'une manière rigoureuse. On admet généralement que le *bruit* diffère du *son* en ce que ses vibra-

tions ne sont pas *isochrones* (d'égale durée), et ne se succèdent pas assez rapidement pour donner à l'oreille une sensation continue.

**PRODUCTION DU SON.** — Le son naît des mouvements imprimés aux molécules des corps élastiques, lesquels sont appelés pour cela *corps sonores*. Les molécules de ces corps, dérangées un moment de leur position d'équilibre, y reviennent, en exécutant, de part et d'autre de cette position, des mouvements rapides que l'on désigne sous le nom de *vibrations*.

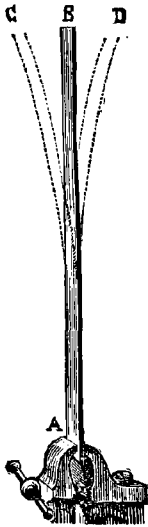


Fig. 346.  
VIBRATIONS  
D'UNE LAME.

La découverte de ce fait se perd dans la nuit des temps. Une corde tendue par les deux bouts et pincée par le milieu a pu y conduire; elle résonne, et son état vibratoire est rendu aussitôt sensible par la forme même qu'elle présente; elle a l'aspect d'un fuseau allongé. L'œil voit la corde dans toutes les positions à la fois, à cause de la persistance et de la vitesse du mouvement vibratoire, la durée d'une vibration étant moindre que le temps pendant lequel dure une impression lumineuse sur la rétine. On attribue cependant cette expérience à Pythagore, qui inventa le *monocorde*, point de départ de la science acoustique, ou, du moins, qui le premier s'en servit pour tracer son *canon musical*, principale base des doctrines pythagoriciennes. Il avait saisi dès le principe la valeur des vibrations, soit pour en considérer la forme et le nombre, soit pour distinguer les vibrations sonores de celles qui n'ont plus aucune sonorité. C'est ce champ de spéculations

élevées que ce philosophe mathématicien semble avoir voulu léguer aux méditations de la postérité, en priant ses disciples d'inscrire sur son tombeau le *monocorde*.

Depuis lors, il faut traverser toute l'antiquité grecque et romaine, tout le moyen âge, et arriver au temps de Galilée, pour voir reprendre et développer les idées pythagoriciennes sur l'harmonie.

Il est facile de constater les vibrations, productrices du son, au moyen de diverses autres expériences.

Que l'on fixe par l'une de ses extrémités une lame métallique AB entre les mâchoires d'un étau (*fig. 346*). On amène l'extrémité supérieure B en C, puis on l'abandonne à elle-même. En vertu de son élasticité, elle tend à revenir à sa position première, mais, en vertu de la vitesse acquise, elle dépasse cette position et va en D; puis revient vers C, retourne vers D et ainsi de suite, en exécutant le *mouvement vibratoire*. Ces vibra-

tions ont, on le voit, quelque analogie avec les oscillations du pendule (page 112); comme elles, elles sont *isochrones*, quelle que soit l'amplitude; mais il faut remarquer que cet isochronisme est ici tout à fait rigoureux, tandis que, nous l'avons dit, il n'est qu'approché dans le cas du pendule (1). Or ces vibrations, lorsque la lame élastique est suffisamment courte, et le mouvement vibratoire suffisamment rapide, c'est-à-dire lorsqu'il cesse d'être perceptible à la vue, produisent un son parfaitement net.

On peut encore placer près d'une pointe métallique (fig. 347), à un millimètre environ, une cloche en cristal suspendue de manière qu'elle ne puisse se mouvoir, et frapper sur elle un coup léger. Au son qu'elle rendra se mêlera un bruit occasionné par ses bords heurtant la tige métallique, qu'ils ne touchaient point avant la production du son. Une petite balle de sureau, suspendue par un fil, est également repoussée par la cloche, et oscille pendant tout le temps que le son dure. Si l'on met de l'eau dans cette cloche, en la retournant, cette eau frémit, quand, en frottant les bords du verre, on produit des sons.

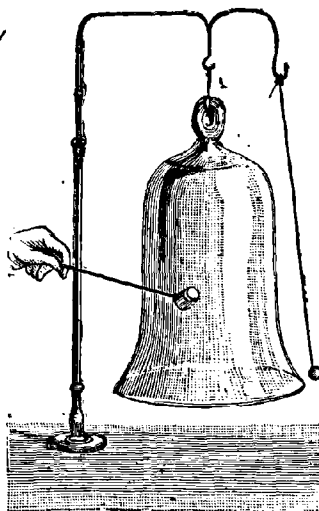


Fig. 347.

VIBRATIONS D'UNE CLOCHE.

(1) Cet isochronisme des vibrations des lames a donné l'idée d'établir un nouvel instrument destiné à vérifier les lois de la chute des corps, appareil très ingénieux qu'il importe de signaler, et auquel l'inventeur, M. Desbois, a donné le nom de *lapsomètre* (fig. 348) (de *lapsos*, chute, et *metron*, mesure).

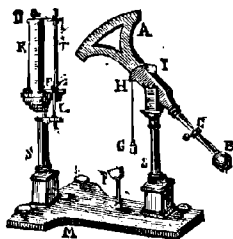


Fig. 348.

LAPSOMÈTRE.

Sur un plateau de fonte M s'élèvent deux colonnes; l'une S porte une lame d'acier solidement fixée par un bout; cette lame est lestée à l'extrémité libre de manière à n'obtenir qu'une trentaine de vibrations par seconde. Quand on l'écarte de sa position verticale, elle doit, dès qu'elle est abandonnée à elle-même, venir heurter une légère pièce F, qui supporte une tige rigide T maintenue verticale par un guide D; à l'instant où la pièce F est chassée, un pinceau, fixé à l'extrémité libre de la lame, et enduit d'une couleur quelconque, inscrit, sur la tige T, le point zéro; c'est aussi à ce même instant que la chute commence; elle ne dure qu'une fraction de seconde pendant laquelle le pinceau marque un point à chaque oscillation, la tige ayant environ 36 centimètres, la lame a été disposée de manière à marquer 5 points. Appliquant alors la tige sur la règle R divisée de telle sorte que 25 parties occupent

l'espace compris entre les points 0 et 5 de la tige, on voit immédiatement que tous les points intermédiaires correspondent exactement aux nombres 1, 4, 9, 16, 25, ce qui démontre que : *Les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps.* Avec une tige plus lourde ou plus légère, les distances entre les points marqués sont les mêmes, pourvu toutefois que la résistance du milieu soit négligeable, donc : *Tous les corps tombent avec la même vitesse.* Pour démontrer les autres lois, ainsi que pour répéter, en la variant, une des expériences précédentes,

Une autre expérience s'applique aux vibrations des plaques. On frotte avec un archet le bord d'une plaque sur laquelle on a répandu du sable fin, mêlé d'une poussière plus fine encore (fig. 349). Aussitôt le son se fait entendre ; le sable se réunit sur certaines lignes, appelées *lignes nodales* (de *nodus*, nœud), qui séparent deux parties vibrant en sens contraire, et y reste en repos. La poussière, plus fine, s'accumule dans les parties comprises entre les lignes nodales et s'y amasse en tournoyant

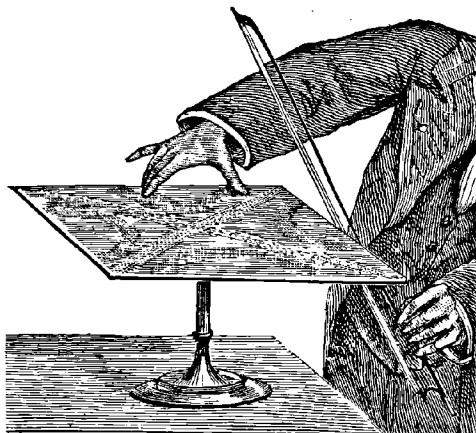


Fig. 349. — VIBRATIONS D'UNE PLAQUE.

continuellement. C'est un effet de l'air extérieur, qui, continuellement ébranlé par la plaque, prend un mouvement tournant suffisant pour entraîner la poussière, mais insuffisant pour entraîner le sable.

on installe sur la colonne S un secteur AB, en équilibre indifférent, rendu très mobile par sa suspension identique à un fléau de balance. Un fil enroulé sur un treuil I et auquel on attache un poids de 3 gr., sert à donner le mouvement ; on lit les espaces marqués au moyen d'une graduation tracée sur le limbe même. Le secteur A étant appuyé par une extrémité sur la pièce F, aux lieu et place de la tige T, on fait vibrer la lame, et le pinceau marque encore des espaces proportionnels aux carrés des nombres, donc : *La loi des espaces n'est pas changée quand on oblige une force accélératrice donnée à entraîner une masse qui n'offre de résistance que son inertie.* Faisons agir sur l'arc H' (non figuré sur la gravure et qui se trouve sur l'instrument en regard de l'arc H) un poids  $g$ , et sur l'arc H un poids  $G = 2$  gr., et observons les points marqués sur le limbe. Répétons l'expérience en faisant agir les deux poids de 3 gr. sur l'arc H. Dans le deuxième cas, les espaces marqués en un temps donné seront triples des premiers, ce qui prouve que : *Les vitesses ainsi que les espaces parcourus en un temps donné sont proportionnelles aux forces accélératrices.* En réglant le poids G de manière qu'il soit parvenu au bas de sa course lorsque l'arc A n'a encore parcouru qu'une partie de la sienne, on voit qu'au moment où G cesse son action, les points marqués deviennent parfaitement équidistants, ce qui prouve que : *Tout mouvement produit d'une force instantanée est uniforme.* En faisant agir successivement le poids G pendant 2 fois, 3 fois plus de temps, les points marqués pendant le mouvement uniforme sont 2, 3 fois plus espacés ; donc : *Les vitesses acquises sont proportionnelles aux temps.* Ces expériences, ainsi que beaucoup d'autres, peuvent se varier de mille manières, en augmentant ou en diminuant, en levant ou en abaissant convenablement le poids G.

Cet appareil ingénieux et d'un prix modique est construit par M. Andriveau, à Paris.

Le corps sonore peut être l'air, ce qui arrive dans les tuyaux sonores. Il est facile de constater que, lorsque le tuyau parle, l'air est dans un état vibratoire. On se sert pour cela d'un tuyau dont une des parois en verre permet de voir à l'intérieur : si l'on y introduit une petite basane, soutenue par trois fils, comme un plateau de balance, et supportant un peu de sable fin, celui-ci est projeté dans toutes les directions, et il reste en repos si on arrête le courant d'air qui faisait résonner le tuyau. On peut encore produire des sons dus à la vibration de l'air, et même des sons musicaux, en plaçant sur le bec de la *lampe philosophique*, ou *harmonica chimique*, un tube d'un diamètre et d'une longueur convenables.

Nous résumerons, d'après M. de Parville, de curieuses expériences, résultant de cet état vibratoire de l'air.

Une flamme s'échappant sous la pression d'un tube en verre rend un son musical. La découverte de ce fait, due au docteur Higgins, remonte à 1777 ; mais les lois du phénomène n'ont été étudiées d'un peu près que depuis 1855, par le comte Schaffgotsch et par M. Tyndall. Il s'explique facilement : il y a dans l'air une série de mouvements de dilatation et de contraction pendant l'inflammation du gaz, c'est-à-dire un mouvement vibratoire, activé encore par le tube, qui produit un courant autour de la flamme, et qui, de plus, offre une masse de gaz limitée pouvant être facilement ébranlée. Placez un long tube de 0<sup>m</sup>,60 sur le jet enflammé d'un bec de gaz, et vous percevez immédiatement un son très pur : la note fondamentale du tube. Si l'on remplace le tube de 0<sup>m</sup>,60 par un tube de 0<sup>m</sup>,30, il ne se produit aucun son ; mais si l'on diminue suffisamment le jet de gaz, le tube rend de nouveau un son musical à l'octave de la note donnée par le tube de 0<sup>m</sup>,60. M. Tyndall, en faisant varier le volume de la flamme et en réglant la hauteur à laquelle elle pénètre dans le tube, a pu obtenir une série de notes. D'ailleurs il n'est personne qui n'ait remarqué combien le moindre bruit avait de l'influence sur la hauteur de la flamme de certains becs de gaz. Que l'on frappe sur une table, que l'on siffle, et l'on verra la flamme osciller, darder des langues de feu dans toutes les directions. L'impressionnabilité dépend en grande partie de la pression sous laquelle s'échappe le gaz. Le son des voyelles affecte la flamme d'une façon spéciale. Prononcez le son *ou*, elle reste immobile ; prononcez, au contraire, la voyelle *o*, la flamme tremble ; dites *è*, elle est fortement affectée ; si vous ajoutez *i*, elle s'agite violemment ; à l'interjection *ah* ! elle saute avec violence ; la lettre *s*, ou le cri *Hiss* ! la met dans tous ses états. Cela se conçoit en se rappelant que les voyelles sont formées de composantes multiples ; ce sont les voyelles aux composantes les plus aiguës qui la font le mieux sauter.

Peut-être trouvera-t-on dans ce phénomène quelques applications inattendues. Une flamme chantante, à l'occasion, jouerait très bien le rôle d'un gardien fidèle. Ne suffirait-il que l'on forçât une porte ou une fenêtre pour que la flamme sortît de son silence et fit retentir la note d'alarme.

En attendant, l'idée est naturellement venue de grouper les notes différentes qu'elles donnent, d'en composer des claviers, d'essayer de les faire parler, de les assouplir à la volonté d'un exécutant. Mais il s'agissait de trouver un dispositif commode et simple qui rendît l'artiste absolument maître de son instrument. C'est à quoi est parvenu M. Frédéric Kastner, et son *piano au gaz*, sous le nom de *pyrophone*, a été vu à l'Exposition de Vienne en 1873, et présenté à l'Académie des sciences (*fig.* à la page 745).

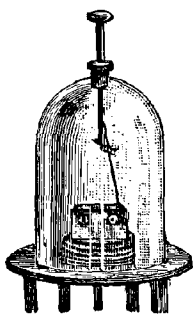


Fig. 350.

PROPAGATION  
DU SON.

Cet instrument, d'un timbre entièrement nouveau, se compose d'un ou de plusieurs claviers s'accouplant comme dans un orgue; chacune des touches du clavier est mise en communication, à l'aide d'un mécanisme fort simple, avec les conduits adducteurs de la flamme dans des tuyaux de verre. Lorsqu'on presse sur ces touches, les flammes produisent aussitôt un son; dès qu'on cesse d'agir sur les touches, les flammes se séparent et le son cesse immédiatement.

M. Lassajoux, le savant acousticien, vient, de son côté, de trouver une disposition de tube sifflant bonne à signaler. C'est un tube vertical de cuivre de 0<sup>m</sup>,04 de diamètre et de 0<sup>m</sup>,15 à 0<sup>m</sup>,20 de hauteur, fermé à sa partie inférieure par une toile métallique. Il dirige à travers cette toile un courant de gaz d'éclairage provenant d'un bec placé à quelque distance au-dessous d'elle.

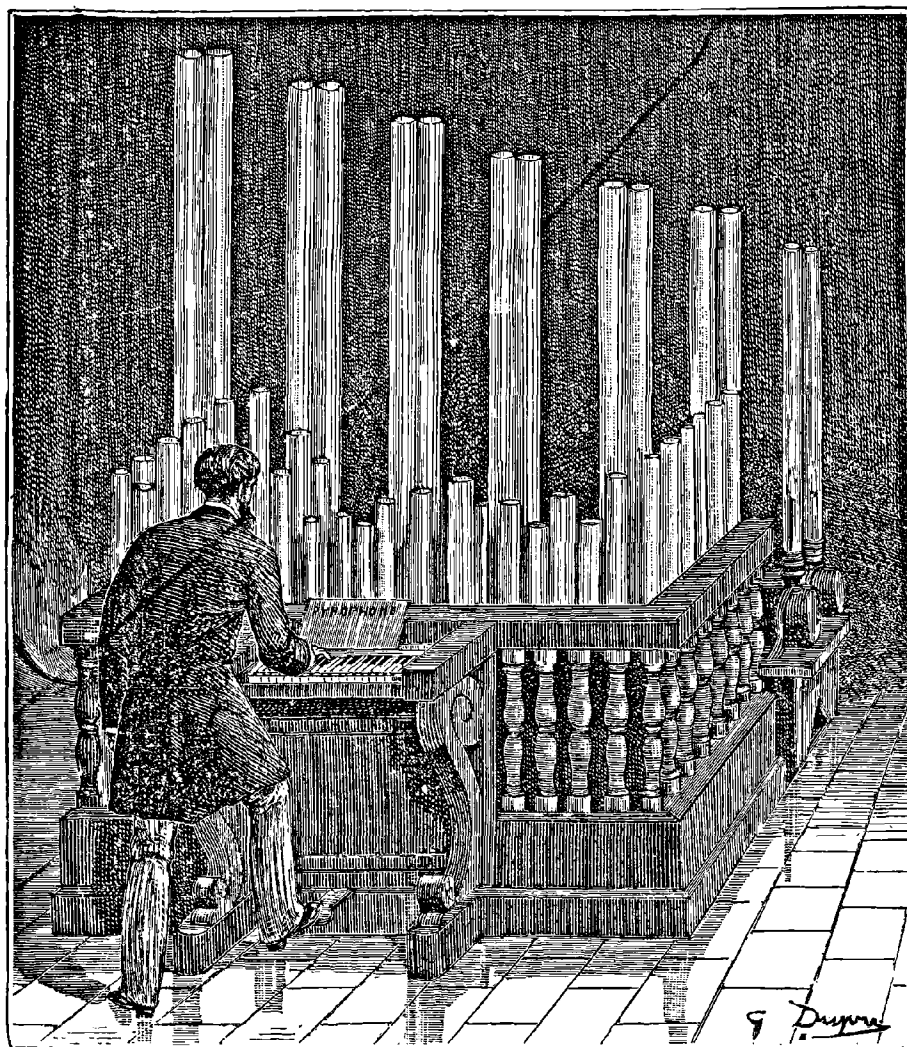
Quand on allume le gaz dans l'intérieur du tube, la flamme fait entendre un son aigu, presque comparable à celui d'un sifflet de locomotive.

**PROPAGATION DU SON DANS L'AIR.** — Le son est, avons-nous dit, une sensation perçue par le sens de l'ouïe; nous venons de voir que cette sensation est produite par les vibrations d'un corps sonore. Il faut ajouter qu'elle ne peut être transmise à l'organe qu'à l'aide d'un milieu pondérable et élastique.

Ainsi, dans le vide, règne un silence que rien ne peut troubler. Dans les régions éthérées, au-dessus de notre atmosphère, toutes les artilleries du monde, les explosions les plus formidables, ne produiraient



aucun bruit. Il est facile de le prouver. Que l'on place sous le récipient d'une machine pneumatique un timbre d'horlogerie muni d'une détente, et que l'on fasse le vide (*fig. 330*). Lorsqu'on lâchera la détente, on verra



Piano à gaz (page 744).

le marteau frapper à coups redoublés sur le timbre, mais on n'entendra aucun bruit. Laisse-t-on ensuite rentrer l'air, on percevra un son qui, d'abord très faible, augmentera de force à mesure que l'air du récipient augmentera de densité, et qui finira par se faire entendre aussi plein

qu'au dehors, quand l'air du récipient aura repris la densité de l'air extérieur. L'air est donc le conducteur ordinaire du son.

O charme de l'oreille ! Aimable Polymnie,  
 C'est lui qui, secondant ta céleste harmonie,  
 Au gré du souffle humain, de l'archet ou des doigts,  
 En accents modulés fait résonner les bois ;  
 Par lui, l'airain bruyant, la corde frémissante,  
 Du mobile clavier la touche obéissante  
 Parlent tantôt ensemble et tantôt tour à tour ;  
 Il fait siffler le fifre et gronder le tambour,  
 Anime le clairon, inspire la musette,  
 Fait soupirer la flûte, éclater la trompette...

L'expérience dont nous venons de parler prouve non seulement que le son n'est pas transmissible dans le vide, mais aussi qu'il est d'autant plus faible que la densité de l'air est moindre. A de grandes hauteurs, en effet, où la raréfaction de l'air est considérable, les sons perdent étonnamment de leur force. Gay-Lussac a constaté qu'à 7,000 mètres au-dessus du sol sa voix était méconnaissable. Ainsi, par exemple, sur le sommet du mont Blanc, un coup de pistolet fait moins de bruit que l'explosion d'un petit pétard dans la plaine. Ceci est vrai, non seulement dans l'air, mais dans tous les autres gaz. En revanche, le son augmente de force dans un air condensé dont la densité reste la même, mais dont on augmente le ressort par la chaleur.

D'autres causes encore peuvent faire varier la transmissibilité du son à travers l'atmosphère. Tout le monde sait que les coups de canon, les signaux acoustiques ne s'entendent pas également bien dans toutes les circonstances atmosphériques. Jusqu'ici, on avait attribué un rôle prédominant à l'influence du vent sur la propagation du son. M. Tyndall a rectifié cette opinion. Chargé de déterminer la distance à laquelle les signaux ordinaires de brume, tels que porte-voix, trompettes marines, coups de canon, pouvaient être entendus en mer et de rechercher la véritable cause des variations de cette distance, selon les conditions atmosphériques, le savant physicien s'est livré, à Douvres, à une série d'expériences, desquelles il résulte qu'une atmosphère claire peut très bien n'être pas favorable à la propagation du son, qu'il n'y a nullement accord entre la *transparence optique* et la *transparence acoustique*, qu'au contraire toute cause qui tend à diminuer la *transparence optique* de l'atmosphère tendrait plutôt à augmenter sa *transparence acoustique*. Ainsi, contrairement aux préjugés, le brouillard, loin d'être défavorable à la propa-

gation du son, aide à la transmission des signaux, fait important, puisque c'est pendant la brume que les signaux acoustiques sont utiles.

M. Tyndall rend compte du phénomène très simplement. La première idée de ses explications lui avait été suggérée par des observations de M. de Humboldt sur la chute du Niagara. Le bruit de la chute se fait entendre trois fois plus loin la nuit que le jour : de Humboldt avait déjà attribué cette inégalité dans la transmission à la formation, pendant le jour, de colonnes d'air raréfié au-dessus des rochers de la plaine. Les blocs, échauffés par le soleil, déterminaient, disait-il, des courants d'air chaud, et le son subissait ainsi une série de réflexions sur des surfaces de densité variable. Or, dans une expérience de M. Tyndall, souvent répétée depuis, et faite un jour où l'atmosphère était si peu conductrice du son qu'à trois kilomètres en mer on ne percevait plus les explosions d'un canon sur la côte, le temps était superbe, la chaleur très forte, le calme parfait. Les rayons d'un soleil ardent, tombant sur la surface de la mer, devaient nécessairement produire une évaporation active. M. Tyndall comprit alors que la vapeur d'eau engendrée prend, par régions, la place de l'air, et forme comme une série d'écrans vaporeux, qui, bien qu'invisibles, n'en partagent pas moins l'espace en zones de densité différente. Ces murailles humides réfléchissent partiellement les ondes sonores et renvoient le son à la côte; elles barrent le passage au signal acoustique. Tout à coup, en effet, pendant l'expérience, survint un nuage assez épais pour voiler complètement le soleil; par suite, l'évaporation dut naturellement se ralentir; au bout de quelques minutes, M. Tyndall reconnut que la portée du son avait augmenté, et qu'elle alla ensuite en augmentant sans cesse à mesure que le soleil se rapprochait de l'horizon. Cette explication est évidemment la véritable.

Il ne faut pas s'étonner, d'après cela, de voir une forte averse de pluie accroître la portée des sons. Cette observation est très importante; on devra se rappeler que, soit le long des côtes, pour la sécurité des navires, soit dans l'exploitation des chemins de fer, pour la sécurité des voyageurs, soit même en campagne, pour les manœuvres militaires, les signaux acoustiques ont une portée extrêmement différente, selon l'état d'homogénéité de l'atmosphère et l'heure de la journée.

**PROPAGATION DU SON DANS LES LIQUIDES.** — L'air n'est pas le seul véhicule du son; car non seulement les autres gaz jouissent de la même propriété; mais les solides et les liquides la possèdent à un degré plus remarquable encore. L'expérience n'est point nécessaire pour constater le fait dans les liquides, car un grand nombre d'animaux vivant

dans l'eau sont pourvus d'un appareil auditif et plusieurs ont l'ouïe très fine. Les plongeurs, au fond de l'eau, peuvent entendre ce que l'on dit du rivage. Mais il est à remarquer que le son est plus faible à travers ce liquide que dans l'air, lors même qu'il s'y propage plus promptement, ce qui provient de ce que l'eau est fort peu compressible, fort peu élastique.

Au moment de l'investissement de Paris, quand il s'est agi de rechercher le moyen de communiquer avec la province, on a songé à savoir si, en réalité, le son produit dans la Seine se transmettrait à une grande distance. Les expériences réalisées par Sturm et Colladon, en 1837, sur le lac de Genève, pour déterminer la vitesse du son (page 754) faisaient pressentir un résultat satisfaisant. A 13,500 mètres, de Rolles à Thonon, le son était perçu très distinctement, et il est probable qu'il devait se propager beaucoup au delà de cette distance. En Seine, les essais dus à M. l'ingénieur F. Lucas ont amené des résultats tout différents.

M. F. Lucas opéra d'abord avec une cloche de l'administration des phares du poids de 40 kilogrammes, disposée sur une gabare. A l'aide d'un câble et d'un treuil, on put laisser filer la cloche dans l'eau jusqu'à la profondeur voulue. On étudia la portée en descendant le courant sur un canot, et en percevant le son au moyen d'un cornet acoustique de 1<sup>m</sup>,50 de haut (page 764). Au départ, à quelques mètres de la gabare amarrée, on entendait nettement, pour chaque battement de cloche, un son mat, analogue à celui que produit un coup de baguette donné sur un tambour. L'intensité de ce bruit diminuait rapidement avec la distance. A environ 1,800 mètres, on n'entendait plus rien. Ce résultat est resté constant pour des expériences répétées en plusieurs points du fleuve.

On se livra alors à une seconde série d'essais avec une grosse cloche de bronze du poids de 354 kilogrammes. On l'installa assez difficilement, entre deux gabares, sur un châssis en bois du poids de 446 kilogrammes. Il fallut imaginer un dispositif convenable pour pouvoir immerger à volonté cette masse de 800 kilogrammes et la faire résonner au bout d'intervalles convenus. A quelques mètres de la station, on percevait un son légèrement métallique ; mais, à 1,400 ou 1,500 mètres, la perception devenait impossible. Ainsi on constata ce fait bien imprévu que le son très intense d'une cloche de 354 kilogrammes présentait une portée inférieure à celle du son d'une cloche de 40 kilogrammes. M. Lucas conclut de ces tentatives que la portée d'un son en rivière, même dans le sens du mouvement de l'eau, est beaucoup plus faible que la portée de ce même son dans un lac. Il paraît probable qu'à intensité égale la portée d'un son dans l'eau d'une rivière augmente avec son acuité.

**PROPAGATION DU SON DANS LES SOLIDES.** — Non seulement la propagation du son à travers les solides est un fait avéré, mais il est connu que ceux-ci sont des organes de transmission très délicats. On connaît les récits, quelque peu véridiques, sur les sauvages, qui parviennent à tirer d'une sorte d'auscultation du sol, les conclusions les plus précises sur la marche d'un corps ennemi, le nombre des hommes qui le composent, la distance à laquelle il se trouve, etc. Tout chasseur, tout soldat a par lui-même fait cette expérience. Deux personnes étant placées à une des extrémités d'une poutre, si l'une frappe sur la poutre, avec une tête d'épingle, quelques petits coups secs, l'autre doit les entendre; on fait même cette expérience pour s'assurer que la poutre est saine; si, en effet, l'intérieur est plus ou moins décomposé, la substance qui en est le résultat est molle et peu élastique, et n'est point propre à la transmission des sons.

Cependant, rapporte le savant historien de la physique, M. Hoeffler, François Bacon (1) niait encore, à la fin du xvi<sup>e</sup> siècle, la propagation du son dans les corps solides; il ne croyait à la possibilité de cette propagation que par l'intermédiaire d'un fluide fictif. Hooke montra le premier, au moyen d'un long fil de fer, que les métaux, non seulement conduisent le son, mais encore le conduisent mieux que l'air. Pérolle continua ces expériences, et il parvint à établir que le bois conduit le son mieux que le métal, et celui-ci mieux que ne le font les fils de soie, de chanvre, de lin, les cheveux, les cordes mêmes de boyau. Il trouva que les différentes espèces de bois (coupés longitudinalement) conduisent le son inégalement, mais toujours mieux que les fils métalliques; et il établit à

(1) BACON (François), illustre philosophe anglais (1561-1626), fils de Nicolas Bacon, garde des sceaux sous la reine Elisabeth, s'occupa d'abord de politique. Protégé par le comte d'Essex, il fut d'abord membre de la Chambre des communes, puis nommé par la reine avocat extraordinaire du Conseil, titre honorifique, qu'il avait gagné en justifiant la condamnation de son protecteur, mais qui l'éloignait des affaires. C'est alors qu'il revint à l'étude des sciences qui avaient été la passion de son enfance, et qu'il commença à jeter les fondements de son œuvre. Jacques I<sup>er</sup> ayant succédé à Elisabeth, la faveur de ce prince le fit arriver successivement aux fonctions de sollicitor général, attorney général, membre du Conseil privé, garde des sceaux et enfin grand chancelier. En même temps il était nommé baron de Vérulam et vicomte de Saint-Alban. Dans cette haute situation, il fit quelques réformes utiles; mais, au bout de deux ans, il fut accusé de concussion, condamné à une amende très forte, exclu des fonctions publiques, emprisonné à la tour de Londres. Ce n'était point lui d'ailleurs que l'on voulait frapper, mais son protecteur, Buckingham, le favori du roi. Au bout de peu de temps, le roi releva Bacon de ses incapacités et lui rendit la liberté, mais il resta dans la disgrâce et dès lors s'occupa exclusivement de science. Il a laissé de nombreux ouvrages, dont le plus important, résumé de ses études, est intitulé : *Instauratio magna*. L'idée fondamentale de tous ses travaux philosophiques est de faire, comme il le dit, une restauration des sciences, particulièrement des sciences naturelles, et de substituer aux vaines hypothèses et aux subtiles argumentations l'observation, les expériences qui découvrent les faits et une induction légitime qui découvre les lois de la nature. Il est ainsi le père de la philosophie expérimentale.

cet égard les échelles suivantes, pour les bois, d'après leur ordre de conductibilité : sapin, campêche, buis, chêne, cerisier, châtaignier; pour les métaux : fer, cuivre, argent, or, étain, plomb.

Hassenfratz, Wunsch, Benzenberg, Chladni (1), Biot, etc., firent des expériences nombreuses pour démontrer que le son se propage évidemment plus vite dans les solides que dans l'air.

La transmission du son dans les solides a reçu une précieuse application dans le *stéthoscope* (du grec *stêthos*, poitrine, et *scopeô*, j'examine),



Fig. 351. — STÉTHOSCOPE.

instrument inventé par Laënnec (2) et qui sert à explorer la poitrine (fig. 351). C'est un cylindre de bois ou de métal, de 0<sup>m</sup>,35 environ, dont l'axe est parallèle à la direction des fibres; ce cylindre, sorte de cornet acoustique, évasé par un bout, est percé d'un canal de 0<sup>m</sup>,06. La partie évasée est également percée d'un canal central et remplie par un petit cône appelé *embout*. On applique l'une des extrémités sur la région de la poitrine que l'on veut explorer, et, en appuyant l'oreille sur l'autre extrémité, on écoute le

bruit de la respiration, et l'on entend très distinctement les sons que produisent par leurs mouvements les organes pectoraux. L'absence de bruit en un point est l'indice d'une lésion. Pendant la toux des phtisiques, l'emploi du *stéthoscope* donne des renseignements précieux pour l'étude des mouvements du cœur.

Un nouveau système d'auscultation, imaginé par le docteur Collongues et qu'il appelle *dynamoscopie* (du grec *dynamis*, force, et *scopein*, examiner) est basé sur la sensation produite par l'introduction du doigt du malade dans l'oreille de l'observateur; celui-ci perçoit une sorte de bourdonnement accompagné quelquefois de pétilllements; la force et la continuité du bruit sont en rapport avec la force et l'état de santé de l'individu.

(1) CHLADNI (Ernest-Florent-Frédéric), physicien allemand (1756-1827), voyagea toute sa vie; il s'occupa surtout d'*acoustique*. Il avait inventé, en 1790, un instrument dans le genre de l'harmonica et qu'il appelait *euphone* (du grec *euphônos*, qui a une belle voix). Cet instrument, perfectionné en 1822, consiste en une grande caisse carrée contenant 42 petits cylindres de verre. Il a écrit un *Traité d'acoustique*, bon encore à consulter.

(2) LAENNEC (René-Théophile-Henri), né à Quimper (1781-1826), médecin en chef de l'hôpital Necker, professeur au Collège de France, a découvert et propagé la méthode d'auscultation pour les maladies de poitrine. Sa méthode a été perfectionnée par MM. Royer et Barth.

Dans une note lue à l'Académie, il y a quelques années, M. Collongues s'attachait à prouver que son mode d'auscultation pouvait, entre autres applications, fournir un bon signe de la mort réelle. « Les observations que j'ai faites dans les hôpitaux de Toulouse, de Montpellier et de Paris, m'ont fait reconnaître, dit-il, qu'il existe, après la mort, un bruit que je désigne par le nom de bourdonnement, bruit facile à percevoir par les procédés *dynamoscopiques* : ce bruit, dont la durée est variable de cinq heures à dix et même à quinze, diminue graduellement avant de disparaître, et s'éteint en commençant par les parties les plus éloignées du cœur. Dans un membre amputé, le bourdonnement persiste quelques minutes en disparaissant d'abord dans les parties les plus éloignées du tronc. L'absence du bourdonnement dans toute la surface du corps peut devenir un signe certain et immédiat de la mort réelle. » La valeur de ce mode d'investigation n'est pas encore bien fixée.

**VITESSE DE TRANSMISSION DU SON DANS L'AIR ET DANS LES GAZ.** — Des faits vulgaires, tels que le bruit d'un marteau, toujours en retard sur la perception du mouvement exécuté, ont dû de bonne heure faire comprendre que, si la transmission de la lumière qui éclaire les objets paraît instantanée, la transmission du son, qui est une vibration de l'air, met un certain temps à parvenir à l'oreille.

Gassendi paraît s'être le premier occupé de la question de la vitesse du son, sans préciser les résultats auxquels il était parvenu. Le P. Mersenne, puis successivement les académiciens de l'Académie *del Cimento*, R. Boyle, Walker, Bianconi, Flamsteed, Halley, Derham, Newton lui-même, et, en France, Cassini (1), Huyghens, Picard, Roemer, tentèrent de mesurer cette vitesse ; mais les résultats obtenus présentaient des discordances considérables. En 1738, l'Académie des sciences de Paris essaya, par des expériences sérieuses, de résoudre la question ; mais ces expériences répétées en Allemagne donnèrent des résultats peu concordants. C'est pourquoi, en 1822, le Bureau des longitudes chargea une commission,

(1) CASSINI (Jean-Dominique), chef de l'illustre famille de ce nom (1625-1712), astronome, né dans le comté de Nice, était déjà célèbre lorsque Colbert l'attira en France, où il se fit plus tard naturaliser. Ses découvertes sont précieuses et l'Académie des sciences, dont il fut membre dès la fondation, publia ses observations et ses mémoires. — Son fils, CASSINI (Jacques), né à Paris (1666-1736), hérita de ses talents et prit sa place à l'Académie des sciences. Il a laissé, entre autres travaux remarquables, un ouvrage intitulé : *De la grandeur et de la figure de la terre*. — CASSINI DE THURY (César-François), fils du précédent (1714-1784), fut reçu à vingt-deux ans à l'Académie des sciences. Il corrigea la méridienne qui passe par l'Observatoire et fut chargé de la description géométrique de la France. Sa belle *Carte de la France*, fruit de ses travaux, achevée par son fils, Jacques-Dominique, représentation exacte et complète de notre pays sur une échelle d'une ligne par 100 toises, fut publiée par l'Académie des sciences.

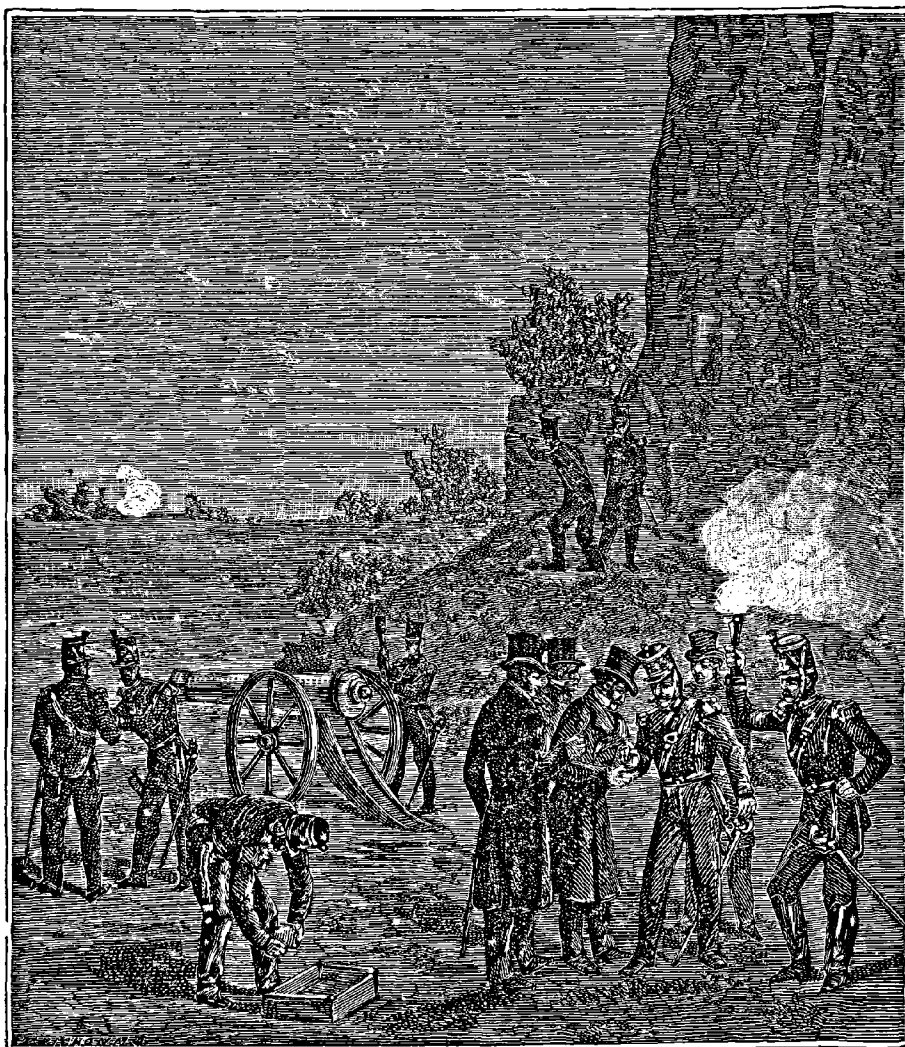
composée de Prony, Bouvard, Arago, Gay-Lussac et de Humboldt, de répéter les expériences de 1738. Ils choisirent pour stations Montlhéry et Villejuif (fig. à la page 753). Les canons qui devaient produire le son étaient servis par des officiers d'artillerie, et, pour compter l'intervalle écoulé entre l'apparition de la lumière (les expériences étaient faites la nuit) et l'arrivée du son, les membres de la commission avaient à leur disposition les excellents chronomètres de Bréguet. Pour se mettre à l'abri de la cause d'erreur due à la vitesse du vent, ils eurent soin de produire deux sons pareils au même instant dans les deux stations et d'observer dans chacune d'elles le temps que le son de la station opposée mit à y arriver; le vent produisant des effets contraires sur les deux vitesses, la moyenne des résultats devait être aussi exacte que si l'air avait été tranquille. Ils savaient que les corrections de température étaient, pour chaque degré du thermomètre centigrade, de 0,626; et ils avaient déterminé avec la plus grande précision la distance du canon de Villejuif au canon de Montlhéry (18 611<sup>m</sup>,51982). Tout ayant été ainsi disposé, la moyenne des expériences faites le 21 juin 1822 donna 340<sup>m</sup>,885 pour l'espace parcouru par le son dans une seconde de temps. Mais, comme il pouvait y avoir quelque doute sur la simultanéité des observations, et qu'il était difficile d'évaluer le temps ainsi que la distance avec une rigueur absolue, les académiciens nommés déduisirent de l'ensemble de leurs observations que la vitesse du son est telle que, à la température de 10°, il doit parcourir 337 mètres et un cinquième dans une seconde.

Les observateurs continuèrent leur œuvre en multipliant les expériences. En Hollande, les professeurs G. Moll et Van Beck répétèrent celle des académiciens de France et arrivèrent presque au même résultat (332<sup>m</sup>,049). Franklin, Parry et Forster firent des observations dans les régions arctiques, à 73°13' lat. boréale et 88°54' long. occidentale de Greenwich, et, quoiqu'on eût pensé que dans ces régions glacées la vitesse du son dût être plus grande, elle s'éloignait d'une quantité insignifiante de celle trouvée en France. D'autres physiciens, MM. Bravais et Martins (1), firent voir que cette vitesse ne change point non plus suivant l'altitude des lieux. Ainsi, par exemple, entre le sommet et la base des Faulhorn, dans les Alpes bernoises, la vitesse du son est la même, que le son se propage de bas en haut ou de haut en bas. Enfin, tout récemment, M. Regnault s'est occupé du même sujet en utilisant toutes les ressources de la physique moderne, et particulièrement les signaux télégraphiques, pour l'enregistrement du coup de feu et de l'arrivée du son. Il paraît

(1) MARTINS (Charles-Frédéric), professeur de botanique à la Faculté des sciences de Montpellier.



résulter de l'ensemble de ces expériences que la vitesse du son est de 333 mètres. La température a une influence marquée sur cette vitesse. Pour des parcours peu étendus, la vitesse croît avec l'intensité de l'ébran-



Expérience pour mesurer la vitesse de transmission du son dans l'air (page 751).

lement, et aussi, quand le parcours est très long, il y a un légère diminution de vitesse.

Daniel Bernoulli, Chladni, puis Dulong, eurent l'idée de mesurer la vitesse du son dans des gaz autres que l'air. D'après leurs travaux, et

ceux de M. Regnault, on admet que cette vitesse est, pour les différents gaz, ainsi que l'indique le tableau suivant :

NOMS DES GAZ.	VITESSE.	NOMS DES GAZ.	VITESSE.
	mètres.		mètres.
Acide carbonique.....	256,83	Hydrogène bicarboné.....	318,73
Acide chlorhydrique.....	297,00	Hydrogène protocarboné.....	431,82
Acide sulfhydrique.....	289,37	Oxyde de carbone.....	339,76
Acide sulfureux.....	209,00	Oxygène.....	317,00
Ammoniaque.....	415,00	Protoxyde d'azote.....	256,45
Air.....	333,00	Vapeur d'alcool.....	230,59
Bloxyde d'azote.....	325,00	Vapeur d'eau.....	401,00
Cyanogène.....	229,48	Vapeur d'éther.....	179,20
Fluorure de silicium.....	167,40	Vapeur d'éther chlorhydrique..	199,00
Hydrogène.....	1269,00	Vapeur de sulfure de carbone..	189,00

**VITESSE DE TRANSMISSION DU SON DANS LES LIQUIDES ET LES SOLIDES.** — Klein, Baker, Hauksbee (1), Musschenbroek et surtout l'abbé Nollet s'étaient occupés de mesurer la vitesse du son à travers les corps liquides. Beudant poursuivit ces études avec quelque succès; mais les expériences définitives à ce sujet furent faites par Colladon et Sturm (2), en 1827, sur le lac de Genève (*fig.* 352).

Le son était produit par une cloche qu'un marteau frappait sous l'eau au moyen d'un levier coudé; le marteau en s'abaissant entraînait une torche qui allumait de la poudre. Dans une barque placée à une certaine distance, l'autre observateur voyait la lumière et percevait le son au moyen d'un grand cornet acoustique, immergé dans le lac, et dont l'ouverture était fermée par une membrane tendue à l'aide de laquelle le son était transmis du liquide à l'air du cornet. La vitesse trouvée fut de 1,435 mètres par seconde, à la température de 8°,1. Ce résultat ne s'éloigne pas beaucoup de celui que donne la théorie, et qui est, d'après la formule adoptée, égal à 1,429 mètres, c'est-à-dire quatre fois et demie plus vite que dans l'air.

Cette transmission, avons-nous dit, est encore plus rapide à travers les milieux solides. Elle n'a pu être mesurée directement; cela tient à ce que la contraction éprouvée par les solides se fait suivant des lois différentes, selon que la pression s'exerce dans un seul sens ou dans toutes les direc-

(1) HAUKSBEЕ (Francis), savant physicien anglais (1650-1709) a fait des découvertes sur l'électricité et l'acoustique, et de nombreuses expériences réunies en un ouvrage intitulé : *Expériences physico-mécaniques*.

(2) STURM (Jacques-Charles-François, savant mathématicien, naturaliste français, né à Genève (1804-1855), membre de l'Académie des sciences, professeur à l'École polytechnique et à la Sorbonne.

tions à la fois. Ainsi la vitesse du son ne sera pas la même dans un fil rectiligne que dans un milieu indéfini. MM. Biot et Martin expérimentaient sur un assemblage de 376 tuyaux de fonte formant une longueur totale de 951<sup>m</sup>,25. L'un des observateurs frappait un petit timbre suspendu à l'une des extrémités du tuyau, l'autre entendait deux sons : l'un, transmis par la fonte, arrivait le premier, l'autre, transmis par l'air, arrivait 2",5 plus tard. Or, pour parcourir cette distance dans l'air, le son devait employer 2',83 ; c'est donc 0",35 que dure la transmission par la fonte, ce qui fait une vitesse huit fois plus grande que dans l'air environ. Toutefois ce résultat

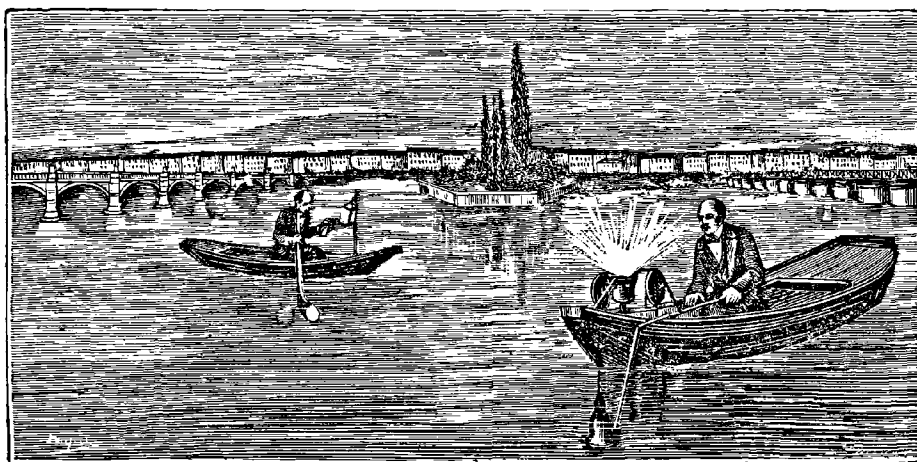


Fig. 352. — EXPÉRIENCE DE COLLADON ET STURM.

n'est pas rigoureusement exact, le tuyau présentant des soudures de plomb qui devaient influencer sur la vitesse de transmission.

Laplace a donné la formule numérique de la vitesse du son longitudinal d'un corps quelconque; elle est .

$$v = \frac{\sqrt{g}}{e},$$

$g$  désignant l'accélération due à la pesanteur, et  $e$  l'éloignement ou la contraction qu'éprouve une colonne de 1 mètre d'une substance gazeuse, liquide ou solide, sous l'influence d'une traction ou d'une pression égale au poids de cette colonne.

Comme on l'a fait pour la lumière, on dut songer à trouver le moyen de mesurer la vitesse du son à des distances relativement petites. Le procédé récemment imaginé par M. Koenig remplit ce but. Il se compose de deux compteurs mécaniques, formés chacun d'un petit marteau qui frappe

sur un bouton, incrusté dans une boîte à résonance; ces petits marteaux battent simultanément les dixièmes de seconde par l'action d'un ressort vibrant qui détermine, dans un courant électrique, exactement dix interruptions par seconde. Quand deux compteurs sont placés l'un à côté de l'autre, les sons cessent de coïncider : c'est que les sons venant du compteur éloigné sont en retard sur les sons qui arrivent du compteur resté en place, et le bruit des deux compteurs se confond toutes les fois que leurs distances à l'observateur diffèrent d'un multiple de 33 mètres. Ce même procédé, trop simple pour s'être présenté à l'esprit des premiers expérimentateurs, est applicable à la mesure de la vitesse du son dans les différents gaz et liquides (1).

À la suite des expériences ci-dessus, concordant à peu de chose près avec les calculs théoriques, ont été admis les résultats consignés dans le tableau suivant :

NOMS DES CORPS.	VITESSE.	NOMS DES CORPS.	VITESSE.
	mètres.		mètres.
Air . . . . .	333	Étain . . . . .	2,498
Oxygène . . . . .	317	Argent . . . . .	2,684
Hydrogène . . . . .	1,270	Platine . . . . .	2,701
Acide carbonique . . . . .	262	Bois de chêne . . . . .	3,440
Protoxyde d'azote . . . . .	265	Cuivre . . . . .	3,716
Ammoniaque . . . . .	430	Fer . . . . .	5,030
Eau . . . . .	1,435	Verre . . . . .	5,438
Éther . . . . .	1,159	Bois de sapin . . . . .	5,994

**MÉCANISME DE LA PROPAGATION DU SON DANS L'AIR OU DANS TOUT AUTRE MILIEU ÉLASTIQUE.** — *Le son se propage dans un milieu élastique, par une série d'ondes alternativement condensées et dilatées.* Supposons, par exemple, un tube cylindrique et indéfini XY (*fig. 353*), rempli d'air à une température et à une pression constantes. Soit dans ce tube un piston PM, oscillant avec une grande vitesse de *ab* en *cd*, et réciproquement. Quand le piston passe de *cd* en *ab*, il comprime l'air qui est devant lui; or, en raison de la grande compressibilité de ce fluide, la condensation ne peut évidemment se faire que dans une certaine longueur *am* que l'on appelle *onde condensée*. Cette première onde *abmn* va communiquer son mouvement à une seconde *mnpq*, celle-ci à une troisième, et ainsi de suite; de sorte que ce mouvement de condensation se propagera dans le cylindre par une série d'ondes qui se succéderont, en présentant chacune

(1) Jamin, *Cours de physique*.

tous les degrés de vitesse du piston PM, allant de  $cd$  en  $ab$ . Réciproquement, quand ce piston reviendra sur lui-même, de  $ab$  en  $cd$ , il se fera, dans la première couche d'air  $abmn$ , une raréfaction de longueur égale à celle de la condensation précédente, c'est-à-dire une *onde dilatée*, qui prendra, comme toutes les autres, tous les degrés de vitesse du piston. La seconde couche  $mnpq$  se dilatera à son tour, puis une troisième, et ainsi de suite, dans le prolongement du cylindre. Chaque oscillation ou vibration complète du piston, comprenant l'aller et retour, donnera donc naissance à deux ondes, l'une condensée et l'autre dilatée, dont l'ensemble forme ce qu'on appelle une *ondulation* ou *onde sonore*. La *longueur d'une ondulation* est l'étendue de la colonne d'air modifiée, ou l'espace que le son parcourt pendant la durée d'une vibration complète du

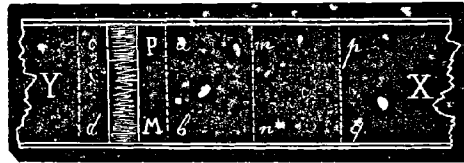


Fig. 353.

PROPAGATION DU SON.

corps qui le produit. Pour obtenir cette longueur, il suffit donc de diviser la vitesse du son, ou l'espace qu'il parcourt en une seconde, par le nombre de vibrations complètes exécutées dans le même temps.

Dans un espace indéfini, les *ondes sonores*, au lieu de se développer dans une seule direction, se propagent sphériquement autour du centre d'ébranlement (*fig. 354*). Chaque molécule d'air communique ses vibrations à la molécule qui est derrière elle, celle-ci à une troisième, et ainsi de suite

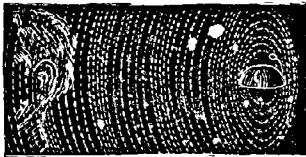


Fig. 354.

PROPAGATION DU SON  
DANS UN ESPACE INDÉFINI.

jusqu'aux molécules qui sont en contact avec le tympan de l'oreille. Celui-ci s'ébranle à son tour pour transmettre au nerf auditif les vibrations reçues; ce nerf les transmet au cerveau, et de là naît la sensation du son. Qui ne s'est amusé quelquefois à lancer un projectile au milieu d'une pièce d'eau tranquille, et n'a observé tout autour du point où il disparaissait une série d'ondulations circulaires se propageant du centre d'ébranlement jusqu'à la rive? Les vibrations sonores se propagent de même tout autour des corps élastiques, en excitant de proche en proche les différentes couches de l'air environnant. C'est la ressemblance de ces phénomènes qui a fait donner ce nom d'*ondes sonores* aux différentes couches conductrices des vibrations.

**RÉFLEXION DU SON.** — Lorsque les ondes sonores rencontrent un obstacle fixe, elles se réfléchissent en formant, suivant la loi générale des

réflexions, un angle d'incidence égal à l'angle de réflexion, de sorte qu'il y a deux systèmes d'ondes, l'un direct, l'autre réfléchi, qui se propagent séparément sans se troubler (*fig. 355*). Ainsi, soit un son se propageant suivant AC et rencontrant le plan ECH, le son se réfléchira en faisant, avec ce plan, un angle de réflexion HCD égal à l'angle d'incidence ECA, de sorte qu'au point D on entendra d'abord le son parti du point A, puis un second son qui, lui, semblera venir du point symétrique B. Ce second son sera l'*écho* du son direct.

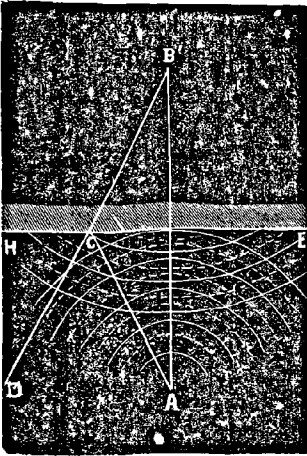


Fig. 355.

## RÉFLEXION DU SON.

son ne donne pas lieu à un écho. Lorsque le corps sonore est placé trop près du corps réfléchissant, il n'y a que simple *résonance*. On ne peut, dans ce cas, percevoir séparément le son direct et le son réfléchi, ils se confondent l'un avec l'autre; seulement le son direct est plus ou moins renforcé, comme il arrive souvent dans les vastes appartements, les corridors, surtout dans les habitations neuves. Il faut qu'il s'écoule au moins un dixième de seconde entre les deux sons, pour qu'il n'y ait pas *résonance*; sans quoi, le son qui revient à l'oreille prolonge l'impression directe, la renforce, ce qui est généralement avantageux, quand le prolongement n'est pas trop long. Pour qu'un obstacle soit capable de produire un écho, il faut donc que la distance au corps sonore soit au moins de 17 mètres, car la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, pour parcourir deux fois 17 mètres ou 34 mètres, c'est-à-dire pour aller se réfléchir sur l'obstacle et revenir au point de départ, le son emploiera un dixième de seconde, et pourra, par conséquent, être distingué. L'écho répétera donc distinctement autant de syllabes qu'il faudra de fois

**ÉCHOS.** — Ce mot qui vient du grec *écho*, qui veut dire son, indique donc le résultat de la réflexion des ondes sonores par un corps quelconque, réflexion en vertu de laquelle le son se répète une ou plusieurs fois.

Un arbre, la voile d'un navire, un nuage, la simple surface de séparation de deux couches d'air d'inégale densité, suffit pour réfléchir le son et produire des *échos*. On nomme *centre phonétique* (du grec *phônè*, voix) le point où le son est produit, et *centre phonocampique* (du grec *campô*, réfléchir), le point d'où il est réfléchi.

Le son direct et le son réfléchi jouissent de la même vitesse. Toute réflexion de

17 mètres pour parvenir à l'obstacle réfléchissant. S'il faut deux fois 17 mètres, l'écho répétera deux syllabes, prononcées à un intervalle d'un dixième de seconde; il en redira trois, quatre, etc., s'il y a trois, quatre fois 17 mètres.

Comme un son réfléchi peut se réfléchir de nouveau en rencontrant un second obstacle dans sa direction, il existe des échos doubles, triples, quadruples, etc. Ces échos, que l'on nomme, en général, *échos multiples*, se produisent ordinairement dans les lieux où se trouvent des murs parallèles suffisamment éloignés.

Outre les échos naturels, il en existe d'artificiels que l'art peut produire en disposant certaines constructions d'édifices de manière à donner, au moyen de son réfléchi, des effets curieux. Ce sont certaines figures de voûte, ordinairement elliptiques ou paraboliques, qui redoublent les sons. Vitruve dit que, en divers endroits de la Grèce et de l'Italie, on rangeait avec art, sous les degrés du théâtre, en des espaces voûtés, des vases d'airain pour rendre plus clair le son de la voix des acteurs et faire une espèce d'écho. Denys, tyran de Syracuse, fit creuser dans un rocher une cave souterraine de 250 pieds de longueur sur 80 de hauteur. Ce souterrain, qui existe encore, fut appelé *l'oreille de Denys*, parce qu'il avait la forme de l'oreille humaine. Il était disposé de manière que la voix se dirigeait vers une ouverture qui communiquait à la chambre de Denys; il y passait des jours entiers à écouter les discours de ceux qu'il y faisait enfermer. Il fit mourir, dit-on, les artistes qui y avaient travaillé, afin de dérober au public le but qu'il s'était proposé en le faisant construire (*fig.* à la page 761).

L'écho figurait dans la mythologie comme une divinité particulière, bien longtemps avant que la raison s'en emparât pour en faire un phénomène physique. On se borna primitivement à raconter les échos les plus merveilleux. On sait ainsi qu'il y avait, à Rome, au tombeau de Metella, femme de Crassus, un écho qui répétait huit fois le premier vers de l'*Énéide* :

*Arma virumque cano Trojæ qui primus ab oris...*

Les anciens parlent aussi d'une tour de Cyzique dont l'écho se répétait sept fois. Il est beaucoup moins merveilleux que d'autres échos observés par des modernes. Dans le parc de Woodstock, comté d'Oxford (Angleterre), il en est un qui répète jusqu'à dix-sept syllabes. A 12 kilomètres de Verdun, un écho, dû à deux grosses tours distantes l'une de l'autre de 72 mètres, répète douze ou treize fois le même mot. A Muyden, près d'Amsterdam, Chladni dit avoir entendu un écho, fourni par un mur

elliptique, et dont le son, très renforcé, paraissait sortir de dessous terre. Le P. Kircher a mentionné un écho qui s'observe au château de Simonetta, près de Milan, dont les deux ailes paraissent situées en avant de l'édifice ; les sons que l'on produisait à une fenêtre de l'une de ces ailes étaient répétés jusqu'à quarante fois. Monge, qui alla visiter ce château, y observa l'écho tel que l'avait décrit le P. Kircher. Barth rapporte qu'aux rives de la Naha, près des bords du Rhin, entre Bingen et Coblenz, on entend un écho qui se répète dix-sept fois, et qui présente cette particularité que tantôt il semble s'approcher, tantôt s'éloigner ; quelquefois on entend la voix distinctement, et d'autres fois on ne l'entend presque plus ; l'un l'entend à droite et celui-là à gauche. Un écho semblable fut observé, par dom Quesnel à Genetay, à six cents pas de l'abbaye de Saint-Georges, près de Rouen. Dans la grande galerie du Louvre sont deux grandes coupes ; on parle bas dans l'une d'elles, qui agit comme un miroir et concentre les rayons sonores ; ceux-ci se réfléchissent sur le plafond, parviennent à l'oreille d'un auditeur penché au-dessus du second vase, et cet auditeur peut seul entendre ce que l'on a dit. Il y a aussi, au Conservatoire des arts et métiers, une salle dite *salle de l'écho*, dans laquelle deux personnes placées à des angles opposés peuvent converser à voix basse sans être entendues par celles qui se trouvent placées dans la partie intermédiaire. Dans la salle du *secret*, au palais de l'Alhambra de Grenade, et dans une salle du ministère de la guerre, à Madrid, on constate les mêmes effets.

**CAUSES QUI MODIFIENT L'INTENSITÉ DU SON.** — Dans les mêmes circonstances, tous les sons, forts ou faibles, graves ou aigus, ont la même vitesse. Il suffit, pour s'en convaincre, de remarquer que, dans un concert, les musiciens qui jouent de divers instruments, font partir tous les sons de leurs notes à des intervalles égaux, et que ceux qui les entendent, de près comme de loin, reçoivent ces sons exactement avec les mêmes intervalles. Le son ne perd, pour ainsi dire, rien de sa vitesse première en s'éloignant du corps sonore ; mais il n'en est pas de même de son intensité. Il s'affaiblit rapidement en s'éloignant du centre d'ébranlement, et finit, à une certaine distance, par devenir inappréciable. L'intensité du son décroît aussi avec l'amplitude des vibrations du corps sonore. Par exemple, si l'on observe une corde métallique tendue qu'on fait vibrer, on la voit d'abord effectuer des vibrations d'une grande étendue, et c'est alors que le son est plus intense ; mais il est moins fort à mesure que l'amplitude des vibrations décroît. C'est pourquoi le son mourant des derniers coups d'une cloche s'affaiblit graduellement jusqu'au moment



où il s'éteint tout à fait. Nous avons vu (page 746) que la densité de l'air a une grande influence sur l'intensité du son ; la force et la direction du vent exercent encore un effet puissant sur l'intensité du son et sur la



L'oreille de Denys (page 759).

distance où il peut parvenir. Enfin le son gagne considérablement en intensité quand le corps sonore est en contact, ou même dans le voisinage d'un autre corps capable d'entrer en vibration avec lui. Par exemple, une corde tendue dans l'air, loin d'un corps sonore, rend un son bien moins

fort, lorsqu'on la fait vibrer, que si elle est tendue au-dessus d'une caisse remplie d'air, comme la guitare, le violon, la basse, etc. C'est par cette raison que les anciens plaçaient sur leurs théâtres des vases d'airain résonnants, destinés à renforcer la voix des acteurs; d'autres vases étaient, dans le même but, encastrés dans les murs.

#### APPLICATIONS DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS. — TUBES ACOUSTIQUES.

— PORTE-VOIX. — CORNETS ACOUSTIQUES. — Si, au moyen de tuyaux

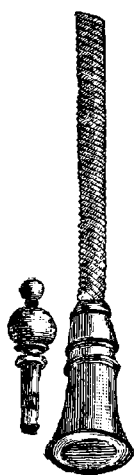


Fig. 356.

TUBES  
ACOUSTIQUES.

allongés, on prévient l'écartement des ondes sonores, la force des vibrations, n'ayant point à agir sur des couches d'air de plus en plus étendues se conserve donc, pour ainsi dire, sans s'affaiblir. Le son peut alors se transmettre à de très grandes distances, sans rien perdre sensiblement de son intensité. Des expériences faites dans l'aqueduc d'Arcueil, de la longueur de 951 mètres, ont prouvé que les mots dits à l'une de ses extrémités, aussi bas que possible, comme quand on se parle à l'oreille, étaient distinctement entendus par l'observateur placé à l'autre extrémité. C'est un des principes sur lesquels sont établis les *tubes acoustiques* (*speaking tube*), dont on se sert dans les administrations et dans les maisons de commerce, pour transmettre, sans se déplacer, les ordres d'un étage à l'autre ou recevoir les renseignements dont on a besoin. Ce sont ordinairement des tubes cylindriques et flexibles de caoutchouc (*fig. 356*) terminés par une embouchure évasée, dans laquelle on emboîte un sifflet. Pour avvertir, on souffle dans le tube, afin que la personne, avertie par le son du sifflet, place son oreille à l'orifice du tube. Quand elle a indiqué qu'elle écoutait, la conversation s'engage, sans que personne entende ce que disent les causeurs.

Dans son *Acoustique*, M. Radan rappelle une application amusante des tubes acoustiques :

« La *femme invisible* qui excita, au commencement de ce siècle, une si grande sensation dans les principales villes du continent, s'explique d'une manière fort simple. L'organe le plus apparent de cette machine (*fig. 357*) était une sphère creuse, munie de quatre appendices en forme de trompettes, et suspendue librement à un support de fil de fer, ou bien au plafond de la chambre par quatre rubans de soie. Cette sphère était entourée d'une cage de treillis soutenue par quatre piliers, dont l'un était creux et communiquait avec le sol. Le tube acoustique qui le traversait débouchait au milieu de l'une des traverses horizontales supérieures, où

il y avait une fente très étroite, à peine perceptible à l'œil, faisant face à l'orifice de l'une des quatre trompes. La voix semblait alors sortir de la sphère. Il est probable que la personne qui se tenait dans la pièce voisine, et qui donnait les réponses, pouvait voir, par une fente dans le mur, ce qui se passait dans la salle. Les demandes se faisaient en parlant dans l'orifice de l'une de ces trompes. »

Le *porte-voix* (fig. 358), qui consiste en une espèce de cône mé-

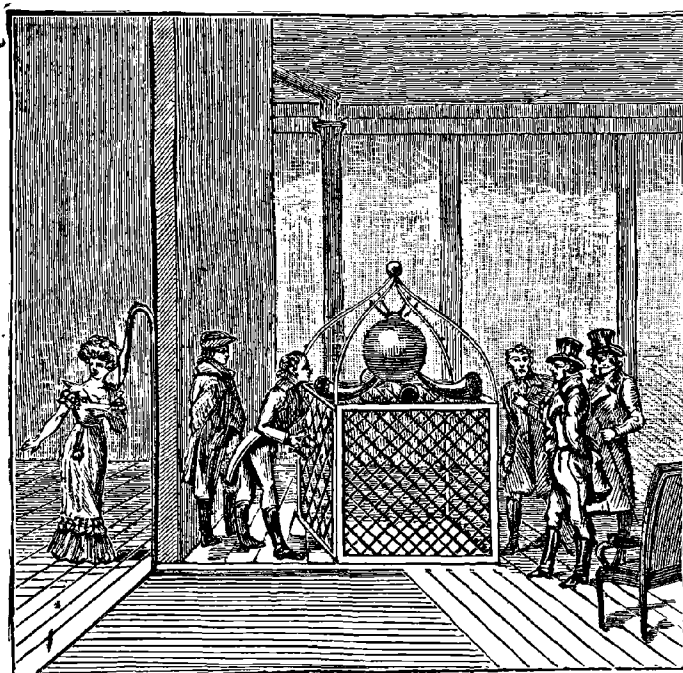


Fig. 357. — LA FEMME INVISIBLE.

tallique creux et qui est destiné à transmettre la voix à de grandes distances, et le *cornet acoustique*, dont font usage les personnes qui ont l'ouïe dure, sont des instruments fondés sur la réflexion des ondes sonores et sur la conductibilité des tuyaux cylindriques. Dans les porte-voix dont on fait particulièrement usage à bord des navires, l'air, poussé par la bouche, est non seulement maintenu dans le tube, mais encore de chaque point du tube, à cause de la forme conique de l'instrument, il se forme des ondes sphériques qui, après s'être réfléchies sur les parois, reviennent parallèlement à l'axe, ce qui multiplie le nombre des impulsions dans le même sens et détermine un ébranlement énergique dans la direction de l'axe du porte-voix.

Samuel Morland (1) et le P. Kircher s'attribuent respectivement l'invention du *porte-voix*, qui était cependant connu chez nous dès 1545. Des voyageurs, qui visitèrent la Chine dans le IX<sup>e</sup> siècle, disent qu'on s'y servait d'une sorte de trompette, qui portait la voix à une grande distance. Cet instrument remonterait même à une haute antiquité; si l'on peut donner le nom de porte-voix à une espèce de trompette à l'aide de laquelle Alexandre le Grand rassemblait son armée et lui donnait ses ordres et qui portait la voix, dit-on, à cent stades (16 kilomètres) (*fig.* à la page 769).



Fig. 358. — PORTE-VOIX  
ET CORNETS ACOUSTIQUES.

Pour se faire entendre le plus fortement possible avec le porte-voix, il faut prendre un ton tel que la colonne d'air qu'il renferme puisse former des vibrations selon sa forme et sa longueur; car si le ton dans lequel on parle n'est pas un de ceux que le porte-voix peut admettre, les vibrations de l'air ne s'y feront pas avec autant de régularité, et ne s'entreteniront pas avec autant de constance que si cette harmonie était exactement observée.

Un porte-voix de 1 mètre porte aisément le son à 800 mètres; de 6 mètres, à 2,560 mètres; de 8 mètres, à 4,000 mètres. On distingue à bord des vaisseaux plusieurs sortes de porte-voix: le plus usité est le *braillard*, qui sert aux manœuvres ordinaires d'un bâtiment; celui qu'on appelle *gueulard* et qui s'allonge à volonté, comme une lunette, sert à transmettre la parole d'un navire à un autre: le *porte-voix de combat* est à demeure sur le pont et descend verticalement dans les batteries. Les bateaux à vapeur ont aussi un porte-voix vertical pour communiquer les ordres au mécanicien.

Le *cornet acoustique* (*fig.* 358) est comme la contre-partie du porte-voix. La petite ouverture du cornet étant placée dans l'oreille de la personne qui écoute, l'autre extrémité, terminée en pavillon, reçoit les sons venant de la bouche de la personne qui parle. Ces sons, réfléchis par les parois intérieures du cornet, vont se concentrer dans le tuyau de l'oreille.

(1) MORLAND (Samuel), physicien anglais (1625-1695). Après avoir rempli sous Cromwell plusieurs missions politiques, il reçut de Charles II le titre de baronnet. Il quitta alors la scène politique, et s'occupa de mécanique et de physique. Nous avons déjà parlé de lui (pages 256 et 659). Vers la fin de sa vie, il devint aveugle et mourut dans la misère.

**ACOUSTIQUE DES SALLES.** — Nous avons dit ci-dessus que, pour qu'il y ait écho, le corps réflecteur devait être à plus de 17 mètres ; que, s'il est à une distance moindre, il y a *résonance*. Le son qui revient à l'oreille prolonge l'impression ; il y a même renforcement de l'impression directe pendant tout le temps qu'elle accompagne l'impression réfléchie. Cela est en général avantageux, disons-nous ; ce qui est généralement nuisible, c'est le prolongement de l'impression au delà d'une certaine durée, ou l'absence de cette résonance. Aussi le problème de la sonorité des salles de théâtre, de concert, de cours publics, etc., est-il si compliqué qu'il n'a pu encore être définitivement résolu, dit M. de Parville : il est bien facile d'en montrer les principales difficultés.

Quand on parle dans une salle dont nous supposons momentanément les murs nus, le son se répand dans toutes les directions ; il s'en va en ligne droite jusqu'aux oreilles d'un auditeur ; mais il s'en va heurter aussi les murs en avant, en arrière, sur les côtés, en haut, en bas, de toutes parts, en un mot. Le son se réfléchit, et les nouvelles ondes vont s'entre-croisant dans l'espace ; quelques-unes reviennent à l'oreille de l'auditeur un peu affaiblies, et en retard sur les ondes directes, puisqu'elles ont fait un plus long chemin. Si le chemin est court, le son réfléchi reviendra à l'oreille avant que le son direct soit éteint, et le renforcera en le prolongeant. Cette *résonance* s'observe très bien dans certaines circonstances. Quand on est en bateau à vapeur, on entend un grand bruit au moment où il passe près d'une pile de pont, qui renvoie le son que font les roues en frappant l'eau.

Lorsque la salle n'est pas très grande, la résonance ne peut être qu'utile à l'audition ; si la pièce est vaste, le chemin parcouru par l'onde de retour étant appréciable, le renforcement du son se traduira surtout par une prolongation ; l'onde de retour ne coïncidant plus du tout avec l'onde directe, l'audition deviendra confuse ; la parole manquera de netteté. Tout le monde a remarqué les particularités que présente le son dans les grandes églises : les moindres bruits se répercutent sous les voûtes, la voix cesse d'être distincte. Lorsqu'enfin la salle est extrêmement vaste, les ondes sonores réfléchies ne parviennent plus à l'oreille qu'un certain temps après les ondes directes. On entend le même son une ou plusieurs fois ; il y a écho.

Le renforcement des sons, leur répétition, leur absorption par les corps non élastiques, telle est donc la cause des différences de sonorité d'une salle. On conçoit bien que, théoriquement, on puisse, comme l'a fait M. Sax, projeter une salle dans laquelle les ondes sonores soient ramenées vers les auditeurs par des surfaces réfléchissantes convenables.

Mais, alors que la réflexion satisfaisante des ondes serait bien obtenue, il est difficile d'avance de répondre des résonances, des absorptions, des changements de timbre dépendants de la nature même de la matière réfléchissante. Tel spectateur, par exemple, est placé à une distance convenable des murs pour qu'il n'y ait pas renforcement; mais alors comment entendra celui qui est plus éloigné que lui? Ici pas de résonance, là un renforcement exagéré, à côté une extinction du son. Comment vibrera telle muraille, cette masse d'air voisine des ouvertures? A droite, on entend merveilleusement; au fond, la sonorité est trop bruyante. On peut espérer réussir, mais il est impossible d'affirmer le succès.

On a trouvé dernièrement un procédé très singulier et très efficace de modifier la sonorité des salles. La cathédrale de Saint-Fin-Barre, à Cork (Irlande), était tellement sonore qu'il était à peu près impossible de s'y faire entendre. Il fallait à tout prix arrêter en route les sons réfléchis qui gênaient l'audition des sons directs. On essaya de tendre un certain nombre de fils fins à 6 ou 8 mètres au-dessus du sol entre les murs de la nef. Ces quelques obstacles à peine visibles transformèrent l'acoustique de la cathédrale. Le même procédé fut employé aussi efficacement dans d'autres églises, et particulièrement à l'église de Notre-Dame-des-Champs, à Paris, sur le boulevard Montparnasse.

La construction de la salle des Fêtes, au palais du Trocadéro, avait soulevé deux questions intéressantes. Nous avons dit (page 472) le nouveau système de ventilation adopté par les architectes; il fallait en second lieu se préoccuper de distribuer le son aussi uniformément que possible, en évitant les échos dans une enceinte aussi vaste (*fig.* à la page 777). MM. Davioud et Bourdais ont appliqué habilement les données de la science acoustique. On a tapissé les murailles d'une bourre de soie de 6 millimètres d'épaisseur, dans le but d'absorber toutes les ondes sonores venant heurter l'enceinte, d'anéantir toute la force vive nuisible à l'acoustique de la salle. Dans un vaisseau aussi grand, dépourvu de tout renforcement, on pouvait craindre que les sons directs manquaient d'intensité. N'entendrait-on pas imparfaitement de certaines parties de la salle? Les architectes ont cherché à distribuer le plus également possible le son dans toutes les parties à l'aide d'un système de renforcement du son tout nouveau.

Les sons émis s'en vont frapper naturellement les murs et le plafond de la scène comme les autres parties de la salle. On n'a pas éteint ces ondes sonores, on les utilise. On a construit le fond et le plafond de la scène de façon que chacun de leurs points se trouve à une distance du principal soliste inférieure à 17 mètres. Le son, après avoir frappé le fond

de la scène, revient donc à l'oreille d'un auditeur quelconque avant que le son direct soit éteint. Il y a renforcement, il n'y a pas écho. Le plafond surtout devient un réflecteur de son très efficace. MM. Davioud et Bourdais ont formé leur plafond d'une série de petits plans réflecteurs juxtaposés qui, par leur rapprochement, ont constitué une voûte aux propriétés acoustiques remarquables. L'épure de la voûte a été faite d'abord de façon à renvoyer dans toutes les parties de la salle la même quantité de rayons réfléchis, puis corrigée de manière à en renvoyer sur les places les plus éloignées des quantités de plus en plus grandes. La voûte forme, en définitive, une sorte de porte-voix auquel on a donné le nom de *conque sonore*. Le succès de cette combinaison n'est pas discutable. On entend aussi distinctement à l'amphithéâtre qu'aux fauteuils. La voix porte au loin avec une rare netteté. L'extinction des sons semblait, dans les premiers temps, avoir été moins bien remplie. Quand les sons atteignaient une grande intensité, quand on donnait un coup de tam-tam ou de grosse caisse, il y avait résonance marquée et même écho. Ce défaut a disparu. La bourre de soie appliquée sur les murs encore humides s'était tassée, avait fait corps avec le plâtre et n'éteignait pas les sons assez complètement, quand ils devenaient intenses ; mais, aujourd'hui, ce vice d'aménagement a été corrigé et le problème d'acoustique a été résolu à la satisfaction générale.

## CHAPITRE II

### DU SON MUSICAL

**QUALITÉS DU SON MUSICAL.** — Nous avons dit que le *son musical* est le résultat de vibrations continues, rapides et isochrones, produisant sur l'organe de l'ouïe une sensation prolongée ; il peut toujours être comparé avec d'autres sons, et on peut trouver son unisson, ce qui est impossible avec un bruit, tel que le claquement d'un fouet ou la détonation d'une arme à feu.

Dans le son musical, on distingue trois qualités : 1° la *hauteur* ou *tonalité* ; 2° l'*intensité* ; 3° le *timbre*.

La *hauteur* est l'impression produite sur l'organe auditif par le plus ou moins grand nombre de vibrations exécutées par le corps sonore dans

un temps donné. Plus ce nombre est grand, plus le son est *aigu*; plus ce nombre est petit, plus le son est *grave* ou *bas*. La gravité ou l'acuité des sons n'est que relative : tel son, grave comparativement à un autre, peut être aigu par rapport à un troisième. Deux sons correspondant à un même nombre de vibrations sont dits à *l'unisson*. L'*intensité* est la force avec laquelle l'organe de l'ouïe se trouve impressionné; elle dépend de l'amplitude des vibrations, et non de leur nombre. Un même son peut rester également grave ou aigu et acquérir ou perdre de son intensité, selon que les vibrations du corps sonore seront plus ou moins étendues. Nous avons vu (page 760) les différentes causes qui font varier l'intensité d'un son. Le *timbre* est cette qualité qui fait que, différents instruments produisant le même son grave ou aigu, on reconnaît parfaitement ces instruments l'un de l'autre. Ainsi, qu'une flûte et un violon donnent le même son, on distinguera facilement le son de la flûte et le son du violon. C'est ainsi que l'on reconnaît une personne au son de la voix. La cause du *timbre* n'est pas bien connue : elle dépend, paraît-il; non seulement de la matière dont sont faits les instruments, mais encore de leur forme.

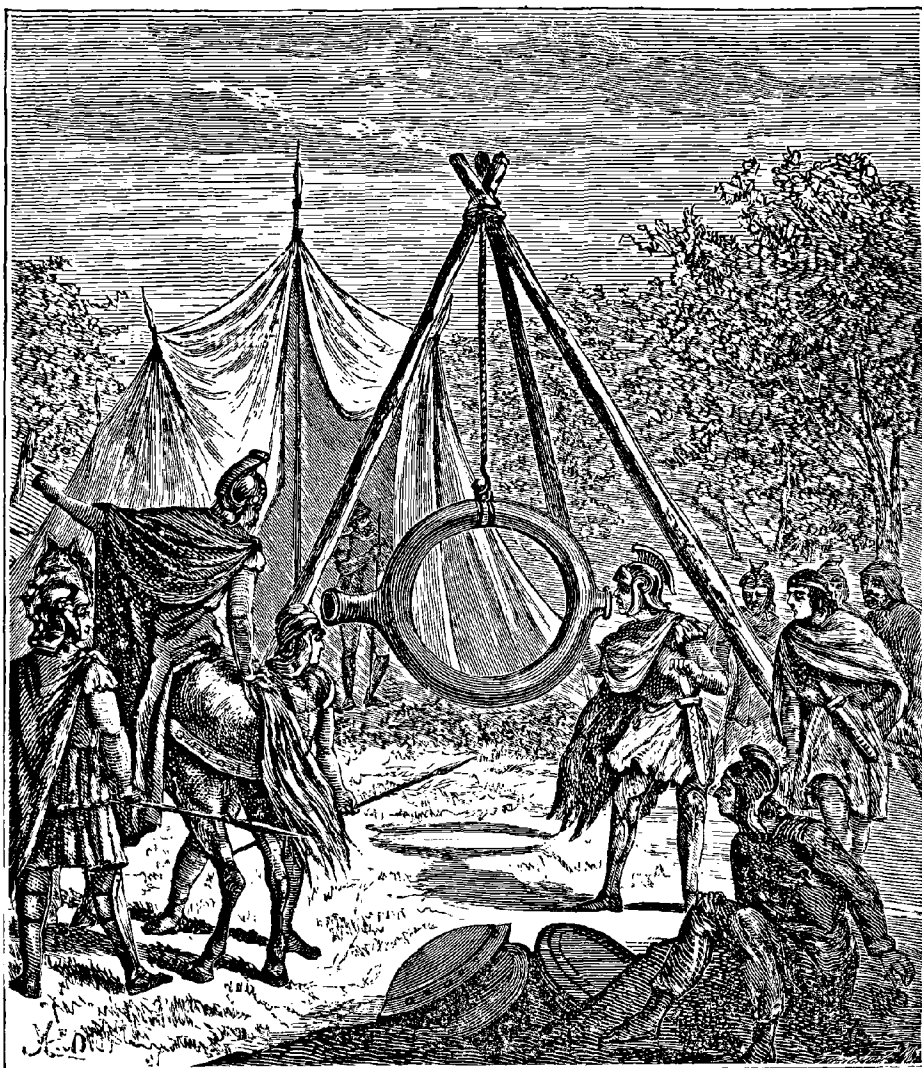
**ACCORDS. — INTERVALLES.** — On appelle *accords* la coexistence de plusieurs sons qui causent à l'ouïe une sensation agréable. Si, au contraire, cet organe est désagréablement affecté, on dit qu'il y a *dissonance*.

Un *intervalle* est le rapport d'un son à un autre, c'est-à-dire le rapport entre les nombres de vibrations qui constituent ces sons, soit  $\frac{n'}{n}$ , cet autre son étant toujours supérieur à  $n$ ; c'est-à-dire étant plus aigu. Comme une fraction ne change pas quand on multiplie ou quand on en divise les deux termes par un même nombre, on voit que les *intervalles* ne dépendent pas du nombre absolu des vibrations, mais seulement du nombre relatif. Lorsque l'oreille peut facilement découvrir le rapport entre deux sons, c'est-à-dire toutes les fois que ce rapport  $\frac{n'}{n}$  est simple, il y a *consonance*. Les intervalles les plus agréables à l'oreille sont les suivants :

$$\begin{array}{l} \frac{n'}{n} = 1, \text{ c'est l'unisson.} \\ \text{Les nombres des vibrations} \\ \text{sons égaux.} \\ \frac{n'}{n} = \frac{2}{1} \text{ — octave.} \\ \text{Le nombre des vibrations d'un} \\ \text{son est double de celui de} \\ \text{l'autre son.} \end{array} \left| \begin{array}{l} \frac{n'}{n} = \frac{5}{3} \text{ — sixte.} \\ \frac{n'}{n} = \frac{3}{2} \text{ — quinte.} \\ \frac{n'}{n} = \frac{4}{3} \text{ — quarte.} \end{array} \right. \left| \begin{array}{l} \frac{n'}{n} = \frac{5}{4} \text{ — tierce majeure.} \\ \frac{n'}{n} = \frac{6}{5} \text{ — tierce mineure.} \end{array} \right.$$



**SONS HARMONIQUES.** — On appelle ainsi, ou simplement *harmoniques*, les sons formés par des nombres de vibrations qui sont entre eux comme la série ordinaire des nombres entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6. La superposition



Cor d'Alexandre (page 764).

de deux de ces sons donne un accord d'autant plus *consonant* qu'ils sont plus bas dans la série. En effet, le second harmonique est l'octave du premier ; le troisième, qui équivaut à  $\frac{3}{2} \times 2$ , est sa double quinte ; le qua-

trième  $2 \times 2$  est sa double octave, et le cinquième, qui peut s'écrire  $\frac{5}{4} \times 4$ , est sa quadruple tierce. Les harmoniques donnent donc toujours des accords, quel que soit le nombre avec lequel on les désigne. En étudiant ci-après les vibrations des cordes et des tubes sonores, nous aurons à parler des *harmoniques*.

**ÉCHELLE MUSICALE. — GAMME.** — L'*échelle musicale* est une succession de sons séparés entre eux par des intervalles qu'une expérience, qui remonte sans doute à l'origine du monde, a fait utiliser. Comme, dans cette série, les sons se reproduisent dans le même ordre par périodes de sept, chaque période se désigne sous le nom de *gamme*, et les sept sons ou notes sont : *ut* ou *do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*.

Ce mot *gamme* vient de la lettre grecque  $\gamma$  (gamma), qui désignait la note du *la* grave du violoncelle, par laquelle commençait la série des notes employées dès l'antiquité, A, B, C, D, E, F, G. On prit le *gamma* pour ne pas troubler l'ordre des lettres établi, et l'on donna à la série elle-même le nom de *gamme*. Ce ne fut que vers l'an 1020 que l'on remplaça les lettres par les points et que l'on donna aux notes les noms qu'elles portent encore aujourd'hui. Guy d'Arezzo, moine bénédictin de Ferrare, qui s'occupait de musique, passe pour l'auteur de cette innovation. Les noms adoptés sont les syllabes initiales de l'hymne de saint Jean-Baptiste, qu'il faisait chanter à ses écoliers :

*Ut queant laxis Resonare fibris*  
*Mira gestorum Famuli tuorum,*  
*Solve polluti Labii reatum,*  
Sancte Johannes.

Mais cette échelle de notation ne se compose que de six noms : ce fut, dit-on, vers 1684, qu'un nommé Lemaire ajouta le *si* à ceux de Guy d'Arezzo. En 1338, le chanoine de Paris, Jean de Muris, imagina d'exprimer les modifications de la durée par des changements dans la forme des points, qui tous jusqu'alors indiquaient une même durée, et il inventa les blanches, les noires, les croches, etc. J.-J. Rousseau, et plus tard, Galin, Wilhem, essayèrent de remplacer les notes par des chiffres ; mais celles-là ont généralement prévalu.

En mesurant, au moyen d'instruments dont nous parlons ci-après (page 776), le nombre de vibrations que donnent les sept notes de la gamme, et en représentant le son le plus grave, l'*ut* fondamental, par

1, on a trouvé que les nombres respectifs de vibrations correspondant à ces notes étaient représentés par les fractions suivantes :

ut	ré	mi	fa	sol	la	si
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

L'échelle musicale ne s'arrête pas là ; cette gamme est suivie d'autres gammes ascendantes ou descendantes, commençant chacune par l'*ut* qui termine ou commence la gamme précédente, et une note quelconque de chaque gamme suivante est produite par un nombre de vibrations double ou moitié moindre de celui qui produit la note correspondante de la gamme précédente.

Les fractions ci-dessus représentent non seulement les nombres de vibrations relatives à l'*ut* fondamental, mais encore les intervalles des six dernières notes par rapport à la première. En cherchant donc les intervalles entre deux notes consécutives, on a :

ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	2

On voit que les intervalles différents entre les sept notes de la gamme se réduisent à trois qui sont :  $\frac{9}{8}$ ,  $\frac{10}{9}$  et  $\frac{16}{15}$ . Le premier, qui est le plus considérable, se nomme *ton majeur* ; le second, *ton mineur*, et le troisième *demi-ton majeur*.

De là on conclut que, lorsqu'un intervalle entre deux sons est  $\frac{9}{8}$  ou  $\frac{10}{9}$ , il y a un *ton* entre ces deux sons ; et, si l'intervalle est de  $\frac{16}{15}$ , il existe un *demi-ton*. La gamme comprend donc cinq tons et deux demi-tons. L'intervalle entre le ton majeur et le ton mineur est  $\frac{81}{80}$  ; c'est le plus petit de tous, on le désigne sous le nom grec de *comma* ; il est généralement négligeable en musique, car il faut une oreille très exercée pour l'apprécier. On nomme une *seconde* l'intervalle de *do* à *ré* ; une *tierce*, celui de *do* à *mi* ; une *quarte*, de *do* à *fa* ; une *quinte*, de *do* à *sol* ; une *sixte*, de *do* à *la* ; une *septième*, de *do* à *si* ; une *octave*, d'un *do* au *do* supérieur. La gamme dont nous venons d'indiquer les rapports des vibrations est dite *gamme*

*diatonique*; celle qui procède par demi-tons, et qui ainsi se compose de 13 tons, est dite *gamme chromatique*.

Les musiciens intercalent, en effet, entre les notes de la gamme d'autres notes intermédiaires que l'on désigne sous le nom de *dièses* et de *bémols*. *Diéser une note*, c'est augmenter le nombre de ses vibrations dans la proportion de  $\frac{25}{24}$ ; la *bémoliser*, c'est diminuer ses vibrations de  $\frac{24}{25}$ . On représente le dièse par le signe  $\sharp$  et le bémol par  $\flat$ . L'intervalle est désigné sous le nom de *demi-ton mineur*.

**ACCORDS PARFAITS.** — Nous avons fait remarquer que les consonances correspondent à des rapports de nombres de vibrations relativement simples. Ces rapports sont les plus simples possibles dans ce que l'on appelle l'*accord parfait* : c'est l'accord normal d'où procèdent tous les autres. Quand les nombres des vibrations de trois sons effectués pendant le même temps sont entre eux dans le même rapport que les nombres 4, 5, 6, ils constituent un *accord parfait majeur*. Si ces nombres sont dans le même rapport que les nombres 10, 12, 15, il y a *accord parfait mineur*. Dans les accords parfaits, la note la plus grave est la *tonique*, la plus aiguë est la *dominante*. L'accord parfait a pour fondement les premières divisions du *monocorde*, c'est-à-dire d'une corde tendue qui donne un son déterminé, par exemple, *ut*. Si l'on divise cette corde par la moitié, on obtient l'*ut* à l'*octave supérieure*; son quart donne l'*ut* à la *double octave*; son tiers le *sol* à la douzième (douzième degré); le cinquième, le *mi* à la dix-septième; le sixième, le *sol octave du tiers*; le septième, un *si* à la vingt et unième; le huitième, un *ut* à la *triple octave*, et le neuvième, un *ré* à la vingt-troisième; ce qui représente une suite de tierces, et donne tous les sons dont se forme l'accord le plus compliqué.

**DIAPASON.** — La rigidité des verges d'acier les rend propres à conserver, sans altération sensible, le son qu'elles peuvent donner en raison de leurs dimensions. C'est à cause de cela que les personnes qui veulent mettre d'accord les notes d'un instrument de musique se servent fréquemment du *diapason*. Ce mot (du grec *dia*, à travers, *pasón*, toutes choses, passe-partout) désignait primitivement chez les Grecs, d'après Pythagore, les *octaves*; parce que les sons ainsi engendrés à l'octave ne changeaient rien à la mélodie d'un air, soit qu'on les fit entendre simultanément, soit successivement. C'est aujourd'hui le nom qui désigne l'étendue d'une voix ou d'un instrument, c'est-à-dire la série de notes que cette voix ou

cet instrument peut faire entendre : chaque voix, chaque instrument a son diapason particulier. Plus spécialement, on appelle *diapason* un petit instrument composé d'une tige d'acier à deux branches courbées en U et disposées de manière à faire résonner, lorsqu'on écarte brusquement ses branches au moyen d'un cylindre de fer passé de force entre elles (*fig. 359*), un son conventionnel sur lequel on règle l'accord de tous les instruments de musique. Ce son est le *la* (la deuxième corde du violon, en commençant par la chanterelle). Une branche du diapason doit, en France, d'après un décret du 16 février 1859, exécuter 435 vibrations ; en Allemagne, le *la* est de 440 vibrations ; en Angleterre de 442. Lorsqu'on fait vibrer le *diapason*, il se produit un son suraigu qui s'éteint assez vite ; c'est un *harmonique* supérieur, formant d'ailleurs avec le son principal une *dissonance* marquée. Quant au son principal, qui est celui dont a besoin l'accordeur, il persiste longtemps après l'autre, et c'est pour empêcher la production de ce son suraigu, autant que pour renforcer le son, que l'on monte le diapason sur une boîte de résonance, car le désaccord de ce son avec les harmoniques mêmes de la masse d'air le détruit.

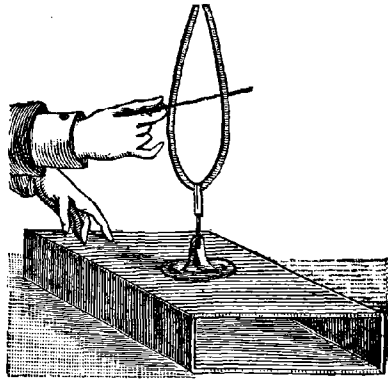


Fig. 359. — DIAPASON.

#### NOTATION DES GAMMES. — NOMBRE ABSOLU DES VIBRATIONS. —

Le nombre de vibrations qui correspondent au *do* fondamental d'une gamme pouvant être pris arbitrairement, on a choisi, pour point de départ de toutes les autres notes, le *do*, le son le plus grave de la contrebasse, et l'on est convenu de distinguer, en physique, les notes des gammes plus aiguës de la première gamme par un petit chiffre placé au-dessous de la note, et celles plus graves par un petit chiffre précédé du signe *moins* (—). Ainsi  $fa_2$  est à l'octave au-dessus de  $fa_1$ , et  $fa_{-2}$  est à l'octave au-dessous de  $fa_1$ .

La connaissance de la valeur des intervalles permet d'estimer exactement le rapport des nombres de vibrations de deux sons donnés ; d'où il suit que, si le nombre absolu de vibrations de l'un des deux sons est connu, on peut en déduire le nombre de vibrations du second. Ainsi, on sait que 870 vibrations simples, ou 435 doubles, représentent, d'après le diapason normal  $la_2$ . En conséquence, puisque 1 et  $\frac{5}{3}$  sont les nombres de

vibrations correspondantes au *do* et au *la*, si l'on représente par  $n$  le nombre de vibrations de *do*<sub>3</sub>, nous aurons  $n \times \frac{5}{3} = 435$ ; d'où  $n = 261$  vibrations doubles. Connaissant *do*<sub>3</sub>, on obtiendra le nombre des vibrations de *re*<sub>3</sub>, *mi*<sub>3</sub>, *fa*<sub>3</sub>, etc., en multipliant 261 par  $\frac{9}{8}$ ,  $\frac{5}{4}$ ,  $\frac{4}{3}$ .

On aura ainsi : *do* - , =  $130 \frac{1}{2}$ , et *do*<sub>1</sub> =  $65 \frac{1}{4}$ .

**GAMME TEMPÉRÉE.** — Nous avons dit (page 771) que le *comma*, c'est-à-dire la différence d'un intervalle représenté par  $\frac{81}{80}$ , était généralement négligeable, et que la gamme accordée au moyen de l'artifice du *tempérament* répondait aux exigences de l'oreille. Lorsque les instruments ne se composaient, comme jadis, que d'un très petit nombre de cordes, ce *tempérament* était inutile : on pouvait les accorder sans altérer les intervalles des sons. Mais depuis que, par suite du perfectionnement des instruments, les sons successifs doivent comprendre, comme dans le piano, plusieurs octaves, il est devenu très difficile, presque impossible dans les transpositions, de les accorder sans admettre un *tempérament*. C'est pourquoi les musiciens, pour accorder leurs instruments, ont adopté une méthode qui consiste à altérer les quintes en montant jusqu'à ce qu'on arrive à un *mi* qui fasse juste la tierce majeure de l'*ut* ; à altérer les quintes en descendant jusqu'à ce que le *ré* bémol fasse quinte avec le *sol dièse*, etc. Chaque note ayant son dièse et son bémol, l'octave se compose rigoureusement de vingt et un tons. Or, pour éviter toute complication inutile, l'octave ne se compose en réalité que douze demi-tons, formant la gamme chromatique. La gamme ainsi modifiée se nomme la *gamme tempérée*. Elle n'est plus *absolument* juste, puisque, à l'exception des octaves, tous les intervalles ont subi une altération.

Voici le nombre absolu de vibrations des diverses notes dans la gamme naturelle et dans la gamme tempérée :

NOTES.	Nombre de vibrations par seconde.		NOTES.	Nombre de vibrations par seconde.	
	Gamme naturelle.	Gamme tempérée.		Gamme naturelle.	Gamme tempérée.
Ut.....°	517,3	517,3	Sol.....	776,0	775,1
Ré.....	582,0	580,7	La.....	862,2	870,0
Mi.....	646,6	651,8	Si.....	970,6	976,5
Fa.....	689,7	690,5	Ut.....	1034,6	1034,6

Quelque petites que soient les différences indiquées dans ce tableau, deux physiciens contemporains, MM. Cornu et Mercadier, qui se sont livrés à des recherches savantes sur ce point de l'acoustique, ont prouvé que l'oreille est beaucoup plus sensible que l'on ne croit, et que, dans des circonstances favorables, l'organe auditif peut apprécier parfaitement la différence de 1 vibration sur 1,000, ce qui constitue un intervalle environ 10 fois plus petit que le *comma*  $\frac{81}{80}$ .

**LONGUEUR DES ONDES SONORES.** — En connaissant le nombre absolu de vibrations que fait un corps sonore en une seconde, il est facile de déduire quelle est la longueur des *ondes*. On sait, en effet, qu'à la température de 10°, le son parcourt 333 mètres par seconde : donc, si un corps ne donne qu'une vibration double en cet espace de temps, l'onde sonore sera de 333 mètres ; s'il en donne deux, l'onde sera de la moitié de 333 mètres ; s'il en donne trois, elle sera du tiers de 333 mètres, et ainsi de suite. C'est dire que *la longueur d'une onde sonore est le quotient de la vitesse du son divisée par le nombre de vibrations complètes*, en se rappelant que, quel que soit le ton, la vitesse est la même pour les sons graves et pour les sons aigus.

**LIMITES DES SONS MUSICAUX.** — L'échelle des sons est évidemment indéfinie dans les deux sens ; mais il arrive un moment où les sons deviennent trop graves ou trop aigus pour être perceptibles à l'oreille. En procédant de proche en proche, on a pu réussir à évaluer des sons s'élevant jusqu'à 72,000 vibrations par seconde, ou à 10 à 12 seulement pour les sons graves. En musique, les sons les plus graves sont ceux des tuyaux d'orgue bouchés de 5 mètres de longueur, correspondant à 32 vibrations par seconde ; pour les sons aigus on ne dépasse guère la triple octave du *la* du diapason, ce qui donne 6,960 vibrations par seconde. La voix humaine varie selon les organisations, mais ne dépasse guère, chez un individu, deux octaves. Sauf quelques voix exceptionnelles, la voix humaine s'étend du *fa* inférieur de la basse (*fa*<sub>1</sub>) de 174 vibrations au *sol* supérieur du soprano (*sol*<sub>4</sub>), de 1,550 vibrations par seconde environ.

## CHAPITRE III

## ÉVALUATION NUMÉRIQUE DES SONS

**SIRÈNE.** — Un grand nombre d'appareils ont été inventés pour mesurer le nombre des vibrations correspondant à un son donné. Les principaux sont la *sirène*, la *roue dentée de Savart*, le *vibroscope de Duhamel*, le *phonautographe de Scott*, etc.

La *sirène*, inventée par M. Cagnard de Latour (1), en 1809, doit son nom à la propriété qu'elle a de pouvoir

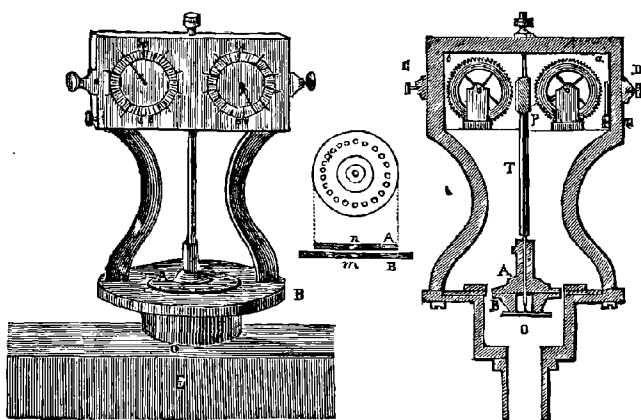


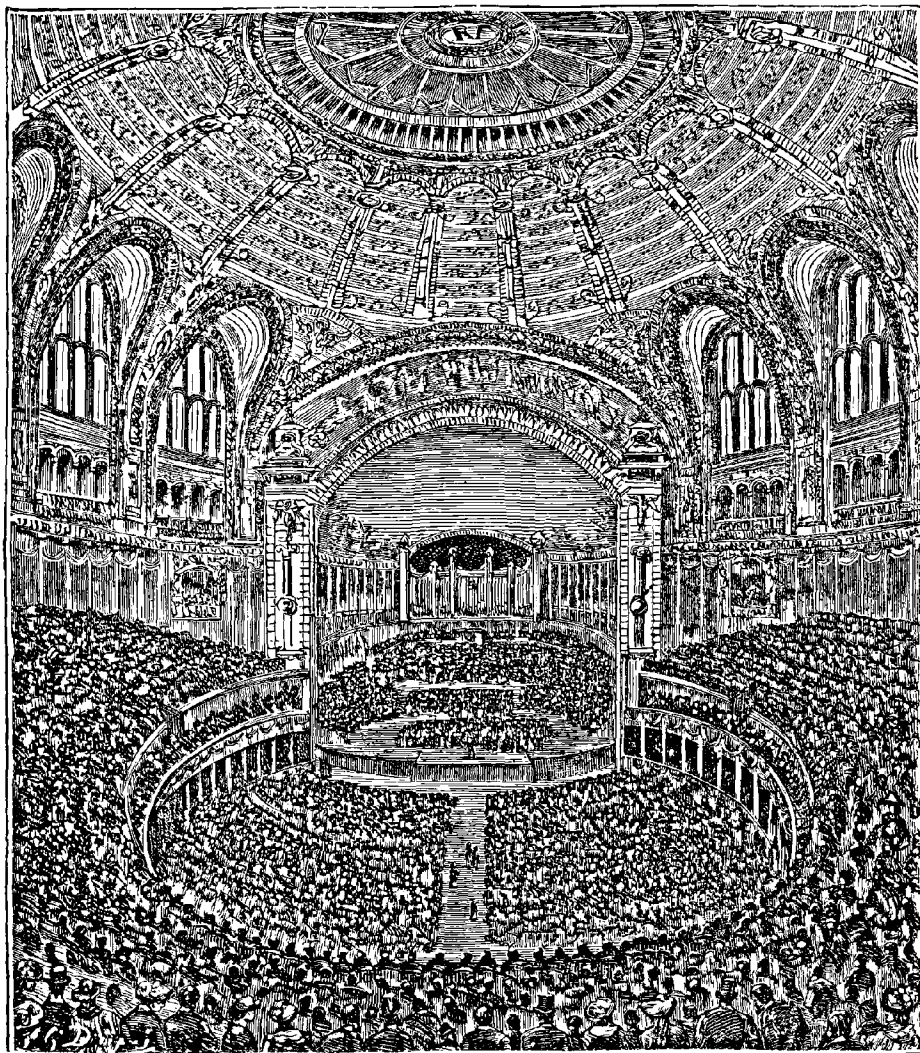
Fig. 360. — SIRÈNE.

rendre des sons au sein d'une masse liquide. Cet instrument, tout en cuivre, se compose (*fig. 360*) d'une boîte dans laquelle sont placés des soufflets destinés à faire passer un courant d'air dans l'instrument. La partie inférieure est un cylindre O, surmonté d'un plateau fixe B, dans lequel aboutit un tube vertical T, sur lequel s'applique un disque A qui tourne librement avec lui. Ce plateau B est percé d'ouvertures circulaires équidistantes, et le disque A est aussi percé d'ouvertures de même diamètre et à la même distance du centre que celles du plateau. Ces ouvertures ne sont pas perpendiculaires au plan du plateau et du disque, mais toutes présentent une inclinaison identique, dans le sens opposé au courant d'air, de sorte que deux d'entre

(1) CAGNARD DE LATOUR (Charles, baron), savant physicien français (1779-1859), membre de l'Académie des sciences. On lui doit de remarquables travaux de mécanique.



elles, en face l'une de l'autre, sont disposées comme en  $mn$ . Il résulte de là que, lorsqu'un courant d'air rapide passe du soufflet à travers le cylindre jusqu'à l'orifice  $m$ , il frappe obliquement les parois de  $n$



La salle des Fêtes, au palais du Trocadéro (page 766).

et donne au disque A un mouvement de rotation dans le sens  $nA$ .

Pour rendre plus claire l'explication du jeu de la *sirène*, supposons un instant que le disque mobile A ait vingt ouvertures, et qu'il n'y en ait qu'une seule au plateau B, et considérons le moment où celle-ci coïncide

avec une de celles de A. Comme le courant d'air du soufflet frappe obliquement les parois de cette dernière ouverture, et communique au disque un mouvement de rotation, pendant lequel l'ouverture du plateau B se trouve en face de la partie pleine du disque A, en continuant à tourner, cette ouverture de B rencontrera une autre ouverture de A, et ainsi de suite. Il en résultera une série d'écoulements d'air et d'arrêts qui feront entrer l'air en vibration, et qui finiront par produire un son lorsque le mouvement de rotation du disque sera devenu rapide. Le passage de l'air sera vingt fois interrompu pendant une révolution du disque ; on aura, par conséquent, vingt vibrations complètes pour chaque révolution. Si nous supposons maintenant que le plateau fixe B ait vingt ouvertures, comme le disque mobile A, chacune d'elles produira un effet égal à celui produit par une seule ; le son sera vingt fois plus intense, mais le nombre des vibrations ne sera pas changé : il restera de vingt par seconde.

Pour connaître le nombre de vibrations correspondant au son que donne l'appareil pendant son mouvement de rotation, il faut calculer le nombre de tours qu'a faits, en chaque seconde, le disque A, et multiplier le résultat obtenu par vingt, puisque chaque tour engendre vingt vibrations. A cette fin, le tube vertical T porte une vis sans fin, au moyen de laquelle le mouvement est communiqué à une roue de cent dents  $a$ , qui avance d'une dent pour chaque révolution du disque, et, conséquemment, fait un tour entier pour cent révolutions. Mais chaque tour de cette roue fait aussi avancer d'une dent une seconde roue indépendante  $b$ , et toutes deux, sur leurs cadrans respectifs indiquent l'une, le nombre des tours du disque, l'autre les centaines de tours. Enfin, deux boutons D et C servent à engrener et à désengrener les roues.

Si l'on veut connaître le nombre de vibrations qui correspond par seconde au  $la$  du diapason, on met, pendant deux minutes, la sirène à l'unisson de cet instrument, puis on regarde sur les cadrans le nombre de tours qu'a faits le disque. Il suffit alors de multiplier ce nombre par 20 et de diviser le produit par 120, nombre de secondes qu'a duré l'expérience.

A vitesse égale de la sirène, le son est le même dans l'eau que dans l'air, ou dans tous les gaz, ce qui démontre que le son dépend du nombre des vibrations du corps sonore, et non pas de la nature de ce corps.

**SOUFFLETS ACOUSTIQUES.** — Ce sont des réservoirs d'air que l'on emploie pour mettre en action les instruments à vent, comme la sirène ou les tuyaux d'orgue. Entre les quatre pieds d'une table de bois est un

soufflet S (*fig.* 361) que peut mettre en mouvement une pédale P, et une sorte d'outre de peau flexible D servant à emmagasiner l'air dont a besoin le soufflet. Si l'on comprime cette outre, soit en appuyant avec le pied sur la pédale, soit avec un levier T mû à la main, l'air est chassé par le tube E dans la boîte C qui est fixée sur la table, et il y pénètre avec la rapidité que l'on désire.

**ROUE DENTÉE DE SAVART.** — Cet instrument, qui porte le nom de son inventeur (1), consiste en un banc de bois (*fig.* 362), fendu dans le sens de sa longueur pour supporter deux roues A et B; la plus grande sert à donner une extrême vitesse à la seconde qui est dentée, et qui fait vibrer un fragment de carte E, fixé sur le banc. Cette carte, frappée par chaque dent, produit à chaque tour de la petite roue un nombre de vibrations égal à celui des dents. Enfin, dans un petit cadran H, est un compteur qui, recevant son mouvement de la roue dentée, indique le nombre de ses tours, et, conséquemment, le nombre des vibrations en un temps donné. Pour faire des expériences avec cet appareil, on procède d'une façon analogue à celle employée avec la sirène.

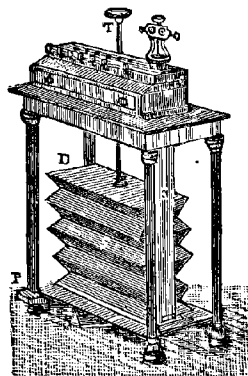


Fig. 361. — SOUFFLETS  
ACOUSTIQUES.

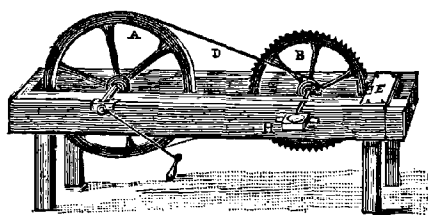


Fig. 362. — ROUE DE SAVART.

**VIBROSCOPE DE DUHAMEL.** — La *roue dentée de Savart*, aussi bien que la *sirène*, est d'une exactitude médiocre ; le principal mérite de ces instruments est qu'ils font voir d'une manière directe, en quelque sorte, la condition physique de la production du son. On se sert aujourd'hui plus généralement de procédés d'inscription graphique, plus commodes à la fois et plus exacts. Le *vibroscope* de Duhamel est un des appareils employés. Il se compose (*fig.* 363) d'un cylindre A de bois ou de métal, fixé sur un axe fileté vertical O, tournant au moyen d'une manivelle, et qui, en même temps qu'il tourne dans un sens ou dans l'autre, se meut dans un écrou. Autour de ce cylindre est enroulée une feuille de papier légèrement enfumé, sur

(1) SAVART (Félix), savant français (1794-1841). D'abord médecin, il abandonna cette profession pour s'occuper de chimie et de physique, et particulièrement d'acoustique; il entra à l'Académie des sciences en 1817, puis succéda à Ampère comme professeur au Collège de France.

lequel s'inscriront les vibrations. A côté du cylindre est placé le corps sonore en expérience, soit une lame élastique G, fixe à l'une de ses extrémités et dont l'autre supporte un style, qui touche légèrement la surface du papier noirci, pendant la rotation. Quand le cylindre tourne, le style décrit en blanc sur le papier une ligne hélicoïde régulière ; mais, si l'on fait vibrer la lame en même temps, cette ligne présente des ondulations résultant des vibrations, et il ne reste plus qu'à déterminer le temps que durent ces dernières. Le procédé le plus simple pour cette détermination

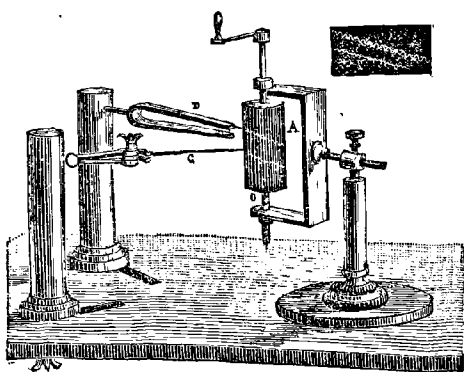


Fig. 363. — VIBROSCOPE DE DUHAMEL.

est de comparer la ligne tracée par la lame à celle que tracerait un diapason, dont le nombre de vibrations, en un temps donné, est connu. On place donc un diapason D à côté de la lame ; à une des branches de l'instrument on place également un petit style, et on fait vibrer en même temps la lame et le diapason : l'un et l'autre tracent des lignes sur le cylindre, et, en comparant le nombre d'oscillations qui se correspondent sur les

deux lignes, on en déduit le nombre de vibrations qu'exécute la lame en une seconde. Par exemple, soit que 150 vibrations du diapason correspondent à 165 de la lame, et qu'à  $\frac{1}{500}$  de seconde corresponde chaque vibration du diapason, 150 correspondront à  $\frac{150}{500}$  de seconde, et, par conséquent, en  $\frac{150}{500}$  de seconde, la lame a eu 165 vibrations ; d'où, en  $\frac{1}{500}$  de seconde,  $\frac{165}{150}$ , et en une seconde  $\frac{165}{150} \times 500 = 550$ .

**PHONAUTOGAPHE DE SCOTT.** — M. Léon Scott a cherché à rendre d'un usage plus général la méthode graphique employée par M. Duhamel, dont le *vibroscope* ne pouvait servir à mesurer les vibrations des tubes sonores, d'un chant ou d'un bruit tel que celui d'un coup de canon, ou du tonnerre. Il inventa dans ce but son *phonautographe* que, en 1857, construisit Rodolphe Kœnig, fabricant d'instruments d'acoustique à Paris. Cet appareil est formé d'une membrane tendue à l'extrémité d'une sorte de grand cornet acoustique (*fig. 364*). Un style léger, fixé sur la mem-

brane, écrit sur le cylindre tournant pendant qu'elle est ébranlée par un son produit à l'autre extrémité du cornet. L'inventeur est parvenu, au moyen de cet appareil, à obtenir le tracé d'un morceau de poésie, récité d'une voix accentuée à 0<sup>m</sup>,50 de la membrane. Il a pu avoir un certain nombre d'épreuves présentant les sons de la voix comparés à ceux du cornet à piston, du hautbois, et d'une grande membrane de caoutchouc rendant des sons très graves. Les instruments, comme on pouvait le pressentir, se distinguent beaucoup d'avec les voix, d'après les caractères de la vibration. M. Scott a constaté ce fait curieux, que le son d'un instrument ou d'une voix donne une suite de vibrations d'autant plus régulières, plus égale et, par conséquent, isochrones, qu'il est plus pur pour l'oreille, mieux *filé*; dans le cri déchirant, dans les sons aigres des instruments, les ondes de condensation sont irrégulières, inégales, non isochrones.

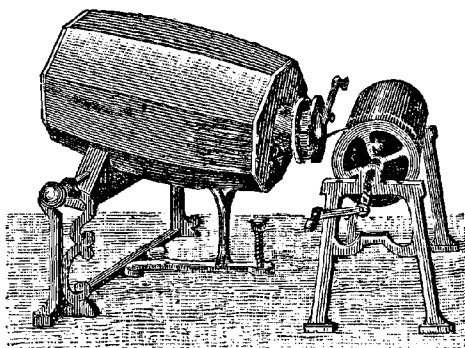


Fig. 364. — PHONAUTOGRAPHE DE SCOTT.

**LOIS DES VIBRATIONS DES CORDES. — SONOMÈTRE.** — En acoustique, on appelle *cordes* des corps filiformes de métal, de boyau ou d'autre matière; les cordes sont élastiques lorsqu'elles sont maintenues entre deux points fixes ou tendues par des poids.

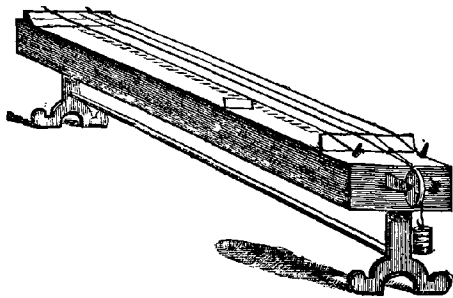


Fig. 365. — SONOMETRE.

On distingue dans les cordes deux sortes de vibrations : les *vibrations transversales*, c'est-à-dire s'exécutant perpendiculairement à la longueur, et qui s'obtiennent, soit avec un archet, comme sur

le violon, soit en pinçant la corde comme dans la guitare et la harpe, soit par la percussion, comme dans le piano; les *vibrations longitudinales*, s'obtenant dans le sens de la longueur des cordes, en frottant celles-ci avec un morceau de drap saupoudré de colophane. On ne s'occupe guère que des vibrations transversales, seules utiles à connaître; d'ailleurs, les vibrations longitudinales sont soumises aux mêmes

lois ; elles sont seulement beaucoup plus rapides, et, par conséquent, produisent des sons plus aigus.

Toutes les lois relatives aux vibrations des cordes se démontrent expérimentalement au moyen d'un instrument appelé *sonomètre*, et qui n'est, au fond, qu'un *monocorde* perfectionné. Il se compose (*fig.* 365) de plusieurs cordes parallèles, supportées par des chevalets mobiles ; l'une de ces cordes est invariable. On fait varier les sons des autres en les tendant plus ou moins à l'aide d'une clef, afin d'établir entre le son qu'elles rendent et celui de la première les intervalles qu'on veut mesurer. Au-dessous de ces cordes, tendues par des poids, sont des règles divisées, dont l'une est un mètre et les autres portent des divisions servant de repères pour obtenir avec les cordes les différents sons de la gamme.

Les premières expériences faites avec cet appareil, afin d'obtenir les lois des vibrations des cordes ont été imaginées par le P. Mersenne. Il se servait simplement de cordes qui ne rendaient aucun son ; néanmoins, cela lui suffit pour établir, par la seule inspection d'une corde vibrant, que, *quand une corde vibre depuis un certain temps, l'amplitude des oscillations a diminué, mais leur durée est restée la même.*

Ce fut en 1759 que Lagrange détermina par le calcul les quatre lois fondamentales des vibrations transversales des cordes, démontrées expérimentalement avec le sonomètre, et que l'on peut énoncer ainsi :

1<sup>re</sup> LOI : *Les nombres des vibrations d'une corde sont en raison inverse de sa longueur ;*

2<sup>e</sup> LOI : *Les nombres des vibrations d'une corde sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent ;*

3<sup>e</sup> LOI : *Les nombres des vibrations des cordes sont en raison inverse de leur diamètre ;*

4<sup>e</sup> LOI : *Les nombres des vibrations des cordes de matières différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités.*

Toutes ces lois sont contenues dans une formule unique. Appelant  $n$  le nombre de vibrations simples par seconde,  $l$  la longueur en décimètres de la corde, c'est-à-dire la partie vibrante comprise entre les points de tension,  $r$  le rayon en décimètres de la section de la corde,  $P$  le poids en kilogrammes qui la tend,  $d$  la densité, et, enfin,  $\pi$  le rapport de la circonférence au diamètre qui est, comme chacun le sait, constant et égal à 3,141592..., cette formule sera :

$$n = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{P}{\pi d}}.$$

**NŒUDS ET LIGNES NODALES DES CORDES.**— C'est à Sauveur (1) que sont dues les expériences sur la division des parties vibrantes des cordes : le premier, il exécuta, dit M. Hoeffler, l'expérience suivante. Que l'on place sous une corde tendue un obstacle léger, tel qu'un petit chevalet, de manière à diviser cette corde en deux parties inégales, et que l'on fasse ensuite vibrer cette corde : celle-ci se divisera en parties qui sont le commun diviseur de chacune d'elles. Que le chevalet soit, par exemple, tellement placé que l'une des deux divisions contienne quatre parties et l'autre trois : la corde, en vibrant, se divisera en sept parties. Pour s'en assurer, il plaçait des *petits cavaliers de papier*, c'est-à-dire des bouts de papier pliés en deux et reposant à cheval sur la corde aux points de division, et d'autres sur le milieu des intervalles qui les séparent. Tout étant ainsi disposé, si on fait vibrer la corde avec un archet, on verra les premiers morceaux de papier tomber, tandis que les seconds resteront en place. Les parties vibrantes qui repoussent les papiers sont les *ventres*, et les points où les papiers restent immobiles sont les *nœuds* de l'ondulation ou de la vibration ; par suite, les lignes formées par les ventres s'appellent *lignes nodales*. C'est sur cette expérience que repose l'explication des *accords musicaux*.

**INSTRUMENTS DE MUSIQUE A CORDES.** — L'acoustique, quelque intéressante qu'elle soit au point de vue des recherches physico-mathématiques, n'est cependant d'une utilité immédiate que dans ses rapports avec la musique. C'est ce qu'avait déjà compris Pythagore. Malheureusement, malgré les travaux récents de M. Helmholtz (2), il reste encore beaucoup à faire pour l'application de l'acoustique à la musique, et jusqu'à présent, c'est par une longue expérience, par des tâtonnements nombreux, par des procédés de tradition que l'on procède à la fabrication des instruments de musique plutôt que par une méthode rigoureusement scientifique.

Les instruments à cordes se divisent en *instruments à sons fixes*,

(1) SAUVEUR (Joseph), savant français (1653-1716). Élève de Rohault, il s'occupa d'abord de mathématiques et fut professeur à Paris, où il compta le prince Eugène parmi ses élèves, puis obtint la chaire de mathématiques au Collège de France (1686). Membre de l'Académie des sciences (1696), il se livra spécialement à l'étude de l'acoustique, et est considéré comme un des fondateurs de cette branche de la physique. Il fit faire de grands progrès à l'acoustique musicale, quoiqu'il fût sourd et eût la voix fausse. Il s'occupa aussi de fortifications et visita dans ce but les villes des Flandres. Ses travaux sont consignés dans le Recueil de l'Académie des sciences.

(2) HELMHOLTZ, physicien et physiologiste allemand contemporain, professeur à l'université de Heidelberg, auteur de remarquables travaux sur la voix, la vue et l'ouïe. Son ouvrage le plus célèbre, *Théorie physiologique de la musique*, a été traduit en français par M. Georges Guéroult.

qui ont autant de cordes que l'on veut produire de sons, comme les pianos et les harpes, et les *instruments à sons variables*, qui n'ont qu'un nombre très restreint de cordes, et dont, à l'aide des doigts, on réduit la longueur des parties vibrantes, ce qui permet d'obtenir tous les sons possibles entre deux limites déterminées. Tels sont les violons et tous les instruments de la même famille : alto, violoncelle, contrebasse, etc. Les premiers donnent les sons de la *gamme tempérée*, tandis que les autres peuvent donner tous les sons de la *gamme chromatique vraie*, ce qui leur assure une grande supériorité.

Les instruments à cordes datent évidemment de la plus haute antiquité. Le plus simple, et qui certainement a dû être un des premiers imaginés, est la *harpe éolienne* ; c'est une simple corde tendue dans un courant d'air assez intense. On en attribue cependant l'invention au P. Kircher, et un de ses biographes rapporte à ce sujet cette anecdote : « Par une nuit d'été, il avait placé l'instrument dans sa chambre entre deux portes ouvertes, quand une brise légère, ayant soufflé du côté du jardin du couvent, produisit une douce harmonie. Tout le monde était déjà couché, et le *minister* du couvent, faisant sa ronde, crut entendre le son d'un orgue. Il s'arrêta étonné. Le son partait de la cellule du P. Kircher. Il y entre et demande où se trouve l'orgue que le P. Kircher vient de toucher. Celui-ci se mit à rire. La porte avait été fermée ; on n'entendait plus rien. Le visiteur se retire. A peine avait-il franchi le seuil que le son qui l'avait frappé se reproduisit de nouveau. Décidément, l'orgue est bien dans la chambre, dit le *minister*. Il y rentra et se plaignit d'avoir été trompé. Le P. Kircher le pria de chercher minutieusement dans les moindres recoins. Comme il s'en allait très surpris, le savant lui montra la harpe éolienne, qui fut le sujet de l'admiration des Pères. »

On ne sait au juste quelle était la forme des instruments de musique des Hébreux ; mais nous savons que David avait établi, pour le service du temple, quatre mille chanteurs et instrumentistes, divisés en vingt-quatre classes, dont chacune avait un chef. Les instruments à vent, les trompettes, les cymbales, étaient probablement à peu près ce qu'ils sont de nos jours. Quant aux instruments à cordes, ils avaient le *psaltérion*, si souvent cité dans la Bible, qui, au dire de saint Jérôme, était un instrument à dix cordes ayant la forme du delta grec, que l'on touchait avec les doigts, le *kinnor*, le *hatzur*, la *harpe* ; mais aucun renseignement précis ne nous est parvenu sur ces instruments. Les Grecs avaient la *lyre* ou *cithare* (*fig.* 366), dont la plus ancienne et la plus simple semble avoir eu seulement 3 cordes. Le nombre des cordes monta ensuite à 4 (*tétracorde*), puis à 5 (*pentacorde*), à 6 (*hexacorde*), à 7 (*heptacorde*), à 8



(*octocorde*). Terpandre fut banni de Sparte pour avoir ajouté la 7<sup>e</sup>; cependant le poète Simonide ajouta la 8<sup>e</sup>. Le nombre en fut porté plus tard à 12 en Grèce, et à 18 en Égypte. Les parties de la lyre autres



Ménestrel jouant du rebec (page 789).

que les cordes sont : la *caisse*, qui était originairement, dit-on, une écaille de tortue, et qu'ensuite on fit en bois; la *table*, qui fermait la caisse et qui était une simple peau sèche tendue; les *montants*, adaptés à la caisse et qui la continuaient en quelque sorte sur les côtés, en

laissant un intervalle entre eux, et le *joug*, placé en travers, d'un montant à l'autre. Les cordes s'attachaient, d'une part à la caisse, de l'autre au joug. On jouait de la lyre, tantôt avec une espèce d'archet, dit *plectrum*, tantôt en la pinçant avec les doigts, tantôt des deux façons; la main gauche pinçait les cordes, pendant que la droite les frappait avec le *plectrum*. Enfin, les Grecs étudiaient la lyre, non pas seulement en artistes et en poètes, mais en physiciens, car ils connaissaient les rapports

des intervalles sonores et des longueurs des cordes, lois dont la découverte remonte à Pythagore.

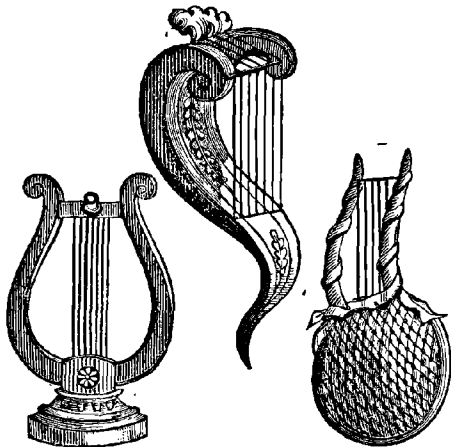


Fig. 366.

LYRES ET CITHARES DES GRECS.

**INSTRUMENTS A SONS FIXES : HARPE, PIANO, VIELLE.** — Parmi les *instruments à sons fixes* modernes, la harpe et le piano sont les types, l'un des instruments que l'on fait vibrer en pinçant les cordes, l'autre de ceux où l'on obtient les vibrations par percussion.

La *harpe*, nous l'avons dit, est un des instruments les plus anciens. Au moyen âge, ce fut l'instrument des peuples du Nord, des bardes, des trouvères et des ménestrels. Elles étaient alors fort simples; au XIII<sup>e</sup> siècle, elles n'avaient encore que 17 cordes, et ce ne fut qu'en 1720 que Hochbrucker imagina la pédale, qui permit à l'instrument de donner les dièses et les bémols. Successivement perfectionnée par Vetter, Nadermann, Cousineau, Sébastien Érard, Bothe, etc., la harpe, montée aujourd'hui sur 42, 43 et même sur 46 cordes verticales, possède la même étendue que le piano à 6 octaves, et une bien plus belle sonorité; passe du son le plus éclatant au murmure le plus doux par des nuances presque insensibles, prête de plus à des poses gracieuses et fait valoir les avantages de la personne qui exécute. Aussi a-t-elle joui longtemps d'une grande faveur, surtout sous le premier empire. Elle est cependant presque abandonnée depuis une trentaine d'années.

La harpe se compose de trois parties, dont chacune correspond aux trois côtés inégaux d'un triangle (*fig.* 367). La caisse, ou corps sonore, est un assemblage de huit pans de bois assemblés et collés, sur lesquels est posée une table de sapin percée d'un certain nombre d'*ovies* en forme de rosacés ou de trèfles. C'est sur cette table qu'on fixe les cordes à l'aide

d'autant de petits boutons ; par l'autre extrémité, les cordes sont fixées à la *console* ou *clavier*, de forme plus ou moins contournée, qui constitue le côté supérieur du triangle. Là, les cordes sont enroulées à autant de chevilles qui permettent de leur donner la tension convenable. Dans la partie inférieure de la caisse, ou du pied de la harpe, aboutissent des tringles logées dans le troisième côté du triangle. Chaque tringle correspond, dans le pied, à une pédale sur laquelle le joueur appuie quand il est nécessaire. Par son autre extrémité, la tringle est reliée à des leviers qui agissent, quand elle est relevée, sur des crochets extérieurs ; ceux-ci appuient alors toutes les cordes, qui sonnent à l'octave les unes des autres, contre des sillons qui les raccourcissent ainsi dans la proportion voulue par les lois des vibrations sonores, pour que chaque note se trouve diésée dans toute l'étendue de l'instrument.

Le *piano*, appelé aussi *forte-piano* (de deux mots italiens *doucement* et *fort*, parce que l'instrument donne tous les tons) n'est, en musique, qu'un perfectionnement de l'*épinette* ou du *clavecin*, qui se jouaient aussi en frappant sur des touches ; mais il présente cette différence que, dans ces derniers instruments, les cordes étaient pincées au moyen d'un sautereau, qui supportait une pointe en plume, tandis que les touches du clavier du piano frappent les cordes à l'aide de petits marteaux. On attribue son invention au Padouan B. Cristofori (1711), au facteur français Marius (1706), aux Allemands Schröter (1721) et Silbermann (1750) ; mais c'est

en France qu'il a reçu les plus grands perfectionnements par Tomkinson, Pétrold, Pape, Pleyel, Érard, Roller, Herz, Kriegelstein, etc. C'est aujourd'hui l'instrument le plus répandu, parce qu'il est moins fatigant que la harpe, plus fécond en ressources musicales, qu'il a l'avantage de former une harmonie complète et de permettre à un seul exécutant de réduire toutes les parties d'un orchestre. Le *piano* se compose, quelle que soit sa forme, de trois parties principales à considérer : la caisse sonore, les cordes et le mécanisme des touches et des marteaux. La caisse sonore est de bois, et à l'intérieur de ses parois repose une table mince de sapin, formée



Fig. 367. — HARPE.

de divers morceaux collés et ajustés ensemble : c'est la table d'harmonie. Elle reçoit la première l'impression des vibrations sonores excitées dans les cordes, et ce sont ses fibres qui communiquent ces mêmes vibrations à la caisse du piano, et surtout à la masse d'air qui y est renfermée. Au-dessus de la table d'harmonie, et parallèlement à son plan, sont tendues les cordes sur un cadre de fer, renforcé de barres, aussi de fer, qui en maintiennent la rigidité et empêchent la déformation qui pourrait résulter de la tension des cordes. Ce sommier est composé de cordes métalliques, dont la longueur et la grosseur sont en rapport avec la hauteur et le volume du son qu'il s'agit de produire. Chaque son est donné par une

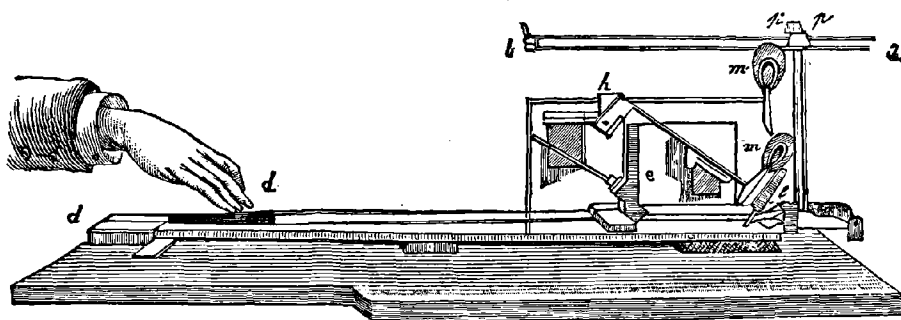


Fig. 368. — MÉCANISME DU PIANO.

double corde pour les octaves graves, par une triple corde pour les octaves des sons moyens ou aigus. Ces dernières sont d'acier ; mais les cordes graves sont des cordes filées revêtues d'un enroulement de fils de cuivre rouge ou argenté. Ces combinaisons sont conformes aux lois des vibrations des cordes (page 781).

L'instrument est construit de manière à permettre à l'accordeur de tendre, au moyen d'un instrument de fer, chacune des cordes de manière à produire les sons de la gamme chromatique et diatonique.

Chacun sait que l'on fait vibrer les cordes du piano en appuyant les doigts des deux mains sur les *touches* d'ivoire et d'ébène qui constituent le *clavier*. Voici comment agit le mécanisme : au-dessous des cordes sont disposés des petits marteaux qui, à l'état de repos des touches, restent à une certaine distance de la corde qui correspond à chacun d'eux. Quand l'on appuie sur une touche (*fig. 368*), c'est-à-dire quand on abaisse un bras du levier qui la constitue, l'autre bras se relève ; le marteau correspondant est projeté brusquement dans le sens vertical et va choquer la corde correspondante, qui vibre alors sous le choc. Ainsi, soit *ab* la corde sonore, *cod* la touche mobile autour du point *o*. En appuyant en *d*, le

bras du levier *oc* se relève, fait lever un échappement *c* qui va frapper sur l'extrémité *h* du manche *t*, du marteau *m*. Ce dernier, qui se trouvait d'abord en *m*, prend alors la position *m'* et frappe la corde. Mais l'échappement, après avoir levé la corde d'une certaine quantité, est lui-même arrêté par un bouton posé obliquement; il quitte le nez de la noix du marteau, qui retombe à sa position primitive sur un petit chevalet *l*, qu'on nomme la *chaise*. Celle-ci empêche le marteau de rebondir et amortit le bruit qu'il pourrait faire. Enfin, pour empêcher les cordes de résonner après le choc, elles sont munies de petites pièces de bois garnies de feutre, nommées *étouffoirs*. Dès que le doigt appuie sur une touche, l'étouffoir *pp'* est soulevé et la corde vibre; il reste soulevé si le doigt continue de presser la touche; il retombe, au contraire, et éteint la vibration sonore dès que le doigt quitte la note.

Le piano enfin a des pédales qui permettent d'accroître ou de diminuer, à volonté, l'intensité des sons. L'une d'elles communique, en effet, par un levier, avec tout le système des étouffoirs; quand on appuie le pied, une tringle verticale agit sur ce système et tous les étouffoirs se lèvent en même temps; chaque note est ainsi prolongée et donne un son plus intense; de plus, elle communique ses propres vibrations à ses harmoniques, de sorte que la sonorité de l'instrument en est considérablement augmentée. Au contraire, si c'est sur l'autre pédale qu'agit l'exécutant, un léger mouvement de gauche à droite est communiqué au clavier; chaque marteau ne frappe plus à la fois qu'une ou deux des trois cordes destinées à former le son, dont l'intensité se trouve ainsi diminuée d'un ou de deux tiers.

La *vielle* est encore un instrument à son fixe, dont on joue au moyen de touches et d'une roue-archet qu'on tourne avec une petite manivelle. Les touches, pressées en dessus du clavier par les doigts de la main gauche, portent l'une des cordes sur la roue, qui la fait résonner du grave à l'aigu, selon que l'action des touches lui enlève plus ou moins de sa longueur. Une corde appelée *bourdon*, qui sonne toujours la même note, sert d'accompagnement. La vielle était connue dans l'antiquité; mais elle fut surtout en vogue au moyen âge.

**INSTRUMENTS A SONS VARIABLES, VIOLON, GUITARE, ETC.** — Les *instruments à sons variables* ont pour type essentiel le *violon*. Sous sa forme actuelle, celui-ci n'est connu que depuis le xv<sup>e</sup> siècle; mais au x<sup>e</sup> siècle, on avait des instruments analogues à archet et à cordes: le *rebec*, favori des ménestrels, qui avait trois cordes, était accordé de quinte en quinte et donnait un son fort aigu (*fig.* à la page 785); la *basse de viole*,

à 5 cordes correspondant aux 4 cordes du violoncelle, appelée par les Italiens *viola da gamba*, parce qu'on la tenait entre les jambes; la *taille de viole* qui sonnait une quarte plus haut; la *haute-contre de viole*, qui sonnait une quarte au-dessus encore; le *dessus de violé*, qui sonnait un ton au-dessus; le *par-dessus de viole*, les *violones*; la *viole d'amour*, montée sur 7 cordes et portant, en outre, sous la touche et sous le chevalet 5 ou 6 cordons de métal qui vibrent lorsqu'on joue à vide les autres cordes, etc. Ce n'est toutefois qu'entre les mains des luthiers célèbres du XVII<sup>e</sup> siècle, les Amati, les Stradivarius de Crémone, puis des Guarnerius, des Bergunzi, Steiner, Saluces, et de nos jours des Chanot et des Vuillaume, que le violon a acquis ces perfectionnements de construction qui lui assignent la première place dans tous les orchestres.

Tout le monde connaît la forme moderne de cet instrument et a vu la façon dont on en joue : il nous suffira de dire comment vibre l'instrument quand les cordes sont frappées par l'archet. Cette baguette, munie de crins également tendus et frottés de colophane, ébranle la corde comme ferait une suite rapide de chocs plus ou moins légers, qui, selon qu'on tire ou qu'on pousse l'archet, dérangent la corde à droite ou à gauche de sa position d'équilibre et lui impriment, à chaque très court intervalle où elle est laissée libre, une série d'oscillations dont la rapidité est en rapport avec la longueur de la partie vibrante, avec la tension de la corde et son diamètre. Il résulte de ces sons multiples et isochrones un son unique, qui est formé non seulement de la note principale, mais de toutes ses harmoniques. Si la corde entraînait seule en vibration entre ses points d'appui qui sont d'un côté le chevalet, de l'autre le *sillet* ou le doigt jouant le rôle de sillet, le son serait maigre. Mais, par l'intermédiaire du chevalet, les vibrations de la corde se transmettent à la table de dessus, et de celle-ci à la table inférieure et à tout l'instrument. La masse d'air contenue entre ces deux tables joue elle-même un rôle important par les vibrations qui lui sont communiquées. Elle agit comme un tuyau renforçant de grande section et de faible profondeur, ce qui explique qu'elle renforce tous les sons émis par l'instrument (page 796). Les *ouïes*, c'est-à-dire ces deux ouvertures en forme d'*f*, dont est percée la table de dessus, sont donc utiles pour transmettre au dehors, à l'air extérieur, les vibrations de la masse d'air enfermée dans la caisse. Sans les ouïes, les sons seraient sourds. Savart, qui a longtemps étudié, dans une suite d'expériences célèbres, le mécanisme du violon, a reconnu que cette masse d'air doit d'ailleurs être isolée de tous côtés : en perceant des ouvertures dans les *éclisses*, lames de bois latérales qui réunissent les deux tables du violon, le son devenait de plus en plus maigre, à mesure que les ouvertures

devenaient plus larges. Les parois de la caisse sonore du violon et la masse d'air renfermée vibrent ensemble à l'unisson; néanmoins, prises séparément, les deux tables doivent donner deux sons différant environ d'une seconde majeure. C'est la table supérieure qui vibre avec le plus de force : voilà pourquoi il importe que le bois dont elle est formée soit fibreux, élastique et léger. La table inférieure, représentant le fond d'un tuyau bouché, n'a besoin de vibrer que faiblement; c'est pourquoi on la fait d'un bois plus compact, moins fibreux et plus lourd.

L'*âme* du violon est une pièce essentielle à la sonorité et aux qualités des sons. C'est un petit morceau de bois cylindrique, placé entre les deux tables du violon, à peu près au-dessous du pied-droit du chevalet, du côté de la chanterelle, et qui les réunit. Cette pièce a pour effet de donner au pied du chevalet un point d'appui autour duquel il vibre en battant sur la table de son autre pied. Si l'un des pieds n'était pas appuyé sur un point fixe, il se relèverait pendant que l'autre s'abaîsserait, parce que les cordes n'agissent pas normalement à la table, puisque l'archet les ébranle très obliquement, ce qui entraîne le chevalet dans un mouvement transversal (1).

Tous les instruments de la même famille que le violon vibrent par les mêmes raisons, et sont construits, sauf les dimensions, de la même manière à peu près; tels sont : l'*alto*, violon de dimensions un peu plus fortes, accordé à la quinte au-dessus; le *violoncelle*, encore plus gros, monté à l'octave de l'alto; la *contrebasse*, encore plus volumineuse, dont les cordes à vide sonnent l'octave grave de celles du violoncelle.

La *guitare*, que les Maures ont introduite en Espagne et qui n'a pas cessé d'y être en vogue, et ces instruments aujourd'hui peu usités, qui diffèrent de la guitare seulement parce que leur partie arrière était arrondie, le *luth*, l'*archiluth* ou *théorbe*, la *mandore*, la *mandoline*, sont encore des instruments à sons variables; mais les vibrations sonores n'y sont plus produites par le frottement d'un archet, mais par le pincement des cordes (*fig.* à la page 737).

**TUYAUX SONORES. — TUYAUX A BOUCHE, TUYAUX A ANCHE.** — On appelle *tuyaux sonores* des tubes dans lesquels des sons se produisent lorsqu'on fait vibrer les colonnes d'air qu'ils contiennent. Ce n'est plus ici le corps solide qui vibre tandis que l'air sert seulement de véhicule aux sons, c'est l'air lui-même, renfermé dans les parois résistantes de l'instrument, et la preuve c'est que la matière dont sont faits les tuyaux,

(1) Guillemin, *Applications de la physique*.

bois, verre ou cuivre, n'exerce aucune influence sur le son, et en modifie seulement le timbre.

Si l'on se contentait de souffler dans les tuyaux, il ne se produirait aucun son : il n'y aurait qu'un mouvement progressif continu de la colonne d'air. Pour qu'un son se produise, il faut exciter, par un moyen quelconque, une succession rapide de condensations et de raréfactions se propageant dans toute la colonne d'air du tuyau ; de là, la nécessité de donner à l'*embouchure*, c'est-à-dire à l'extrémité du tuyau par lequel

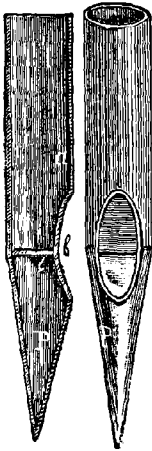


Fig. 369.

TUYAUX  
A BOUCHE.

entre l'air, une forme telle qu'il ne puisse y entrer que par intermittence. D'après la forme adoptée pour produire ainsi les vibrations de l'air, les tuyaux sonores sont divisés en *tuyaux à bouche* et en *tuyaux à anche*.

Dans les *tuyaux à bouche*, toutes les parties de l'embouchure sont fixes. Le tuyau d'orgue ordinaire est le type de ce genre de tuyau (*fig. 369*). La partie inférieure P par laquelle entre l'air se nomme le *pied*. Du pied, l'air passe dans une fente étroite *i* appelée *lumière*. En face de la lumière, sur la paroi opposée, est une autre ouverture transversale, la *bouche*; son bord *a*, taillé en biseau, est la *lèvre supérieure*, son bord *b* la *lèvre inférieure*. Quand un courant d'air arrive par le pied du tuyau, il s'échappe par la lumière et vient se briser en partie contre le biseau de la lèvre supérieure; il s'y comprime, et, par un effet d'élasticité, il réagit sur le courant qui continue d'arriver et l'arrête, mais cet arrêt est très court. De là, des intermittences dans sa sortie par la bouche, des alternatives régulières de condensation et de dilatation, qui se propagent dans l'air du tuyau et le font vibrer. Le son, pour être pur, exige un certain rapport entre les dimensions des lèvres, la grandeur de la bouche et celle de la lumière, et les dimensions du tuyau.

Dans la flûte traversière et les instruments de musique de la même famille, la bouche est une simple ouverture latérale et circulaire; c'est par la disposition que le joueur donne à ses lèvres que le courant d'air vient se briser contre les bords de l'ouverture. On donne à ces instruments le nom d'instruments à embouchure de flûte.

Les *tuyaux à anche* ont, au contraire, l'embouchure mobile. Ils sont également employés dans les jeux d'orgues. Le système d'ébranlement qui sert à mettre en vibration l'air qu'ils renferment et que l'on désigne sous le nom d'*anche* se compose (*fig. 371*) d'un tube de métal prismatique *a*, bouché à la partie inférieure, et dont la partie supérieure K est ouverte.



L'une des faces latérales de ce tube est percée d'une ouverture ou fenêtre longitudinale *r* que l'on nomme la *rigole*. Une languette métallique ou lame vibrante *l*, solidement fixée sur la paroi du tube, est appliquée sur



L'ophicléide a remplacé avantageusement, dans les églises, le serpent... (page 804).

la rigole qu'elle ferme à peu près, et dont elle rase les bords lorsqu'elle vibre. Enfin, un fil de métal très ferme *b*, nommé la *rasette*, presse fortement la languette par son extrémité inférieure, qui est recourbée. Ce fil, qui peut être abaissé ou relevé à volonté, sert à changer la longueur de

la partie vibrante de la languette pour en varier les sons. On adapte cette *anche* au haut d'un tuyau rectangulaire KN, appelé le *porte-vent*, qui est fixé sur le sommier d'un *soufflet* (fig. 377). L'air arrivant dans le porte-vent passe d'abord entre la languette et la rigole pour s'échapper par le tuyau T; mais la vitesse du courant s'accélérait, la languette vient frapper les bords de la rigole, la ferme complètement, et le courant est interrompu. Or, en vertu de son élasticité, la languette revient sur elle-même; puis elle est entraînée de nouveau aussitôt que le courant reprend, et ainsi de suite, en sorte que l'air ne passant que par intermittences du porte-vent dans le tuyau T, il se produit dans celui-ci la même série de pulsations que dans les tuyaux à bouche; d'où il résulte un son d'autant plus élevé que le courant d'air est plus rapide.

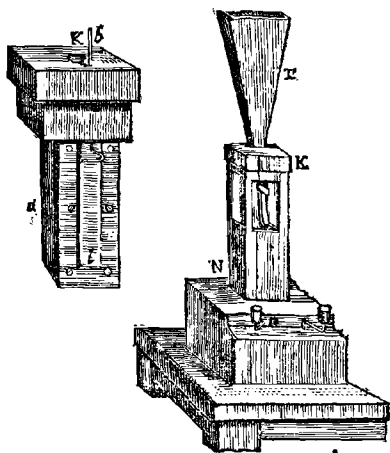


Fig. 370. — TUYAUX A ANCHE.

Il y a des chocs, qui donnent toujours à l'instrument des sons quelque peu criards.

**SONS HARMONIQUES DONNÉS PAR UN MÊME TUBE.** — Ce furent les frères Bernoulli qui, les premiers, firent connaître qu'un même tube sonore peut donner successivement des sons de plus en plus élevés quand augmente la force du courant d'air qui le fait *parler*. Pour le démontrer, on emploie un tube de verre épais, fixé par l'une de ses extrémités à l'embouchure d'un tuyau d'orgue, et pourvu d'une clef permettant de régler le courant d'air. En modérant le vent autant que possible, on lui fait donner le son fondamental, c'est-à-dire le plus grave; si l'on force le courant d'air peu à peu, on obtient des sons de plus en plus aigus, dans les conditions suivantes :

1° Si le tube est ouvert à l'une de ses extrémités, en représentant le son fondamental par 1, tous les sons harmoniques seront représentés par la série naturelle des nombres 2, 3, 4, 5, 6, 7, c'est-à-dire que le second sera à l'octave du premier, le troisième à la quinte de l'octave, le quatrième à la double octave, etc.

2° Si le tube est fermé, dans un bourdon, par exemple, au lieu de suivre la série naturelle des sons harmoniques, les sons correspondent aux nombres impairs 1, 3, 5, 7, sans qu'il soit possible, de même que dans les tuyaux ouverts, d'obtenir d'autres sons intermédiaires.

#### NŒUDS ET VENTRES DE VIBRATIONS DANS LES TUYAUX SONORES. —

Dans les tuyaux sonores, comme dans les cordes, il y a des *nœuds* et des *ventres*, c'est-à-dire des points où l'air est en repos et d'autres où il est vivement agité. La distance entre deux nœuds est dite une *concamération*; c'est une sorte de chambre limitée par deux parois d'air en repos, et au milieu de laquelle se trouve un ventre. Un grand nombre d'expériences servent à démontrer ces faits :

1° Dans l'expérience dont nous avons parlé pour démontrer l'état vibratoire de l'air (page 742), on remarque que le sable saute dans certains endroits et reste immobile dans d'autres.

2° Cette expérience est due à M. Kœnig. Sur une des parois d'un tube rectangulaire est une petite chambre P (fig. 371) dans laquelle arrive du gaz à brûler par un tube de caoutchouc S, et de laquelle trois tuyaux a conduisent le gaz à trois becs A, O, C, placés sur la paroi antérieure du tube. Un de ces becs est représenté en M : c'est une petite cavité fermée postérieurement par une membrane fine  $r$  verticale. Si le tuyau parle, les flammes qui sont en face des nœuds s'agitent et s'éteignent tandis que l'autre reste immobile. Cela prouve que, en face des *ventres*, l'air, quoique en mouvement, ne possède ni dilatation ni compression; qu'aux *nœuds*, au contraire, l'air, quoique ne possédant aucun mouvement, éprouve des variations de force élastique, qui lui font exercer des pressions variables sur la paroi et agiter les flammes.

Ces expériences démontrent encore que, dans un tube, ouvert ou fermé, et quel que soit le nombre des nœuds, ils sont toujours équidistants, et que toujours au milieu de deux nœuds existe un ventre.

**DISPOSITION DES NŒUDS ET DES VENTRES.** — Dans les tuyaux fermés, que les organistes appellent *bourdons*, le fond opposé à l'embouchure est toujours un nœud, puisque la couche d'air en contact avec lui est nécessairement immobile et n'éprouve que des différences de densité. A l'em-

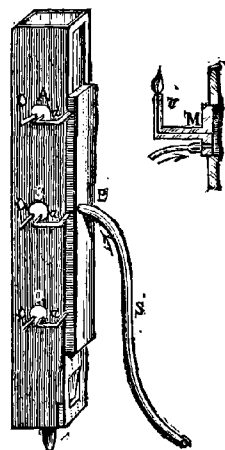


Fig. 371. — EXPÉRIENCE DE M. KŒNIG.

bouchure, au contraire, l'air conservant la même densité, celle de l'atmosphère, le mouvement vibratoire y est le plus grand, et il y a toujours un ventre. Dans le tube tout entier, il y a donc au moins un nœud et un ventre : en ce cas, le tuyau donne le son fondamental et la distance VN du ventre au nœud (*fig. 372*) est égale au quart de la longueur totale

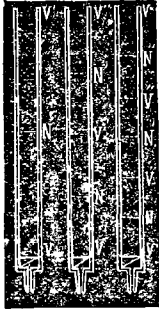


Fig. 372. — NŒUDS  
ET VENTRES  
dans les  
tuyaux fermés.

d'une ondulation (page 757). Si l'on augmente le courant d'air, il reste le ventre de l'embouchure et le nœud du fond, la colonne d'air se divise en trois parties égales, en produisant un nœud et un ventre intermédiaires. Comme la distance VN, entre un ventre et un nœud consécutif, est toujours le quart d'une ondulation, elle est ici le tiers et, en conséquence, le nombre des vibrations est trois fois moins grand, puisque ce nombre est en raison inverse de la longueur des ondes.

Donc, si l'on représente par 1 le son fondamental, le son sera alors représenté par 3. Le son, donné en poursuivant l'expérience, correspondra à deux nœuds et deux ventres intermédiaires. La distance VN étant 5 fois plus petite, ce son sera représenté par 5, et ainsi de suite, ce qui démontre que les tubes fermés donnent successivement les sons 1, 3, 5, 7, etc.

Dans les tuyaux ouverts, comme les couches d'air conservent nécessairement, à l'embouchure et à l'autre extrémité, une densité constante, celle de l'atmosphère, il y a toujours un ventre à chacune des extrémités VV, et au moins un nœud N entre les deux (*fig. 373*). Le tuyau donne alors le son fondamental, la longueur de l'onde est complète, c'est-à-dire quatre fois la distance du nœud au ventre et double de la longueur du tuyau. Si l'on augmente le courant d'air, il se produit deux nœuds et un ventre intermédiaire, la longueur de l'onde est deux fois moindre, et le son 2 est donné. En continuant, la colonne d'air se subdivise en trois nœuds et deux ventres, la longueur de l'onde est trois fois plus petite, d'où résulte le son 3, et ainsi de suite, comme nous l'avons dit déjà, en donnant successivement les sons 1, 2, 3, 4, 5.

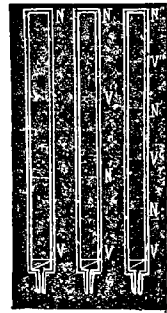


Fig. 373. — NŒUDS  
ET VENTRES  
dans les  
tuyaux ouverts.

**LOI DES LONGUEURS DES TUYAUX.** — De ce qui précède il résulte que, dans les tuyaux ouverts, comme dans les tuyaux fermés, *le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur des tuyaux*. Cette loi, connue sous le nom de *Loi des longueurs*, se démontre expérimentalement

en faisant parler deux tuyaux de même espèce, l'un double de l'autre ; on voit que le plus court donne l'octave aiguë du plus long.

Si l'on compare le son fondamental d'un tuyau fermé avec celui d'un tuyau ouvert de même longueur, on trouve que le nombre des vibrations du tuyau fermé est double, donc que le son fondamental du tuyau ouvert est à l'octave aiguë de celui du tuyau fermé, ce que l'on peut énoncer, suivant la loi des longueurs, en disant que *le son fondamental produit par un tuyau fermé est le même que celui donné par un tuyau ouvert de longueur double*.

Toutes ces lois, connues sous le nom de lois de *Bernoulli*, ne sont pas rigoureusement confirmées par l'expérience : tous les instruments à bouche ou à anche donnent des sons moins graves que ne l'indique la théorie. Ainsi, la distance du premier nœud à l'embouchure est toujours un peu plus petite dans les tuyaux ouverts ; au contraire, dans les tuyaux fermés, la distance du fond au premier ventre est toujours un peu plus grande que la distance théorique.

**INSTRUMENTS A VENT.** — Les *instruments à vent* ne sont autre chose que des tuyaux dans lesquels la masse vibrante, le corps sonore, est une colonne d'air dont la forme varie avec celle des parois où elle est renfermée ; ce sont seulement les variations de dimension et de forme de cette colonne d'air qui causent les variations dans la hauteur musicale des sons produits, et les parois du tuyau n'agissent que pour modifier la sonorité ou l'intensité des sons. C'est donc la colonne d'air qu'il faut faire vibrer, et l'on y parvient soit par une insufflation produite par l'exécutant, soit par une soufflerie mécanique : de là le nom d'*instruments à vent* donné à ces instruments de musique.

Les *tuyaux à bouche*, c'est-à-dire ceux dans lesquels l'embouchure reste fixe, sont employés principalement dans les instruments à vent dits à *embouchure de flûte* : le sifflet, le flageolet, le galoubet, le fifre, la flûte, la flûte de Pan, etc.

Les *tuyaux à anche*, c'est-à-dire ceux dans lesquels l'embouchure est mobile, forment deux classes d'instruments de musique se distinguant d'après la forme de l'embouchure. Les uns, dits à *anche* proprement dite, portent une lame élastique à l'ouverture du tuyau sonore, pour recevoir l'action du courant d'air producteur du son, tels sont : la clarinette, le hautbois, le basson, la cornemuse, etc. ; les autres, dits à *embouchure à bocal*, sont ceux chez lesquels les lèvres du musicien font l'office des anches ; tels sont : le cornet à bouquin, le cor, la trompette, le bugle, l'ophicléide, les saxophones, et presque tous les instruments de cuivre.

Nous décrirons quelques-uns de ces instruments, afin de montrer comment ont été appliquées les lois d'acoustique que nous avons rapportées.

**INSTRUMENTS A EMBOUCHURÉ DE FLUTE.** — Le *sifflet* est le plus simple de ces instruments; c'est un tuyau plus ou moins long adapté à une embouchure de flûte. Il est taillé en biseau, afin d'entrer plus commodément entre les lèvres de celui qui souffle dedans. Les usages de ce petit instrument, sinon de musique, du moins d'acoustique, sont nombreux. A bord des navires de l'État, les sous-officiers s'en servent pour transmettre les ordres aux matelots, et, comme les sons qu'il produit peuvent atteindre une grande intensité, on s'en sert souvent pour donner des signaux. Nous en reparlerons un peu plus loin (page 814).



FIG. 374.

FLUTE DE PAN.

Le *flageolet* (de l'ancien français *flajol*, diminutif de *flauta*, *flaute*, flûte) est une petite flûte à bec de 0<sup>m</sup>,15 à 0<sup>m</sup>,20 de longueur, un sifflet allongé d'un tuyau percé de 6 trous. Le tube est terminé par un petit évasement appelé *patte*, que le doigt annulaire peut boucher pour obtenir quelques sons graves. Le son de cet instrument est fort aigu.

La *flûte* (du latin *fistula*) paraît avoir été connue de toute antiquité; on la trouve peinte ou sculptée sur un grand nombre de monuments antiques, et les poètes en attribuent l'invention à Apollon et à Mercure. Ce fut d'abord un simple tuyau de paille d'avoine (*avena*), un roseau (*calamus*), un os creux d'animal (*tibia*). Les Romains avaient des flûtes simples (*monauli*), des flûtes doubles (*diauli*) formées de deux tuyaux ayant une embouchure commune; l'une jouait, l'autre accompagnait. Les orateurs étaient accompagnés par le son d'une flûte qui leur donnait le ton. On appelait *syrinx* ou *flûte de Pan* (fig. 374) un instrument composé d'un certain nombre de flûtes de grandeur différente, accolées par rang de taille. Ces tuyaux étaient bouchés par le bas et ouverts par le haut sur une même ligne horizontale. Aujourd'hui, la *flûte* est un tube d'environ 0<sup>m</sup>,60 en buis, en ébène, en ivoire, en cristal, formé de trois ou quatre pièces, dites *corps* ou *pattes*, ajustées au moyen d'emboîtures. Ce tube, qui porte le nom de *perce*, communique à l'extérieur par une de ses extrémités nommées *ped*; l'autre bout, la *tête*, est fermé. La flûte a 7 trous: 1 sur le pied et

3 sur chacun des autres corps. On a ajouté des clefs qui ferment 4 ou 5 trous. Le son de la flûte s'étend du *ré* de violon à l'*ut* d'en haut. Cette flûte ordinaire se nomme *flûte traversière* ou *flûte allemande*.

Outre cette flûte ordinaire, on connaît la *petite flûte*, dite aussi *octavus* ou *piccolo*, de même forme, et qui sonne l'octave de la précédente; elle n'a que 0<sup>m</sup>,40 de longueur; les sons en sont aigus et perçants.

Il y a encore la *flûte à bec*, *flûte douce* ou *flûte d'Angleterre*, qui a la forme du flageolet et dont les sons s'étendent du *fa* grave juqu'au troisième *sol*.

Le *galoubet* est une petite flûte à 3 trous, de deux octaves plus haute que la grande flûte et d'une octave au-dessus de la petite flûte. Son étendue n'est que de deux octaves et un ton; le son en est criard et perçant. C'était l'instrument favori des troubadours, et l'on s'en sert encore dans le Midi de la France, en l'accompagnant du tambourin.

Le *flûte* (de l'allemand *pfleifer*) est une petite flûte traversière, percée de 6 trous et d'un son très aigu. Autrefois, en France, depuis François I<sup>er</sup>, et maintenant encore en Allemagne et en Angleterre, il accompagne le son du tambour.

Ces instruments sont tous percés d'un certain nombre de trous pratiqués en des points qui correspondent aux nœuds de l'air intérieur en vibration. Quand tous les trous sont bouchés par les doigts de l'exécutant, les sons produits sont le son fondamental et ses harmoniques 2, 3, 4, c'est-à-dire l'octave supérieure, la tierce au-dessus de cette octave, la double octave, etc. En levant successivement les doigts, on obtient les sons intermédiaires de la gamme naturelle; les dièses et les bémols s'obtiennent en ne bouchant les trous qu'à demi.

**INSTRUMENTS A ANCHE.** — La *clarinette*, inventée en 1690 à Nuremberg par Chr. Denner, perfectionnée par Ivan Muller, fut introduite par Glück dans la musique dramatique, et, à la même époque, dans la musique militaire. C'est un instrument dont le doigter est très compliqué. Il se compose d'un tube creux percé de 13 trous dont 6 pour les doigts et 7 pour les clefs. Son extrémité inférieure, appelée *patte* ou *parillon*, est évasée en cône, l'autre extrémité, appelée *bec*, est formée d'une lame de roseau adaptée à un morceau de buis, d'ébène et d'ivoire, que l'exécutant fait vibrer en soufflant dans l'étroite ouverture qui les sépare. Les lèvres de l'exécutant jouent le rôle de la *rasette* et déterminent un mouvement vibratoire plus ou moins rapide. La clarinette possède près de 4 octaves à partir du *mi* au-dessous du plus grave des sons du violon.

Le *cor de basset*, en usage surtout en Allemagne, sonne la quinte

au-dessous de la clarinette, et comprend 4 octaves qui commencent à l'*ut* grave du piano.

Le *basson* représente, parmi les instruments à vent, ce qu'est le violoncelle parmi les instruments à cordes. Son diapason contient 3 octaves, du *si bémol* grave du piano au *si bémol* aigu de la clef de *sol*. Son caractère est tendre, mélancolique, religieux, son timbre doux et agréable.

Le *hautbois* (fig. 375) est un instrument dont le son produit un effet des plus charmants; il a quelque chose de champêtre, de naïf, de doux



Fig. 375. — HAUTOIS.

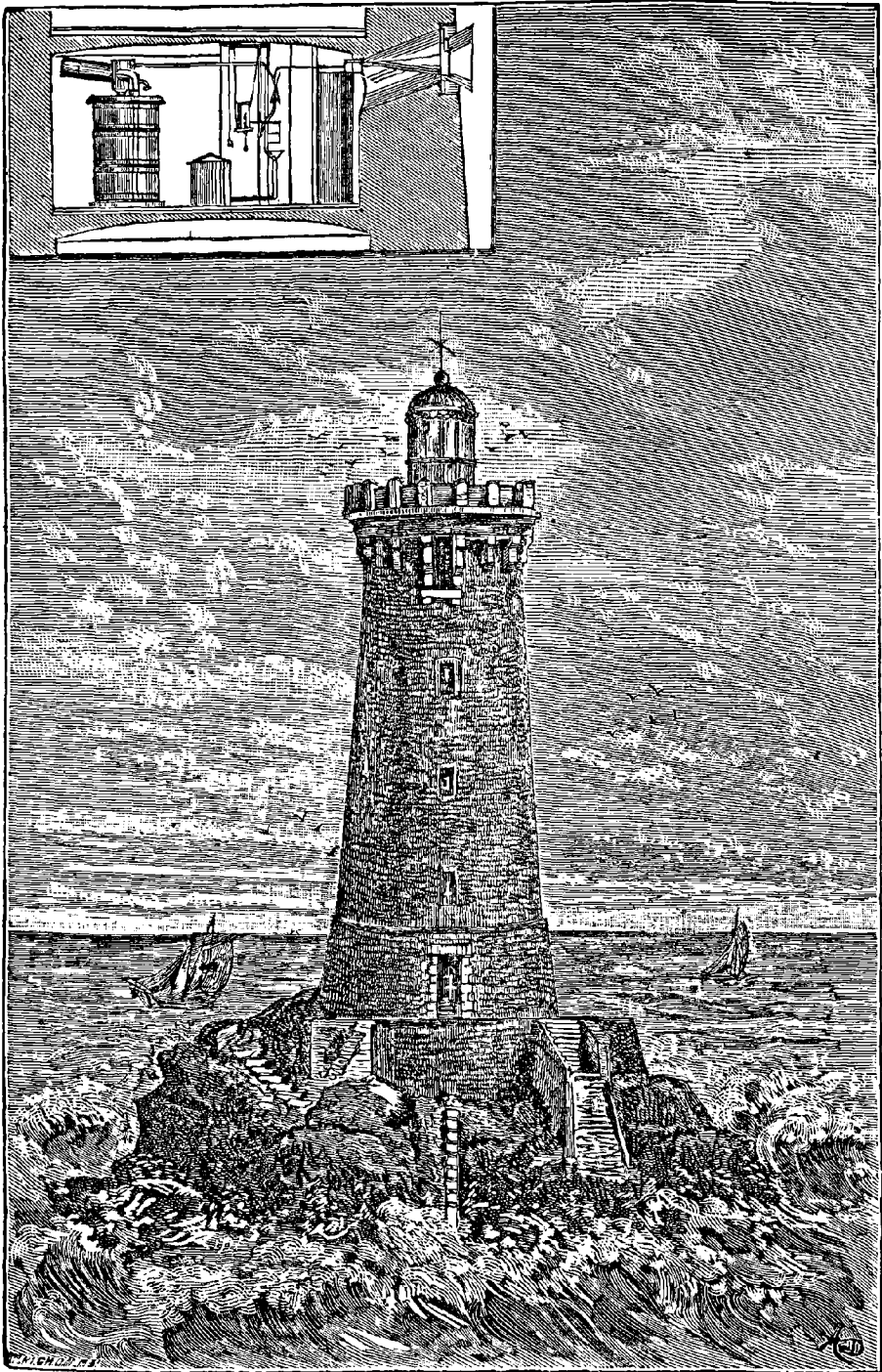
et de mélancolique; le doigter en est relativement facile; son étendue est de 2 octaves et 5 demi-tons du premier *ut* au *fa* suraigu. Le nom de *hautbois* se donnait autrefois à toute une famille d'instruments: le *hautbois dessus*, le *hautbois ténor*, le *hautbois basse*, le *hautbois de forêt*, le *hautbois d'amour*, le *cervelas*, dont le tube avait un développement de 4<sup>m</sup>,17; aujourd'hui, c'est un instrument de 0<sup>m</sup>,60, construit en buis, en ébène, en grenadille, formé de trois pièces dites corps qui s'ajustent bout à bout, formant un tube graduellement évasé que termine le *pavillon*; l'*anche* est formée de deux lamelles de roseau. Sur la longueur du tube sont des trous qui donnent l'échelle diatonique. Pour les notes avec dièses et bémols, elles s'obtiennent au moyen de 12 clefs. Parfois on adapte au corps supérieur ce qu'on nomme la *pompe*: ce sont deux tubes de cuivre roulant l'un sur l'autre et augmentant de 0<sup>m</sup>,02 la hauteur du tube.

Le *cor anglais*, que les Italiens appellent *voix humaine*, a la forme du hautbois dans des proportions plus fortes; il est un peu recourbé et son pavillon se termine en boule, au lieu d'être un peu évasé, comme celui du hautbois. Il sonne une quinte au-dessus de celui-ci, et tient, en conséquence, la place qu'occupe l'alto vis-à-vis du violon. Son diapason est de 2 octaves, en commençant au *fa* grave du piano.

La *cornemuse*, la *musette*, le *biniou* sont des espèces de hautbois rustique, dans lesquels l'air, au lieu de venir des lèvres ou de la bouche de l'instrumentiste, est emmagasiné dans un réservoir de peau avec lequel communiquent les embouchures des tuyaux sonores. La *cornemuse* (fig. 376) se compose d'une peau de mouton, qui sert de réservoir, et que le musicien gonfle en soufflant dans un des tubes y aboutissant, appelé *porte-vent*; une soupape intérieure permet au vent d'y entrer, mais non d'en sortir. Trois chalumeaux, espèces de hautbois, munis à leur



PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Le phare du Four et sa trompette marine  
(d'après le catalogue de l'Exposition de Melbourne, publié par l'Administration  
des travaux publics de France) [page 314].



extrémité intérieure d'anches de roseaux, partent du réservoir. L'un de ces chalumeaux, qui n'est percé d'aucun trou et que l'on nomme le *gros bourdon*, résonne à l'octave de l'un des deux autres, qui, percés de trous, permettent d'obtenir, par le jeu des doigts, les sons intermédiaires entre les sons fondamentaux et leurs harmoniques. En pressant la peau de mouton avec ses bras, l'exécutant force l'air à s'échapper par les anches qui vibrent et font sonner les chalumeaux, ayant en même temps l'air et l'accompagnement. On met préalablement les chalumeaux d'accord; car ils sont mobiles et peuvent être raccourcis ou allongés.

Le *binïou* est une cornemuse bretonne; elle ne diffère point de l'instrument ordinaire.

La *musette* est une cornemuse perfectionnée, dont les chalumeaux sont munis de clefs; le bourdon est un cylindre contenant une série de tuyaux à anches, courbés afin de rendre leur longueur plus grande et obtenir des sons plus graves; enfin, l'air est envoyé dans le réservoir, non plus avec la bouche, mais au moyen d'un soufflet, dont la douille s'ajuste avec l'ouverture du porte-vent.



Fig. 376. — CORNEMUSE.

**INSTRUMENTS A EMBOUCHURE A BOCAL.** — Le type de ces instruments est le *cor*, dont l'embouchure a la forme d'un petit entonnoir appelé *bocal*; plus on lâche les lèvres, plus le son est grave; plus on les serre en les pressant contre les dents, plus le son est aigu. Cet instrument, dit aussi *cor d'harmonie*, est d'origine allemande; il a été introduit en France vers 1730. C'est un tuyau conique, contourné en spirale et terminé par un *pavillon*, dans lequel on insère la main pour modifier les sons, qui, obtenus ainsi, s'appellent des *sons bouchés*. Son étendue est de quatre octaves. Le *cor d'harmonie* est un perfectionnement du *cor* ou *trompette de chasse*, imaginé vers 1680, et qui n'est lui-même qu'un perfectionnement du *cornet*, corne de bœuf ou de bouc, avec ou sans trou, dont les anciens se servaient et qui a souvent remplacé le tambour. L'*olifant* des paladins du moyen âge, le fameux *cor* de Roland, étaient des *cornets* d'ivoire. Les postillons en sonnaient volontiers naguère encore, et, dans les montagnes, le *cornet à bouquin*, ou *cor des Alpes* (*Alphorn*), sorte

de longue trompette faite en écorce d'arbre et dont on se sert pour rappeler les troupes, en est un souvenir. Le *cor russe*, inventé au siècle dernier, par le Bohémien Maresch, sorte de long tube de cuivre qui ne donne qu'une note et qu'on emploie en réunissant vingt, trente et quarante cors, de longueur différente; la *trompette*, le *clairon*, sont des instruments du même genre que le cor, généralement fabriqués en laiton, et qui ne diffèrent les uns des autres que par le volume de la colonne d'air, la forme plus ou moins contournée du tuyau et les dimensions du pavillon. Ils produisent seulement les harmoniques naturels du son fondamental, et quand, comme dans le cor d'harmonie, on bouche plus ou moins l'ouverture du pavillon pour avoir les sons intermédiaires, il est difficile d'obtenir des sons bien purs; ils perdent au moins beaucoup de sonorité (*fig.* à la page 737).

On a donc cherché à augmenter les ressources musicales des instruments de cuivre en modifiant de diverses manières les longueurs du tuyau sonore, ou de la colonne d'air en perçant de trous les parois.

La trompette est ainsi devenue le *trombone* (de l'italien *trombone*, augmentatif de *tromba*, trompette), instrument composé de quatre grands tuyaux emboîtés les uns dans les autres, et qu'on allonge ou qu'on raccourcit à volonté, au moyen d'une pompe à coulisse, pour produire les différents tons. Le son grave et solennel de cet instrument est propre à produire de grands effets. Le clairon a été transformé par M. Halliday en *bugle*, sorte de clairon à clefs, employé surtout dans les musiques militaires, et, en Angleterre, dans l'armée, pour les fanfares, donner les signaux, etc. Le cor a été changé en 1820, par l'Allemand Stœrel, en *cornet à pistons*, dans lequel, au moyen de pistons que l'exécutant presse tour à tour, l'air passe dans des appendices qui accroissent la colonne d'air vibrante, et, tout en conservant les bonnes notes du cor, permet de donner le plus grand nombre des tons et des demi-tons que celui-ci refuse. L'*ophicléide* (du grec *ophis*, serpent, et *cleis*, clef), gros instrument de cuivre à clefs (*fig.* à la page 793), d'origine hanovrienne, connu en France depuis 1820, qui forme la basse de tous les instruments de cuivre, a remplacé avantageusement, dans les églises, le *serpent* (*fig.* à la page 737), ainsi nommé à cause de sa forme en S, et qui consistait en un gros tuyau percé de six trous, que bouchaient tour à tour les doigts.

M. Sax, célèbre facteur de Paris, a modifié encore la plupart de ces instruments, et, changeant même leurs noms, les a appelés *sax-horns*, *saxophone*, *saxotromba*, *saxotuba*, etc. Ils sont fondés, bien entendu, sur les mêmes principes d'acoustique, mais ils doivent à une fabrication spéciale une grande sonorité et une extrême justesse.

**ORGUE.** — *L'orgue*, le roi des instruments, a-t-on dit, puisqu'il l'emporte sur tous les autres par la richesse, la puissance et la variété de ses moyens, est comme la synthèse des instruments à vent ; on y trouve tous les types, tous les timbres, tous les sons, depuis les plus graves et les plus sonores jusqu'aux plus suaves et les plus doux. Son nom (du grec *organon*, instrument) le désigne comme l'instrument par excellence.

Suivant la tradition la plus répandue, l'invention de l'orgue daterait seulement du VIII<sup>e</sup> siècle ; le premier instrument de ce genre aurait été envoyé, en 757, par l'empereur d'Orient Constantin Copronyme au roi Pépin le Bref, alors au concile de Compiègne, et placé par ce roi dans l'église de Saint-Corneille, dans cette ville. Mais il est certain aujourd'hui que cet instrument remonte à une époque beaucoup plus reculée ; les Romains et les Grecs avaient des orgues, les uns connus sous le nom d'*orgues hydrauliques*, parce que c'était la pression de l'eau qui produisait le courant d'air dans les tuyaux ; et d'autres, très élémentaires, il est vrai, mais munis d'une soufflerie. A la villa Mattei, à Rome, existe un bas-relief qui représente un cabinet d'orgue, dont les soufflets sont semblables à ceux dont on se sert dans les ménages et sont levés par un homme placé derrière le cabinet ; le clavier est touché par une femme. Vitruve décrit un orgue dans son livre, et l'empereur Julien a fait quelques vers à sa louange. Saint Jérôme, dans sa vingt-huitième épître, parle d'un orgue qui avait douze soufflets et quinze tuyaux, et il ajoute que cet orgue faisait autant de bruit que le tonnerre, et qu'on l'entendait à plus de mille pas.

Ce fut seulement au XII<sup>e</sup> siècle que l'on vit en France un orgue bien caractérisé, il se trouvait à l'abbaye de Fécamp. L'usage de cet instrument paraît avoir cependant existé antérieurement en Angleterre dès le X<sup>e</sup> siècle ; la cathédrale de Winchester en possédait un grand à cette époque. Il comptait 400 tuyaux et 26 soufflets. Les efforts de 70 hommes étaient nécessaires pour mettre ces soufflets en mouvement, tant la structure et la disposition de l'instrument étaient encore imparfaites.

L'orgue est surtout un instrument d'église ; son emploi y fut solennellement consacré en l'an 660, par un décret du pape Vitalien. On a essayé de l'introduire dans les théâtres ; on a pu même, en diminuant beaucoup ses proportions, l'introduire, quelque peu modifié, dans les salons.

L'orgue se compose : 1<sup>o</sup> de tuyaux de différentes grandeurs ; 2<sup>o</sup> d'un ou de plusieurs claviers ; 3<sup>o</sup> de soufflets qui fournissent du vent.

Les *tuyaux*, dont la réunion d'un certain nombre de même espèce s'appelle un *jeu*, sont les uns en étain, les autres faits avec un mélange d'étain et de plomb, d'autres, enfin, en bois ; les uns sont à bouche ouverte, comme des flûtes à bec ; les autres portent à leur embouchure des anches ; on les distingue donc en trois catégories : les *jeux à bouche*, *jeux à anche*, *jeux de mutation*. Les premiers ont leurs tuyaux fermés en haut avec une ouverture horizontale au bas ; ceux à anche se terminent

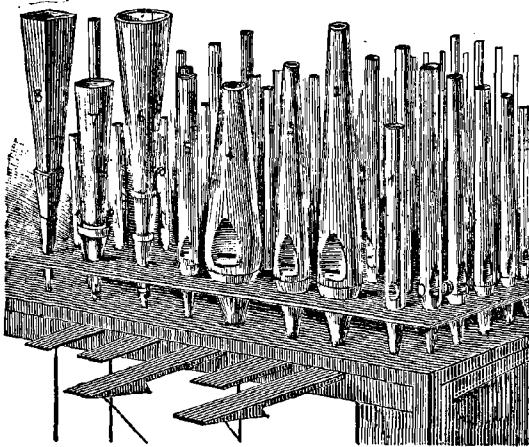


Fig. 377. — SOMMIER D'ORGUE ET JEUX DIVERS.

1. Prestant. — 2. Gros nasard. — 3. Nasard. — 4. Cornet.  
— 5. Flûte. — 6. Trompette. — 7. Voix humaine. —  
8. Bombarde. — 9. Fourniture.

par la languette vibrante ; les jeux de mutation se composent d'un certain nombre de tuyaux, 4, 5, 6, quelquefois 10 pour la même note, qui sont accordés en tierces, quintes, octaves, dixièmes, de sorte que chaque note fait entendre des accords parfaits redoublés. Les divers jeux sont aussi distingués d'après l'instrument qu'ils imitent, auquel on joint l'indication de la dimension du tuyau le plus long ; par exemple, jeu de flûte ouvert de quatre pieds.

Ainsi il y a la *montre* de seize pieds, dont les tuyaux sont d'étain ; le *bourdon* de seize pieds, tuyaux en bois et les notes de dessus données par des tuyaux en plomb ; la *bombarde* de seize pieds, d'étain ou de bois, à anche, tandis que les deux précédents sont à bouche ; le *prestant* de quatre pieds, qui est le premier jeu de l'orgue sur lequel on fait la partition ; le *nasard*, qui sonne une quinte au-dessus du prestant ; la *doublette*, qui est l'octave au-dessus du prestant ; le *larigot*, octave au-dessus du nasard ; puis les jeux de *cornet*, de *fourniture*, de *trompette*, la *voix humaine*, le *cromorne*, le *clairon*, la *voix angélique*, octave de la voix humaine, la *cymbale*, etc. (fig. 377).

Ces tuyaux sont placés debout, du côté de leur embouchure, dans des trous pratiqués à la partie supérieure de caisses de bois appelées *sommiers*. A chaque rangée de tuyaux correspond une réglette de bois, percée aussi de trous à des distances égales aux trous du sommier, et appelée *registre* ; en poussant ce registre, on ferme l'entrée au vent fourni par les soufflets. Quand l'organiste pose le doigt sur une touche, celle-ci tire une

baguette qui ouvre une soupape correspondante au trou du registre ; le vent pénètre alors dans le tuyau, et celui-ci rend le son qui lui est propre.

Le *clavier* de l'orgue est semblable à celui du piano ; mais l'orgue en possède plusieurs disposés en gradins (*fig. 378*). Outre ceux-là, il y a des claviers à pédales, qui correspondent à des jeux particuliers et qui sont mis en mouvement par les pieds ; ces claviers sont entièrement consacrés aux basses. L'orgue de l'église Saint-Sulpice, le plus considérable d'Europe, chef-d'œuvre du célèbre facteur Clicquot, récemment reconstruit par M. Cavallé-Coll (Aristide), compte 100 jeux, sans parler de 10 registres et 20 pédales de combinaison ; il ne renferme pas moins de 7,000 tuyaux. Celui de Notre-Dame de Paris a 5 claviers à main, comprenant chacun 56 notes, le clavier de pédales a 30 notes : il possède 86 jeux, 5,246 tuyaux, 12 registres et 22 pédales de combinaison.

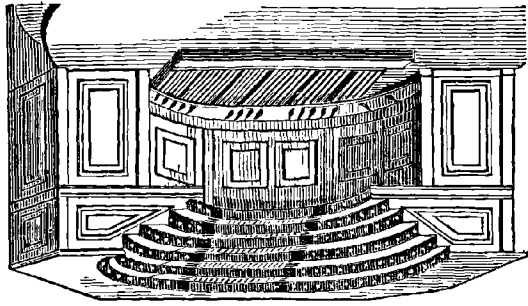


Fig. 378.

CLAVIER DU GRAND ORGUE DE SAINT-SULPICE  
A PARIS

Le vent est donné aux tuyaux par une *soufflerie*, mue généralement à bras d'homme. L'air comprimé passe de là dans des canaux ou *porte-vent*, et de là dans des sommiers. La soufflerie de Notre-Dame de Paris se compose d'une soufflerie alimentaire à double réservoir, avec quatre paires de pompes pouvant fournir environ 300 litres d'air par seconde, et d'une soufflerie à forte pression, armée de deux paires de pompes fournissant par seconde 200 litres d'air. Outre les quatre grands réservoirs régulateurs, placés à proximité des sommiers qu'ils alimentent, on trouve encore dans l'intérieur de l'orgue deux grands réservoirs régulateurs à forte pression ; quatre autres réservoirs pour le récit, les grands chœurs et les dessus du clavier de positif et de bombarde ; un grand nombre de récipients d'air disséminés dans toute l'étendue de l'orgue, et armés de ressorts pour éviter toute espèce d'altération dans la pression du vent. L'utilité de ces différents réservoirs, qui ne contiennent pas moins de 25,000 litres d'air comprimé, se comprendra, si l'on sait que tel tuyau ne dépense pas plus d'un centilitre d'air par seconde, tandis que les gros tuyaux de trente-deux pieds consomment chacun 70 litres pendant le même temps.

L'orgue *expressif*, ou *harmonium*, qui n'est connu que depuis 1840

et dont les principaux perfectionnements sont dus à MM. Debain, Alexandre, Martin, Schiedmayer, etc., est une espèce d'orgue à *anche libre*, composé de 4, 5 ou 6 jeux complets, représentés par 8, 10 ou 12 registres. Cet instrument, employé surtout dans les églises, dans les sociétés chorales, dans les écoles, a le mérite d'être d'un prix peu élevé; mais son défaut, c'est la monotonie du caractère de sa sonorité.

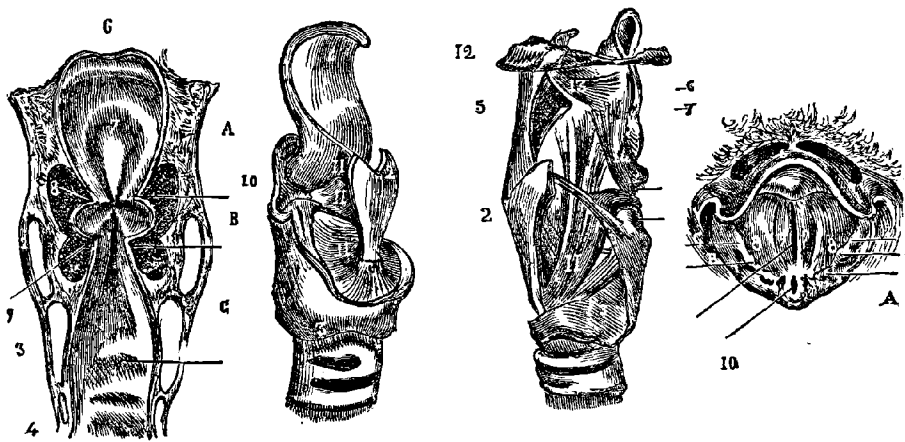


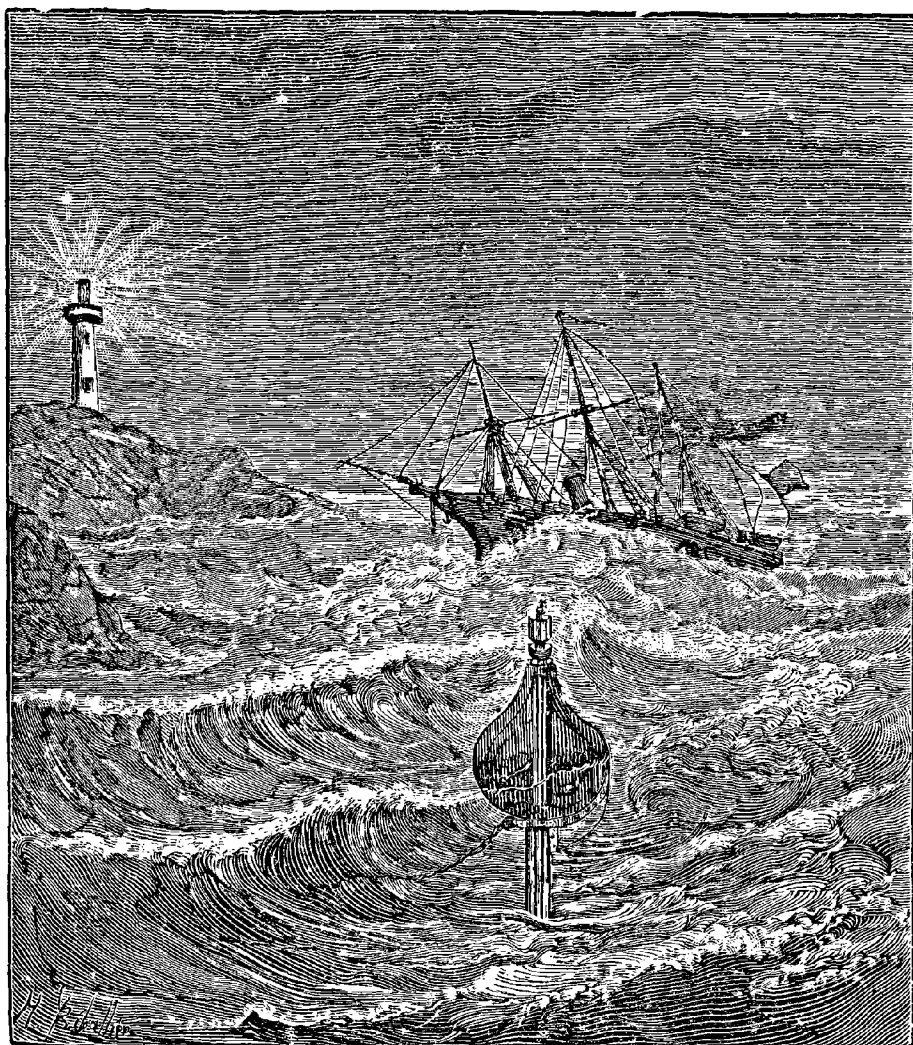
Fig. 379. — APPAREIL PHONATEUR DE L'HOMME.

1. Os hyoïde. — 2. Cartilage thyroïde. — 3. Cartilage cricoïde. — 4. Anneau de la trachée. — 5. Membrane thyro-hyoïdienne. — 6. Épiglote. — 7. Bords de l'épiglotte. — 8. Cordes vocales supérieures. — 9. Cordes vocales inférieures. — 10. Cartilage aryténoïde. — 11. Muscles thyro-aryténoïdiens. — 12. Os hyoïda. — 13. Membrane hyo-épiglottique. — 14. Glandes aryténoïdiennes latérales. — ABC. Cavité supérieure et inférieure du larynx.

**VOIX HUMAINE.** — La *voix* est un son produit dans le *larynx* au moment où l'air expiré par les poumons traverse cet organe, et lorsque les muscles intrinsèques de la *glotte* sont dans un état de contraction (fig. 379). La voix peut être *modulée* et former le chant, ou être *articulée* et constituer la parole. Elle se rapporte au langage conventionnel, lorsqu'elle a lieu pour l'expression des idées, tandis qu'elle fait partie du langage affectif quand elle s'accomplit sans participation de la volonté et sous la seule influence des passions. Depuis longtemps on est d'accord sur le lieu où la voix est formée. Les plaies et les fistules de la *trachée* ou du *larynx*, au-dessous de la *glotte*, ont toujours amené l'extinction de la voix; tandis que l'ouverture accidentelle du canal aérien au-dessus de la *glotte* permet librement la production des sons. Ainsi, la voix est produite dans cette partie du *larynx* que mesurent les *arythénoïdes*; mais les



*ventricules du larynx*, ainsi que les ligaments supérieurs de la *glotte*, ont aussi un rôle important à remplir. Les limites de la région laryngienne, essentiellement destinée à la voix, sont donc les limites mêmes des mus-



Bouée acoustique (page 815).

cles *arythéno-thyroïdiens*, dont les bords supérieurs forment les ligaments supérieurs de la *glotte*. La *glotte* doit être contractée à un certain degré pour la production de la voix ; cette assertion a été déduite d'expériences qui la rendent aujourd'hui démontrée.

La contraction des muscles de la glotte produit-elle le son en faisant seulement varier le diamètre de cette ouverture, ou en rendant les bords de celle-ci susceptibles de vibrer sous l'influence de l'air? Si ce dernier mécanisme a lieu, les lèvres de la glotte vibrent-elles à la manière des cordes d'un violon, d'une guitare ou autre instrument analogue, ou bien à la manière des anches des instruments à vent? Enfin si le larynx peut être considéré comme un instrument à vent et à anche, la lame vibratile, placée à l'embouchure, a-t-elle la plus grande part aux variétés des tons, ou bien doit-on attribuer ces variétés aux changements que le conduit peut présenter dans toute sa longueur? Toutes ces opinions ont été avancées. Elles ont toutes pour base une analogie observée entre le mécanisme de la voix et celui de la formation des sons dans un instrument de musique; mais elles sont insuffisantes, en ce que les conditions diverses des instruments avec lesquels on a voulu établir une comparaison se trouvent réunies dans l'appareil de la voix.

Quelques expériences de Bichat, le célèbre physiologiste, permettent d'indiquer le mécanisme de la production du ton simple, abstraction faite de son acuité ou de sa gravité. Suivant cet illustre savant : 1° la *glotte* se resserre plus pour les sons forts et moins pour les sons faibles; 2° les bords de cette ouverture ne présentent aucune vibration appréciable, quelle que soit la force du son. L'inspection ne lui a rien appris sur ces vibrations, qu'il regarde pourtant comme probables, et auxquelles il pencherait à rapporter les divers degrés d'acuité ou de gravité; tandis que la différence du diamètre de l'ouverture ne lui paraît relative qu'à la force ou à la faiblesse de la voix. Il avoue, au reste, que la production des sons graves ou aigus sera longtemps un objet de théorie, attendu que les animaux soumis aux expériences ne rendent que des sons plus ou moins forts, plus ou moins faibles, et qui sont toujours étrangers à des gradations harmoniques. Ces expériences établissent donc d'abord que le son inarticulé et non modulé exige, suivant sa force, divers degrés de resserrement de la glotte, et non les vibrations manifestes des bords de cette ouverture. Dès lors, pour la formation du ton simple, le larynx pourrait être comparé à un instrument à vent du genre des flûtes.

Ce ne serait donc que pour la voix *modulée* ou pour les modifications relatives au ton, que l'on pourrait invoquer le mécanisme des instruments vibratiles à cordes ou à vent et à anche. Ferrein compara les lèvres de la glotte aux cordes d'un violon et leur donna le nom de *cordes vocales*. Le courant d'air est l'archet; les *cartilages thyroïdes*, les points d'appui; les *arythénoïdes*, les chevilles; et enfin les muscles qui s'y insèrent les puissances, destinées à tendre ou à relâcher les cordes. Cette théorie se prêtait

à de nombreuses objections : ainsi les lèvres de la glotte ne sont pas isolées, elles ne peuvent tout au plus se raccourcir que de trois lignes, ce qui ne suffirait pas pour la production de tous les tons de la voix humaine; elle ne rendait pas raison de l'élévation ou de l'abaissement du larynx à chaque changement de ton. Cependant cette théorie a été reproduite par M. Dutrochet, qui, à la vérité, ne considère plus les lèvres de la glotte comme des cordes d'instrument, mais auxquelles il reconnaît toutes les conditions qui peuvent faire changer à l'infini le nombre des vibrations. Le *larynx* est, selon lui, un instrument vibrant, mais non compliqué d'un tuyau; la gradation harmonique de la voix serait due aux vibrations des lèvres de la glotte par l'air de l'expiration; l'élévation ou l'abaissement du *larynx* ne contribuerait pas à la variété des tons, en faisant changer la longueur du tuyau vocal, mais en modifiant le diamètre de la glotte. La partie vibratile serait le muscle *thyro-arythénoïdien*. Cuvier rapporte aussi l'appareil aux instruments à vent. MM. Biot et Magendie admettent les conditions vibratiles qui ont été assignées aux lèvres de la glotte par M. Dutrochet; mais ils établissent que les bords de cette ouverture doivent être assimilés aux anches des instruments à vent, et les mouvements de totalité du *larynx* ne leur paraissent pas seulement relatifs aux divers degrés des diamètres de la glotte, ces mouvements contribueraient aussi à la différence des tons, en faisant varier la longueur et la largeur du tuyau vocal.

M. Savart assimile l'organe de la voix aux tuyaux de flûte, où le son est produit par le brisement de l'air, et dans lesquels le ton varie suivant la longueur du conduit, ou bien à l'instrument imitatif employé par les oiseleurs.

La *trachée-artère* a une grande influence sur la variété des tons, puisqu'elle joue dans l'appareil phonateur le rôle de *porte-vent*. La vitesse du courant d'air peut, en effet, être accrue par le resserrement de la *trachée* et des ramifications bronchiques. Le nombre des vibrations et l'espèce de ton sont déterminés aussi par le brisement de l'air contre les ligaments supérieurs de la *glotte*, qui remplissent la même fonction que le biseau des tuyaux d'orgue. D'autres causes inhérentes au *larynx* peuvent encore influencer sur la diversité des tons. Ainsi les *muscles intrinsèques* peuvent varier leurs contractions; de là résultent des différences, soit dans la tension et l'élasticité des parois de la *cavité vocale* et des rebords de ses orifices, soit dans les diamètres de ces derniers. Toutes ces circonstances paraissent contribuer simultanément à la variété des sons.

D'après leur étendue dans l'échelle musicale, on distingue les voix en six espèces : 1° Le premier dessus ou *soprano primo*; 2° le second des-

sus, *soprano secundo* ou *alto*; 3° le *contralto* (haute-contre); 4° le ténor ou *taille*; 5° le *baryton*; 6° la *basse*.

Le *timbre de la voix* dépend de la consistance et de la forme des parties où les vibrations sont excitées, puis répétées; ainsi le timbre qui caractérise la voix de la femme paraît tenir à la moindre consistance du *cartilage thyroïde* et à la forme arrondie du larynx. Le son varie aussi dans son timbre, suivant que les fosses nasales contribuent plus ou moins à entretenir les ondulations aériennes et à propager le son. C'est ainsi que la voix est *nasonnée* quand la destruction du palais détermine le son à sortir presque uniquement par la bouche, la cloison musculo-membraneuse ne partageant plus la colonne d'air pour en diriger une partie dans les *fosses nasales* et dans les sinus, où doit se produire une espèce d'écho.

Pour la voix modulée, les sons, nous venons de le voir, sont modifiés par la forme, les dimensions et la qualité plus ou moins vibratile du tuyau vocal; il en est autrement pour la *parole*, dans laquelle la colonne d'air expirée est brisée volontairement au delà du *larynx*, afin d'imprimer aux sons, par l'entremise de la bouche, de la langue, des dents, de la cavité nasale, des modulations particulières, auxquelles l'esprit attache autant d'idées spéciales. C'est à juste titre que ce brisement de la colonne d'air a été défini *l'articulation des sons*. La description du mécanisme au moyen duquel sont produits les sons élémentaires dont se composent les mots n'appartient pas à notre sujet; nous n'en parlerons donc pas.

**PHONOGRAPHE.** — M. Edison (1) a récemment inventé un instrument appelé *phonographe* (du grec *phonè*, voix, et *graphè*, j'écris), auquel est réservé peut-être un grand avenir, et dont le succès, à son apparition, a été prodigieux. Cependant, comme le remarque M. de Parville, cette machine est si simple de conception et de construction, qu'il n'est aucun physicien qui puisse s'étonner un instant, après l'avoir vue, des effets saisissants auxquels elle donne lieu. Elle est si singulièrement simple qu'on se demandera même maintenant comment on n'y avait pas songé plus tôt.

Une membrane vibrante (*fig. 380*) est placée à la base d'une embouchure. La membrane porte en son milieu un petit style qui vient s'ap-

(1) EDISON (Thomas), inventeur américain, né vers 1847. On lui doit de nombreux télégraphes, la plume électrique, un téléphone, un micronome, un microtasimètre, un autogramme, etc. Une compagnie puissante lui a construit, à Menlo-Park, un laboratoire admirable, où il est libre d'entreprendre les expériences les plus coûteuses. La subvention est, en quelque sorte, illimitée. Il dispose, par conséquent, de moyens inconnus en Angleterre et en France.

puyer sur un rouleau horizontal, un cylindre en cuivre de 0<sup>m</sup>,20 de longueur environ. Le rouleau est placé entre deux supports et monté sur une tige filetée. Quand, à l'aide d'une manivelle, on fait tourner la tige filetée, elle progresse comme une vis dans son écrou, entraînant le cylindre d'un mouvement de transport lent et régulier, en même temps qu'elle le fait tourner sur lui-même.

Tout le monde sait qu'un style appuyant sur un rouleau, qui tourne et se déplace en même temps, marque, sur la surface, une spire; de même, le style fixé à la membrane vibrante trace sur une feuille d'étain placée sur le rouleau de l'appareil une

rainure en spirale. Quand on parle, les vibrations de la membrane communiquent leur mouvement au style, qui va et vient à son tour, plus ou moins vite, et enregistre tout le long de la spirale des points plus ou moins accentués sur l'étain. Ces points constituent une véritable écriture, reproduisant chaque mot prononcé; ce sont comme des notes marquées sur l'étain. Quand on veut que l'appareil lise cette écriture, répète les sons, il suffit de tourner la ma-



Fig. 380. — PHONOGRAPHE.

manivelle et de faire revenir, à l'aide de la vis, le rouleau à son point de départ, et à faire tourner la vis comme on l'avait fait quand l'appareil enregistrait la conversation. Le style va de nouveau s'engager dans la rainure qu'il avait tracée; il va repasser sur les petites aspérités et les petits creux que la membrane, en vibrant, l'avait obligé à marquer sur la feuille d'étain; mais, en suivant les contours, il sera forcé tantôt de s'éloigner, tantôt de se rapprocher du rouleau; et, comme il est solidaire de la membrane, il faudra bien que celle-ci s'écarte de sa position et y revienne selon les allées et venues du style. Elle vibrera, et ses vibrations seront exactement la répétition de celles qui ont enregistré sur l'étain les contours suivis par le style. Chaque son sera répété, chaque mot sera prononcé avec toutes ses qualités distinctives de hauteur, de ton et de timbre.

On le voit, au fond, c'est un mécanisme qui présente un peu d'analogie avec celui des boîtes à musique et des orgues de Barbarie. Les notes sont enregistrées sur un rouleau à l'aide de petites aspérités. On

tourne la manivelle, et les aspérités se traduisent en musique. Seulement, ici, la machine prépare elle-même son rouleau et fait toute la besogne automatiquement.

**TROMPETTE MARINE. — BOUÉE ACOUSTIQUE.** — Nous parlerons plus longuement ci-après, en traitant des *phares*, des différents appareils imaginés pour rendre plus sûre la navigation dans le voisinage des côtes. Nous signalerons seulement ici deux appareils acoustiques précieux pour les services qu'ils rendent.

La *trompette marine* est un sifflet puissant, placé dans les phares, pour suppléer à la lumière qui pourrait ne pas être aperçue par les marins. Ordinairement ces trompettes sont mises en action par de l'air qui a été comprimé au moyen d'une machine à vapeur. Au phare du Four (Finistère), l'administration nationale des phares et balises a adopté une nouvelle disposition, imaginée par M. Lissajoux (*fig.* à la page 801).

L'appareil se compose : 1° de deux chaudières à vapeur verticales, accouplées, d'une force totale de 4 chevaux-vapeur ; 2° d'une trompette avec appareil d'entraînement d'air par jet de vapeur ; 3° d'un mécanisme de distribution, mû par la vapeur, destiné à ouvrir et à fermer périodiquement la communication des chaudières avec la trompette, de façon que le son se produise à raison d'un coup par cinq secondes ; 4° d'une horloge commandant le distributeur de vapeur de ce mécanisme. La trompette se fait entendre au dehors à travers un pavillon métallique logé dans une ouverture circulaire pratiquée à l'ouest dans le mur de la tour. La fumée du combustible se dégage par un tuyau en cuivre qui va se greffer sur le tuyau du fourneau de la cuisine, dans la coulisse ménagée à cet effet. Les chaudières ont la pression nécessaire à la mise en marche, vingt minutes au plus après l'allumage des feux. Les chaudières sont alimentées à l'eau douce ; leur consommation, avec le rythme adopté pour la trompette, est d'environ 25 litres par heure. L'eau est approvisionnée au moyen de la pompe aspirante et foulante, placée dans un caveau du phare, laquelle, puisant de l'eau douce dans les bateaux accostés à la roche, la refoule dans les vingt-deux caisses en tôle placées au premier étage, dont la capacité est de 1,500 litres pour l'eau destinée aux gardiens et de 3,750 litres pour l'eau destinée aux chaudières. Ces dernières peuvent être ainsi alimentées pendant cent cinquante heures de travail au moins, sans que l'approvisionnement soit renouvelé. L'eau des caisses est montée à la bache d'alimentation, dans la chambre de la trompette, au moyen d'un appareil injecteur que l'on met en marche par l'ouverture d'un robinet de prise de vapeur placé sur les chaudières.

On sait qu'une *bouée*, appelée aussi *amarque* ou *balise*, est un corps flottant en liège, en tonnes vides, en tôle, destiné à marquer sur la surface de la mer le lieu où a été jetée une ancre ; à signaler un écueil, un danger quelconque : la direction d'un chenal ou d'une passe difficile, ou à aider à sauver un homme tombé à la mer. On ajoute aux bouées une cloche que le mouvement des vagues agite, ou un petit sifflet mis en jeu par l'air chassé par l'agitation des vagues. A vrai dire, par temps calme, ces bouées acoustiques sont peu utiles ; par gros temps, on ne les entend guère. Un Américain, M. Courtenay, a construit une bouée acoustique qui paraît appelée à donner de brillants résultats (*fig.* à la page 809).

Il est généralement admis que la profondeur à laquelle l'eau est encore agitée est à peu près proportionnelle à la longueur de la vague mesurée. Une vague de 200 mètres de longueur à peu près agitera l'eau seulement jusqu'à environ 3 mètres de superficie. Les vagues les plus hautes que l'on ait observées au cap de Bonne-Espérance mesureraient 13<sup>m</sup>,75, soit 6<sup>m</sup>,9 au-dessus du niveau moyen, et autant à peu près en dessous. Les vagues de l'Océan, à une certaine distance de terre, dépassent rarement 6 mètres. Il résulte de là que l'on peut compter sur de l'eau calme à une profondeur de 5 à 6 mètres ; l'agitation y est insensible. En immergeant un tube d'une longueur suffisante, l'eau de mer qui pénétrera par le bas dans cette gaine abritée contre les mouvements de la surface sera immobile, un peu comme celle d'un puits ; son niveau restera constant ; autour du tube, la vague oscillera, mais ne transmettra pas son mouvement à l'eau intérieure. Dans ce tuyau, introduisons à frottement doux un autre tuyau fermé en haut et en bas et pouvant monter et descendre comme un piston. Enfin, à travers la base inférieure de ce tuyau mobile, perçons trois trous, dans lesquels nous engagerons trois petits tubes s'élevant du fond jusqu'au haut, et faisons-les passer à travers la cloison supérieure. Le petit tube central vient aboutir à un puissant sifflet ; les deux autres débouchent à l'air libre, mais portent chacun à leur base une soupape. Si l'on fait alors glisser le tuyau piston dans le tuyau enveloppe, l'air interposé entre le niveau de l'eau, dans le tuyau enveloppe et la base du piston, va se comprimer et fuir par le petit tube central jusque sous le sifflet. Les soupapes des deux autres tubes ouvrant de dehors en dedans restent closes. Mais soulève-t-on le tuyau piston, le vide se fait et l'air extérieur rentre par les tubes à soupape pour être comprimé bientôt par un nouveau mouvement de descente de piston, et ainsi de suite. On réalise ainsi une pompe à air comprimé. A chaque oscillation du tuyau inférieur, l'air est appelé, puis refoulé dans le sifflet.

Quant au mouvement d'élévation ou d'abaissement du piston dans sa

gaine, il est déterminé par une bouée. La bouée est calée sur le tube piston. Le tube enveloppe est maintenu à peu près immobile dans sa position verticale à l'aide d'une ancre et de chaînes ; il s'élève jusqu'au niveau moyen, c'est-à-dire à égale distance du creux et de la crête des vagues. La bouée qui coiffe le tube piston est installée précisément dans la zone d'action de la vague ; elle oscille donc avec elle, monte et descend entraînant le piston intérieur. La vague ne cessant de se produire, courte ou longue, petite ou haute, l'appareil ne cessera de fonctionner. Il y aura des intervalles variables, entre les sons, selon les vagues ; mais l'intensité des sons restera constante, car elle ne dépend que du poids de la bouée et de la longueur du tube.

Dans les expériences déjà faites, le bruit du sifflet a été entendu à 9 milles sous le vent, à 3 milles au vent, et à 6 milles, vent de travers, soit dans un rayon de 3 milles  $\frac{3}{4}$ . Dans les parages dangereux, il n'y aurait rien de si simple que d'installer des bouées automatiques donnant des notes distinctes.

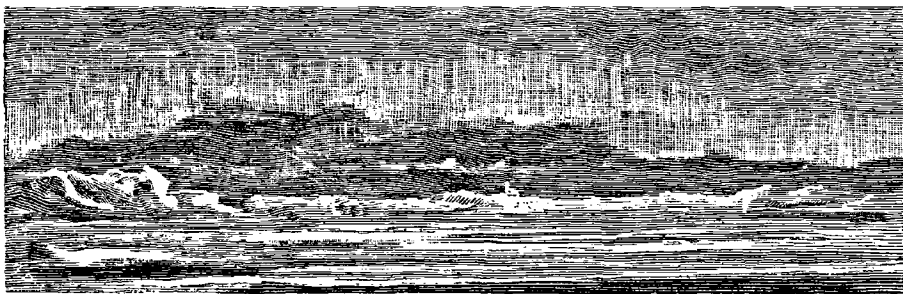




PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES







## LIVRE V

### ÉLECTRICITÉ STATIQUE

---

#### CHAPITRE PREMIER

##### PRINCIPES FONDAMENTAUX — ÉLECTRICITÉ

##### DÉVELOPPÉE PAR LE FROTTEMENT

**INTRODUCTION.** — En sortant de l'*Exposition d'Électricité*, qui se tint en 1881 à Paris, Victor Hugo, répondant à un ami qui lui demandait de formuler son impression, dit, avec ce ton de simplicité émue, qui est comme la musique de son âme :

« Je pense que l'homme est en marche vers un avenir extraordinaire. L'électricité, qui a produit, par la création du télégraphe, une sorte d'élargissement de la patrie, lui donnera l'étendue du globe. Nous aurons la patrie partout.

» L'audition, la vision des milieux animés pourront être, d'un geste, transportées au loin : de là, suppression complète de tous les exils, et, par suite, solution de la question sociale.

» C'est une erreur de dire que les malheureux n'ont rien en naissant. Tout homme naît propriétaire. Il suffit qu'il consente à se déplacer pour aller prendre possession de son bien... La moitié du globe habitable est inhabitée. Pourquoi laisser toutes ces terres en friche ? Pourquoi négliger des trésors qui s'offrent à ceux qui viendront les chercher ? Les féeries de l'avenir, en transportant sur tous les points du globe la vie même de la patrie, diminueront les répugnances des prolé-

taires pour une émigration qui n'est que fictive, car l'existence terrestre a, pour champ d'activité, toute la terre et non pas seulement tel ou tel coin du globe.

» Ce n'est pas tout encore. Le jour est proche où la surface du globe sera aménagée pour emmagasiner la chaleur solaire ; or, qu'est-ce que la chaleur ? C'est la lumière, c'est le mouvement. Transformée en électricité, cette chaleur sera distribuée partout, éclairant la nuit les voies publiques, faisant tourner les machines, trainant les locomotives. A-t-on calculé ce que l'on pouvait tirer de la puissance du soleil ?...

» J'ai dit cela il y a quarante ans, et je le redis aujourd'hui. L'avenir sera splendide, équitable, libérateur. Il sera beau et bon. Vous verrez ces merveilles, vous qui êtes jeunes. Moi, je ne les verrai pas, mais je sais qu'elles seront. »

Ce sont ces merveilles de la science électrique que nous allons décrire dans cette partie de l'ouvrage, en indiquant les principes sur lesquels s'appuie chacune des inventions miraculeuses qui éclosent chaque jour, depuis quelques années ; en développant les théories qui les expliquent, et qui, seules, peuvent indiquer la route à de nouveaux progrès.

Comme l'a dit fort justement M. Becquerel, chaque branche de la physique a eu ses phases de gloire, ses temps de repos et ses recrudescences, qui tour à tour en ont reculé les limites. Depuis près d'un siècle, l'électricité est en voie de progrès et nul ne peut savoir où s'arrêteront ses découvertes. C'est aujourd'hui un monde nouveau ouvert à l'activité de l'intelligence humaine. Mais une science n'est formée qu'autant qu'elle possède des principes simples et des lois qui permettent d'y rattacher des faits nouveaux. L'électricité, sous ce rapport, n'a point encore atteint son apogée ; quelques-unes des parties dont elle se compose sont soumises à des lois plus ou moins simples, qui permettent d'en déduire les principales conséquences, lesquelles sont confirmées par l'expérience. Mais il en est autrement d'autres parties : on peut citer notamment l'électro-chimie, qui rattache la chimie à la physique par de nouveaux liens ; elle embrasse une foule de phénomènes complexes dont on ne peut donner toujours une explication complètement satisfaisante. Les phénomènes calorifiques de l'électricité, en ce qui concerne particulièrement leur production, l'électromagnétisme, sont également dans ce cas.

Nous nous garderons donc de présenter au lecteur les espoirs plus ou moins fondés des théoriciens contemporains : il nous suffira de constater ce qui est parfaitement acquis à la science, en indiquant surtout les principales des plus récentes applications de l'électricité et du magnétisme.

**ÉLECTRICITÉS STATIQUE ET DYNAMIQUE.** — L'étude de l'électricité se partage en deux grandes divisions : l'une qui comprend les phénomènes de l'électricité statique, c'est-à-dire en repos, à l'état de *tension* à la sur-

face des corps, et dont le frottement est une des principales causes de développement; l'autre embrasse les phénomènes de l'*électricité dynamique*, c'est-à-dire en mouvement, qui résulte surtout d'actions chimiques. L'électricité statique se manifeste en produisant des attractions et des étincelles; l'électricité dynamique, appelée aussi *électricité voltaïque*, parcourt les corps sous forme de *courant*, avec une rapidité inouïe, et se distingue particulièrement de l'électricité statique par les phénomènes chimiques qui l'accompagnent et par ses relations avec le *magnétisme*.

Nous parlerons dans cette première partie de l'*électricité statique*, en la considérant comme spécialement produite par le frottement, et nous dirons qu'un corps est *électrisé* lorsqu'il peut attirer des corps légers et produire des effets lumineux.

**DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ PAR LE FROTTEMENT.** — Nous avons rapporté (tome I<sup>er</sup>, page 18) que les anciens avaient remarqué la propriété qu'avait le *succin* d'attirer les objets légers, lorsqu'il avait été frotté; mais qu'ils n'avaient point fait de recherches pour s'assurer si d'autres matières ne jouissaient pas de la même propriété, qu'ils n'expliquaient d'ailleurs aucunement. Ce fut au xvi<sup>e</sup> siècle seulement que Gilbert (1) appela l'attention des savants sur cette force attractive développée par le frottement, non seulement dans le succin, mais dans un grand nombre de corps, et publia une liste des substances qui ont la même propriété que le succin. Parmi ces substances, on voit figurer d'une part le verre, les pierres précieuses artificielles, etc.; de l'autre les résines, la gomme laque, la colophane, le mastic, le soufre, etc. C'est à ces deux groupes de substances que l'on emprunta, par la suite, la division de l'électricité en *vitrée* et en *résineuse*. Gilbert donnait en même temps une liste des substances qui n'acquièrent dans aucun cas la propriété d'attirer les objets légers : les perles, l'albâtre, le porphyre, la silice, l'ivoire, les os, les bois durs, les métaux, etc. De là une nouvelle division des substances *idio-électriques* et des substances *anélectriques*, division abandonnée depuis, car Gilbert se trompait sur ce point; en effet l'*électricité* est répandue dans tous les corps, quels qu'ils soient, et dans les plus petites parties de chacun.

A première vue, il est vrai, le frottement ne développe pas d'électricité dans un grand nombre de substances, particulièrement dans les métaux. Que l'on frotte une barre de fer avec un morceau de flanelle,

(1) GILBERT (Guillaume), savant anglais (1540-1603), médecin de la reine Élisabeth et de Jacques I<sup>er</sup>. Son grand ouvrage, premier pas de la science de l'électricité, intitulé : *De l'aimant et des corps aimantés, etc.*, fut publié en 1600. Il écrivit encore d'autres ouvrages qui ont été réunis sous le titre de : *Philosophie nouvelle touchant le monde sublunaire*; il y explique tout par le magnétisme.

par exemple, cette barre de fer n'attirera pas les corps légers. Nous verrons ci-après que certaines conditions sont nécessaires pour que l'électricité se manifeste dans ces substances.

Un corps solide peut être électrisé par son frottement avec un gaz ou un liquide : dans le vide du tube barométrique le frottement du mercure électrise le verre, qui apparaît lumineux dans l'obscurité.

Wilson observa qu'en dirigeant un courant d'air sur une tourmaline (1), ou sur un morceau de résine ou de verre, ces substances sont électrisées ; mais Faraday a reconnu depuis que cet effet se produit seulement si l'air est humide ou tient en suspension de la poussière.

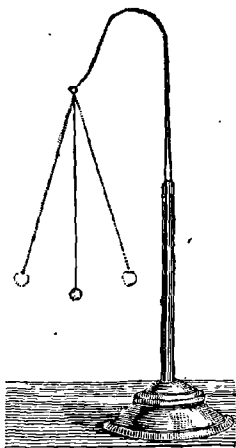


Fig. 1<sup>re</sup>.

PENDULE ÉLECTRIQUE.

On reconnaît qu'un corps est électrisé au moyen d'appareils appelés *électroscopes* (page 21), dont le plus simple est le *pendule électrique* (fig. 1<sup>re</sup>). Ce petit appareil consiste en un support à pied de verre auquel est attaché un fil de soie portant à son extrémité une petite balle en moelle de sureau. Lorsqu'on approche le corps électrisé, la petite boule s'écarte aussitôt de sa position d'équilibre ; d'abord attirée, elle est immédiatement repoussée ensuite. Si alors on enlève à la petite boule l'électricité qu'elle a prise, en

la touchant avec les doigts, elle redevient susceptible d'être attirée de nouveau.

**CORPS BONS OU MAUVAIS CONDUCTEURS. ÉLECTRICITÉ POSITIVE, ÉLECTRICITÉ NÉGATIVE.** — Si l'on présente au pendule électrique un bâton de cire d'Espagne frotté par un de ses bouts, on remarque qu'il attire les balles de sureau seulement par ce bout frotté, et que l'autre n'exerce aucune influence attractive ou répulsive. Il en est de même avec du verre, du soufre, de la craie, du papier sec, etc. On a déduit de ce fait que dans ces corps la propriété électrique ne se propage pas d'un point à l'autre, ce que l'on exprime en disant que ces corps ne *conduisent* pas l'électricité, qu'ils sont *mauvais conducteurs* ou *isolants*. Dans d'autres corps, au con-

(1) On comprend sous le nom de *tourmaline* diverses substances qui sont toutes des boro-silicates alumineux de bases différentes, ayant la propriété de cristalliser en prismes à douze pans, terminés par des sommets à trois faces principales, l'un des sommets ayant toujours plus de faces que l'autre. La couleur de ces pierres est noire, verte, jaune, rouge, bleue ou violette ; il y en a même d'incolores. Les variétés translucides vertes servent aux instruments d'optique ; les variétés bleues et vertes, quand elles sont transparentes et sans défaut, sont estimées en bijouterie. On s'en sert pour les expériences de physique (électricité et lumière) ; on en trouve dans les roches primitives, dans les montagnes du Tyrol, de la Suisse, de l'Espagne, etc.

traire, l'électricité développée en un point quelconque se propage immédiatement et se manifeste sur tous les points de leur surface : ceux-ci sont appelés *bons conducteurs*. Il est difficile d'exprimer par des nombres les rapports de conductibilité des différents corps ; mais on peut assigner à peu près l'ordre dans lequel ils doivent être placés, d'après leur pouvoir conducteur ou d'après leur faculté isolante :

## CORPS CONDUCTEURS

Tous les métaux.	Fluides animaux.	Chanvre.
Charbon calciné.	Eau de mer.	Animaux vivants.
Plombagine.	Eau de source.	Flamme.
Acides concentrés.	Eau de pluie.	Fumée.
Acides étendus.	Neige.	Vapeur.
Solutions salines.	Végétaux vivants.	Terres humides.
Minerais métalliques.	Lin.	Pierres humides.

## CORPS ISOLANTS

Gomme laque.	Gemmes.	Porcelaine.
Ambre.	Soie.	Marbre.
Résines.	Cheveux.	Camphre.
Soufre.	Laines.	Caoutchouc.
Cire.	Plumes.	Gutta-percha.
Jais.	Papier sec.	Craie.
Verre.	Parchemin.	Chaux.
Mica.	Cuir.	Phosphore.
Diamant.	Bois chauffé.	Huiles.

Étienne Gray (1) observa le premier que les corps électrisés reviennent instantanément à l'état neutre aussitôt qu'ils touchent la terre ou qu'ils sont mis en communication avec elle, soit par une tige métallique, soit par des supports de bois, de pierre, ou par des substances humides quelconques ; mais que, au contraire, ces mêmes corps, posés sur du verre, de la soie, de la résine, du soufre, conservent longtemps leur électricité ; qu'il y avait donc des corps *bons conducteurs*, donnant un libre écoulement au fluide électrique vers la terre, qu'on appelle alors *réservoir commun* ; d'autres, au contraire, *mauvais conducteurs*, qui s'opposent à son passage.

(1) GRAY (Étienne), savant physicien anglais (1662-1736). Il s'occupa tout particulièrement d'électricité, et ses travaux fournirent la route à l'invention de la bouteille de Leyde. Il projetait une espèce de *planétaire* lumineux et électrique. Ses travaux ont été publiés dans les *Philosophical Transactions*.

Les *Philosophical Transactions* sont un recueil mensuel publié par la Société royale de Londres depuis 1665, et composé de mémoires et d'observations sur les sciences naturelles et les mathématiques. Ce recueil est analogue à nos *Annales de l'Académie des sciences*.

Ce physicien essayait vainement, depuis quelque temps, de communiquer aux métaux la vertu attractive par la chaleur, par le martelage et le frottement, quand il se rappela, en mars 1729, une idée qui lui était venue, il y avait quelques années, à savoir : que le tube de verre qui, à l'approche d'un corps rendait des étincelles, devait transmettre de l'électricité à ce même corps (1). Ce fut le point de départ de la découverte de la *conductibilité électrique*. Ses expériences avaient pour but de s'assurer si, en fermant les deux extrémités du tube de verre avec des bouchons de liège, on modifiait les résultats obtenus. Il ne remarqua aucun changement sensible. Mais en approchant un duvet du bout supérieur du tube, il le vit brusquement s'attacher au bouchon, puis en être repoussé, comme si l'action avait été produite par le tube même. Il répéta cette expérience à diverses reprises avec le même succès, et il en conclut que l'électricité du tube avait été communiquée au bouchon. Or, en juin 1729, Gray reçut la visite de Wheeler, savant physicien de ses amis, et le mit au courant de ses recherches. Ces deux physiciens firent alors des expériences en commun pour savoir si *l'électricité pouvait se propager à de grandes distances*. A cet effet, ils imaginèrent, en juillet 1729, de soutenir horizontalement un cordonnet de chanvre avec un fil de soie, dans la pensée que ce fil, ne laissant échapper, à raison de son petit diamètre, que très peu d'électricité, la plus grande quantité de cet agent serait transmise par le cordonnet de chanvre. Ce cordonnet, qui avait 80 pieds de longueur, passait sur le fil de soie de manière que l'une de ses parties, longue seulement de quelques pieds, descendait verticalement, en portant une boule d'ivoire attachée à son extrémité ; l'autre partie s'étendait le long d'une grande galerie, dans une direction horizontale, jusqu'au tube de verre, auquel on l'avait attachée. L'un des physiciens frottait le tube, pendant que l'autre constatait qu'un duvet, placé sous la boule, était alternativement attiré et repoussé par elle. Le fil de soie s'étant rompu, Gray, qui n'en avait pas d'autre sous la main, y substitua un fil métallique, et dès ce moment tout effet disparut. Les deux physiciens comprirent que l'obstacle qu'avait opposé le fil de soie à la perte de l'électricité dépendait, non pas de la finesse du fil, mais de la nature de la matière. De là il n'y avait qu'un pas à faire pour diviser les corps en *conducteurs* et *non conducteurs* de l'électricité. Mais cette division préoccupait l'esprit de ces physiciens beaucoup moins que la démonstration que l'électricité peut se répandre sur des surfaces aussi étendues que variées de formes, et se propager à de grandes distances.

(1) Hoeller, *Histoire de la Physique*.



Ce fut Désaguliers qui, s'étant livré à des expériences sur l'électricité presque en même temps que Gray, fit ressortir l'étrange de ces phénomènes.



Dans un mémoire publié en juillet 1739 dans les *Philosophical Transactions*, il classa les corps en *électriques* ou *mauvais conducteurs*, et en *non électriques* ou *bons conducteurs*.

• Dès que les expériences de Gray furent connues en France,

PHYS. ET CHIM. POPUL.

Liv. 104.

Dufay (1), de même que Désaguliers (2), se mit à les répéter avec soin. Il remarqua, comme Gray, qu'on peut tirer des étincelles de tous les corps, qu'ils peuvent tous attirer des corps légers, que tous, en un mot, sont susceptibles d'être électrisés, si l'on interposait entre eux et la terre, réservoir commun, certaines substances mauvaises conductrices qui les isolassent, et ainsi empêchassent l'écoulement de l'électricité. Il montra aussi qu'on peut tirer des étincelles électriques d'un corps vivant. A cet effet, il se suspendit lui-même librement à l'aide de cordons de soie; et, pendant qu'il restait ainsi suspendu, les personnes qui s'approchaient de lui tiraient de son visage, de ses mains, de ses pieds, de ses vêtements, enfin de toutes les parties de son corps, des étincelles, accompagnées d'une sensation de piqûre et d'un bruit de péttillement. Il ajouta que la sensation de piqûre que ces personnes disaient éprouver, il l'éprouvait lui-même, et que le bruit de péttillement se manifestait, dans l'obscurité, sous forme d'étincelles. « Je n'oublierai jamais, dit l'abbé Nollet, dans ses *Leçons de physique*, la surprise de M. Dufay, que je partageai moi-même, quand je vis pour la première fois sortir du corps humain une étincelle électrique. » L'enthousiasme fut chez tous extrême: les poètes chantèrent le prodige nouveau; Delille s'écria:

D'un air mêlé d'audace et de témérité,  
Souvent sur l'isoloir une jeune beauté  
Se place en rougissant, curieuse et tremblante :  
A peine elle a touché la baguette puissante,  
Autour d'elle le feu jaillit à longs éclairs ;  
La flamme en jets brillants s'élançe dans les airs,  
Se joue innocemment autour de sa parure,  
Glisse autour de son cou, baise sa chevelure ;  
La belle voit sans peur ces flammes sans courroux,  
Et dans le cercle entier répand un feu plus doux.

Nous venons de dire que, pour s'assurer si un corps était électrisé, on l'approchait du *pendule électrique*, et que le corps électrisé attirait

(1) DUFAY (Charles-François DE SISTERNAY), savant français (1698-1739), accompagna le cardinal de Rohan dans son ambassade à Rome, et devint antiquaire en admirant les débris de cette capitale. Reçu membre de l'Académie des sciences, il présenta des mémoires sur toutes les sciences dont s'occupait ce corps savant, géométrie, astronomie, physique, etc. Il fut le premier directeur du Jardin des Plantes et fit de cet établissement, jusqu'alors négligé, le plus beau jardin de l'Europe. Il obtint que Buffon lui succédât dans l'intendance générale.

(2) DÉSAGULIERS (Jean-Théophile), né à La Rochelle (1683-1744), fils d'un ministre protestant que la révocation de l'édit de Nantes força de passer en Angleterre. Il étudia à Oxford sous le célèbre mathématicien écossais Keilly, et fut reçu pasteur en 1717. Il fit à Londres, puis en Hollande, de 1710 à 1740, des conférences pour populariser les découvertes de Newton, et devint membre de la Société royale. Il a publié ses leçons sous le titre de : *Cours de physique expérimentale*.

d'abord à lui la petite balle de sureau, puis, après le contact, la repoussait. Que l'on fasse cette expérience avec un tube de verre ou avec un bâton de cire, frottés l'un et l'autre avec un morceau de drap, le même effet se produit pour l'une et pour l'autre de ces deux substances. Mais si on approche le bâton de cire de la balle de sureau électrisée par le verre, puis repoussée par lui, celle-ci est vivement attirée. Réciproquement, si on présente le tube de verre à la balle de sureau électrisée par le bâton de cire, puis repoussée par lui, il y aura encore attraction. Il y a donc deux sortes d'électricité : l'une qui se développe par le frottement du verre, que l'on appelle *électricité vitrée* ou *positive* et que l'on représente par le signe +, et l'autre qui se développe par le frottement d'une résine, que l'on appelle *électricité résineuse* ou *negative* et que l'on indique par le signe —.

C'est à Dufay que l'on doit l'établissement de ces deux électricités, vaguement indiquées par Gilbert. Il y fut conduit, en 1734, par une expérience, souvent répétée depuis dans les cabinets de physique, expérience faite à l'aide d'un électroscope plus sensible que le *pendule électrique* et qui porte le nom d'*électroscope à feuilles d'or*.

Cet instrument se compose (*fig. 2*) d'une cloche de verre reposant sur un plateau de cuivre, percée à son sommet d'une ouverture que ferme un tampon de matière mauvaise conductrice et recouvert d'un vernis isolant, ainsi que toute la partie supérieure de la cloche. A travers ce tampon passe une tige de cuivre terminée extérieurement par une petite boule de même métal, et supportant à l'intérieur de la cloche deux petites feuilles d'or battu extrêmement légères. Si l'on approche de la boule de cuivre le corps que l'on soupçonne chargé d'électricité, une décomposition par influence se produit (page 30) ; l'électricité de nom contraire à celui du corps en expérience est attirée dans le bouton, le fluide du même nom est repoussé dans les feuilles d'or ; celles-ci, chargées d'une même électricité, se repoussent et divergent. On constate ainsi que le corps est électrisé. Pour reconnaître la nature du fluide qu'il contient, on touche le bouton avec le doigt pendant que l'appareil est soumis à l'influence du corps sur lequel on opère ; les feuilles d'or retombent aussitôt et l'appareil ne contient plus que l'électricité accumulée dans le bouton et qui est de nature contraire à celle du corps. On enlève alors le doigt, puis le corps électrisé. L'électricité cesse d'être attirée dans le bouton, elle se répand sur la tige et sur les feuilles d'or, celles-ci divergent. On approche alors une sub-

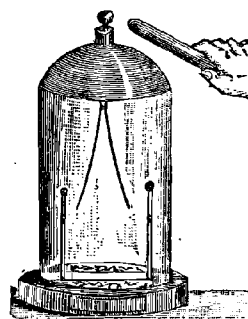


Fig. 2.

ÉLECTROSCOPH  
A FEUILLES D'OR.

stance d'électricité connue, un bâton de résine par exemple, chargé par frottement d'*électricité négative*. Si l'on voit les feuilles d'or diverger davantage, c'est que le corps en expérience était chargé d'*électricité positive*, car l'électricité de l'appareil, étant de plus en plus refoulée dans les feuilles d'or, est négative. Si les feuilles d'or retombent, c'est que l'électricité de l'appareil est positive, qu'elle quitte les feuilles d'or, parce qu'elle est attirée dans le bouton; l'électricité du corps considéré était donc *négative*.

Nous avons décrit cette expérience telle qu'elle s'exécute aujourd'hui; mais c'est seulement par des tâtonnements multipliés que Dufay put établir d'abord qu'il y avait deux électricités différentes, puis ce principe fondamental:

1° *Deux corps chargés de la même électricité se repoussent;*

2° *Deux corps chargés d'électricités contraires s'attirent.*

Ces deux principes se formulent plus simplement, en disant: *Les électricités de même nom se repoussent, les électricités de nom contraire s'attirent.*

**THÉORIES.** — Pour expliquer les phénomènes électriques, on a émis de nombreuses théories. Suivant Gilbert, l'électricité consiste dans les effluves qui prennent naissance dans certains corps et qui auraient pour effet l'attraction d'autres corps. Cette action serait comparable à celle de deux gouttes d'eau qui, en se rapprochant, finissent par se confondre. Si les métaux ne sont pas électrisables, disait-il, cela tient à ce que les effluves qu'ils émettent sont d'une nature trop grossière, terrestre. R. Boyle, qui introduisit dans la science le mot nouveau *électricité*, jusqu'alors fort peu employé, partait de l'hypothèse que l'électricité est un effluve de nature visqueuse, et il trouva que le résidu de la distillation de l'essence de térébenthine et de beaucoup d'autres huiles essentielles est aussi électrique que le succin, et plus encore que le verre. Il remarqua aussi qu'une substance électrisée attire indifféremment tous les corps, qu'ils soient électriques ou non.

Les théories de Descartes et de Gassendi sur l'électricité n'ont aucune valeur scientifique; elles sont purement imaginaires. Jusqu'à Dufay, nul fait nouveau n'amena de nouvelles théories, et, quand ce physicien eut établi la loi d'attraction et de répulsion des électricités, il supposait que, par le frottement ou la communication, il se forme un tourbillon autour du corps électrisé; qu'un corps à l'état naturel, placé dans le tourbillon, est attiré jusqu'au contact par le corps électrisé, et qu'alors il s'électrise de la même manière; que deux corps électrisés de la même manière sont

environnés de tourbillons qui se repoussent, tandis que les tourbillons des deux électricités différentes s'attirent. Enfin, par ces deux électricités et par les tourbillons qu'elles devaient former autour des corps, Dufay cherchait à expliquer les mouvements d'attraction, de répulsion et les étincelles électriques, seuls phénomènes connus de son temps. Watson, ayant remarqué que la personne qui produisait l'électricité par le frottement du verre était capable d'émettre des étincelles, aussi bien que la personne qui touchait au fil conducteur isolé, disait que « l'électricité de l'une des personnes était moins dense qu'à l'état naturel, tandis que l'électricité de l'autre était plus dense, de telle sorte que l'électricité entre ces deux personnes devait être beaucoup plus différente qu'entre l'une d'elles et une personne sur le sol. » Ce fut ainsi qu'il trouva ce que Franklin observait à la même époque en Amérique, et qu'on a désigné par plus (+) ou moins (—) d'électricité.

Gallabert, physicien de Genève (1712-1768), attribua l'un des premiers l'électricité à un fluide particulier, à une espèce d'éther, ayant quelque analogie avec le feu. D'après sa théorie, « la densité du fluide électrique n'est pas la même dans tous les corps : plus rare dans les corps denses, il est plus dense dans les corps rares ; les corps frottés ont un mouvement *moléculaire* qui attire et chasse le fluide électrique. Ce fluide, apportant de la résistance à la condensation, devient plus dense, et, pour ainsi dire, plus élastique, à mesure qu'il s'éloigne, par ondulation, du corps frotté, et il se forme, autour de ce corps, une *atmosphère électrique* plus ou moins étendue, dont les couches les plus denses sont vers la circonférence, et diminuent graduellement de densité jusqu'au corps électrisé. Par suite des mouvements moléculaires, l'atmosphère électrique éprouve des condensations et des raréfactions à l'aide desquelles les corps placés dans la sphère d'activité sont attirés et repoussés. »

Cette théorie du physicien genevois fut adoptée par un grand nombre de savants. Ce qu'il y a de remarquable, c'est qu'elle tend à assimiler l'électricité au mouvement, en la rapportant aux mouvements moléculaires de la matière. Comme nous l'avons dit (tome I<sup>er</sup>, page 390), c'est là l'hypothèse moderne générale.

Pour expliquer les phénomènes électriques, Franklin suppose pour cause de l'électricité un fluide unique, impondérable, animé de répulsion pour ses propres molécules et d'attraction pour les molécules de la matière, en admettant que tous les corps renferment à l'état latent une quantité déterminée de ce fluide : quand cette quantité augmente, les molécules de ce corps sont électrisées *positivement* et possèdent les propriétés de l'électricité vitrée ; quand cette quantité diminue, elles sont

électrisées *négativement* et possèdent les propriétés de l'électricité résineuse. Alors de même qu'en algèbre  $+ a - a = 0$ , de même, en donnant à un corps qui possède une certaine quantité d'électricité positive une quantité d'électricité négative, on obtient un état *neutre*.

Symmer (1) oppose à cette théorie celle des deux fluides électriques qui présentent chacun le caractère de répulsion pour ses propres molécules et d'attraction pour celles de l'autre. Selon ce physicien, ces deux fluides existent dans tous les corps à l'état de combinaison en formant ce qu'il appelle le *fluide neutre* ou *naturel*. Diverses causes, et particulièrement le frottement et les actions chimiques, peuvent les séparer, et alors apparaissent les phénomènes électriques; mais ils tendent à se réunir de nouveau pour constituer de nouveau le fluide neutre.

En résumé, dit M. Hoeffler, toutes les théories se ramènent à ces deux dernières hypothèses : 1° celle d'un fluide unique qui se trouverait naturellement répandu dans tous les corps; 2° celle de deux fluides, dont l'excès de l'un ou de l'autre donnerait l'électricité positive et l'électricité négative.

Ces deux hypothèses ont été également défendues et attaquées. « Pourquoi, disent les partisans de la première, introduire deux matières inconnues, si une seule suffit pour expliquer tous les phénomènes? Il ne faut pas, selon l'usage des anciens, multiplier les êtres sans nécessité. Dans la décharge d'une bouteille de Leyde à travers deux pointes placées l'une au-dessus de l'autre des deux côtés d'une carte (page 58), on voit toujours l'électricité positive se mouvoir le long de la carte pour la percer vis-à-vis de la pointe électrisée négativement. S'il y avait deux électricités, elles devraient se mouvoir chacune de son côté pour se réunir. Si l'on électrise un corps avec une électricité, et qu'on neutralise son action avec l'autre électricité, qu'on lui ajoute de nouvelle électricité de la première espèce, puis de l'électricité opposée, et cela indéfiniment, lorsque les quantités des deux électricités ont atteint des proportions telles qu'elles se neutralisent mutuellement, on n'aperçoit aucun changement dans les propriétés du corps, quelle que soit la quantité des deux électricités qu'on lui a ajoutée. Cependant tous les faits connus jusqu'à présent prouvent que le changement dans les proportions de l'un des composants d'un corps altère au moins quelques-unes de ses propriétés. »

A cela, les partisans de la seconde hypothèse répondent « que les phénomènes s'expliquent mieux avec deux électricités qu'avec une seule;

(1) SYMMER (Robert), savant anglais (1691-1763), membre de la Société royale de Londres, s'occupa tout particulièrement d'électricité.

qu'en diminuant la densité de l'air par la décharge d'une bouteille de Leyde entre deux pointes le long d'une carte, on voit le point percé s'éloigner de la pointe négative et se rapprocher de la pointe positive, à mesure que la densité de l'air diminue; qu'en perçant un carton par la décharge d'une bouteille de Leyde, il y a des bavures, des espèces de bourrelets, formés sur les deux faces, comme s'il eût existé deux courants différents. »

Enfin Grove (1) et Faraday considèrent les phénomènes électriques comme une sorte de polarisation moléculaire de la matière ordinaire qui se dirige, par attraction ou par répulsion, dans une direction déterminée. « Il est très probable, dit M. de La Rive (2), dans son *Traité d'électricité*, qu'au lieu d'être un ou deux fluides spéciaux, l'électricité n'est qu'une modification dans l'état des corps, laquelle probablement dépend de l'action mutuelle exercée entre elles par les molécules pondérables de la matière dans ce fluide subtil qui les enveloppe de toutes parts, que l'on désigne sous le nom d'*éther*, et dont les mouvements produisent la lumière et la chaleur. »

Plus loin, ce physicien ajoute : « Tous les phénomènes relatifs à l'électricité positive ou négative s'expliquent par l'action probable et la réaction d'une force capable de se manifester à divers degrés dans différentes substances : cela semble plus vrai que par l'hypothèse des fluides impondérables. Les deux forces opposées de l'électricité ressemblent à l'action et à la réaction qui sont toujours jointes. »

Une des curiosités de l'Exposition d'électricité de 1881 était, dans la section norvégienne, un appareil imaginé par M. Bjerknæss, dans le but de rendre compte des phénomènes électriques suivant cette hypothèse.

(1) GROVE (William-Robert), célèbre physicien anglais (1811-1878). D'abord avocat, il abandonna bientôt le barreau pour l'étude des sciences, où il se fit un grand nom. Nommé en 1852 conseiller de la reine, comblé de toutes les distinctions honorifiques, créé chevalier, vice-président de la Société royale de Londres, il s'est toujours occupé de sciences et particulièrement de l'électricité. C'est là où il expose, avec une grande lucidité, que toutes les forces de la nature sont tellement liées entre elles que l'une ne peut se produire qu'aux dépens des autres; qu'il y a des relations nécessaires définies, équivalentes; qu'elles dépendent des mouvements moléculaires de la matière même et non de fluides particuliers hypothétiques. C'est là la doctrine des savants modernes non intéressés à des préjugés. Son grand ouvrage : *Corrélation des forces physiques*, publié à Londres en 1843, et traduit en français trois ans plus tard, en 1846, par M. l'abbé Moigno, est le résumé de ses leçons à l'Institution royale de Londres.

(2) LA RIVE (Auguste DE), physicien distingué de Genève, fils et petit-fils de savants physiciens, membre correspondant de l'Institut de France et de la Société royale de Londres. Au moyen d'une multitude d'expériences, conduites avec une admirable sagacité, il concourut plus qu'aucun autre à faire triompher la théorie électro-chimique. Son fils, M. Lucien de La Rive, est lui-même un physicien de mérite.

Il plonge dans une cuve remplie d'eau deux cylindres dont les bouts sont en caoutchouc, et qu'il fait vibrer à l'aide d'une soufflerie d'air à mouvement alternatif. Ces cylindres se comportent de la même manière que deux corps électrisés. Si les phases des vibrations sont les mêmes, ils se repoussent; si elles sont opposées, ils s'attirent. Rien n'est plus curieux que ces phénomènes qui ressemblent à ceux qu'exécutent des enfants quand ils promènent un cygne de métal aimanté dans une cuvette pleine d'eau.

L'hypothèse de Symmer étant cependant la plus commode pour expliquer les phénomènes électriques, elle est généralement admise, en France surtout, dans les écoles. Comme il ne s'agit que d'hypothèses, nous continuerons à exposer les phénomènes, en admettant deux fluides dont la combinaison forme l'état neutre des corps; mais sans dissimuler que nous parlons seulement par hypothèse, pour la commodité et la clarté du discours et que la théorie de Grove et de Faraday est aujourd'hui considérée comme la plus probable.



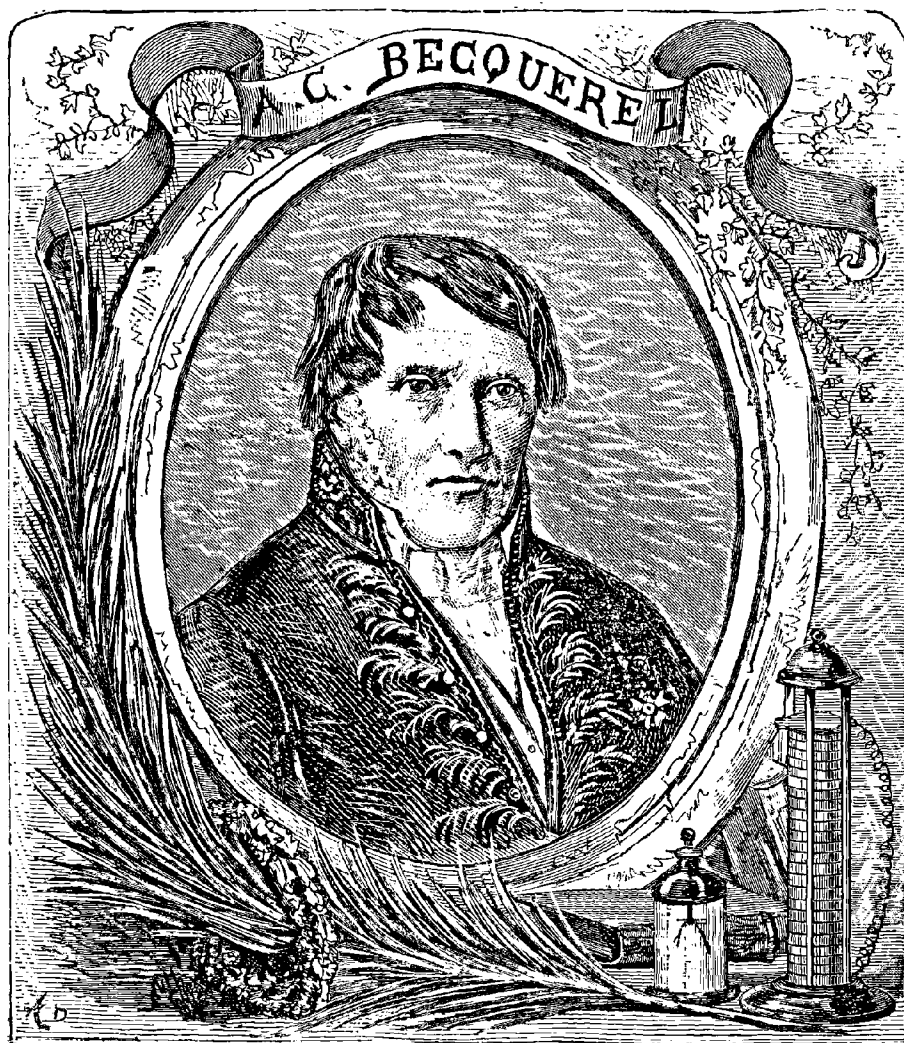
Fig. 3. — PRODUCTION SIMULTANÉE  
DES DEUX ÉLECTRICITÉS.

**LOIS DE L'ÉLECTRICITÉ PAR FROTTEMENT.** — L'hypothèse des deux fluides reçoit une certaine confirmation apparente des lois qui président aux phénomènes résultant de deux corps frottés l'un par l'autre. D'abord l'une des deux électricités n'est jamais produite sans que l'autre le soit également. Si deux substances sont frottées l'une contre l'autre, et que la substance frottée prenne l'électricité

*positive*, la substance frottante prend l'électricité *negative*, l'une attire le pendule, l'autre le repousse. Une expérience assez curieuse le démontre. Deux personnes étant placées sur des tabourets à pieds de verre (fig. 3), l'une des deux frappe l'autre avec une peau de chat: les deux personnes sont électrisées; celle qui tient la peau de chat est électrisée négativement, et l'autre positivement; de chacune d'elles on peut, en approchant le doigt, tirer des étincelles. Les deux électricités développées dans deux corps frottés y sont en égale quantité, car si on présente en même temps et à la même distance du pendule les deux corps, celui-ci reste immobile, parce que les deux électricités se neutralisent.



L'électricité que prend une substance n'est pas toujours la même. Le verre poli et le verre dépoli, frottés avec de la laine, prennent les deux électricités contraires. Le verre poli, suivant qu'il est frotté avec de la



flanelle ou avec une peau de chat, prend l'une ou l'autre électricité. En général, le poli augmente la tendance d'un corps à prendre l'électricité vitrée, et l'élevation de la température augmente la tendance à prendre l'électricité résineuse. Dans la liste suivante, les corps sont rangés dans

un ordre tel qu'ils s'électrisent positivement avec ceux qui les précèdent, et négativement avec ceux qui les suivent.

Peau de chat.	Plumes.	Soie.
Verre poli.	Bois.	Gomme laque.
Laines.	Papier.	Verre dépoli.

**DIVERSES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ.** — Outre le frottement, les causes qui peuvent développer l'électricité dans les corps sont : la pression, l'exfoliation, les actions chimiques et la chaleur.

Ce fut *Æpinus* (1) qui, le premier, découvrit le développement de l'électricité par la pression, ce que, plus tard, *Libes* (2) démontra expérimentalement en comprimant un disque de métal contre un disque de bois recouvert de taffetas gommé : le premier s'électrisait positivement, le second négativement. Postérieurement, *Haüy* fit voir qu'un morceau de spath d'Islande, ainsi que d'autres minéraux, pressé entre les doigts, s'électrisait positivement et conservait cet état électrique pendant plusieurs jours. *Becquerel* (3) trouva que cette propriété appartenait à tous les corps, et que les uns s'électrisaient positivement, les autres négativement. Le liège l'est positivement si on le presse contre de la gomme élastique qui l'est négativement. Enfin l'effet est nul quand les deux corps comprimés sont *bons conducteurs* de l'électricité.

*Becquerel* a observé que l'*exfoliation*, c'est-à-dire la division naturelle des minéraux cristallisés, peut devenir une source d'électricité. Tout le monde, d'ailleurs, a pu remarquer qu'un morceau de sucre cassé dans l'obscurité dégageait des étincelles lumineuses.

(1) *ÆPINUS* (*Ulrich-Théodore*), savant allemand, dont le véritable nom était *Hoch*, qu'il traduisit en grec (1724-1802). D'une famille de docteurs, il fut d'abord médecin, membre de l'Académie de Berlin, etc. Ses travaux en physique, principalement en électricité, où il applique le calcul, et qu'il a résumés dans sa *Théorie de l'électricité et du magnétisme*, le firent appeler à Saint-Pétersbourg, où il devint précepteur du grand-duc *Paul*, plus tard empereur, inspecteur général des écoles normales dont il dota la Russie, etc.

(2) *LIBES* (*Antoine*), physicien français (1760-1832), professeur aux Ecoles centrales et au lycée Charlemagne. Il a publié de nombreux ouvrages de physique qui sont devenus classiques. On lui doit la découverte de l'*électricité par contact*, qui paraît avoir donné lieu à la découverte de la pile sèche.

(3) *BECQUEREL* (*Antoine-César*), savant physicien français (1788-1878), d'abord officier du génie, fit en cette qualité la campagne d'Espagne de 1814, et y fut remarqué. Il quitta le service en 1815, étant commandant et chevalier de la Légion d'honneur, pour se livrer à la culture des sciences. Ses premiers travaux se rapportèrent à la géologie et à la minéralogie. Il s'occupa ensuite de physique et particulièrement des phénomènes électriques. On lui doit la connaissance des courants électriques produits dans la pile de *Volta*. Ses recherches amenèrent la création de la théorie chimique de la pile. Il a créé l'*électro-chimie*, dont l'industrie a tiré un parti précieux, et entre autres la formation artificielle d'un grand nombre d'espèces minérales. L'étude des phénomènes thermo-électriques l'a conduit à la construction du *thermomètre électrique* ; il a aussi inventé la *balance électro-magnétique* et le *galvanomètre différentiel*. Ce vaillant expérimentateur s'est occupé avec succès de météorologie, et l'assainissement de la Sologne a été l'objet de ses préoccupations. Depuis 1829, il était membre de l'Institut et professeur de physique appliquée au Muséum d'histoire naturelle de Paris.

**LOIS DES ATTRACTIONS ET DES RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES.** — Les actions que les corps électrisés exercent les uns sur les autres sont soumises aux deux lois suivantes :

1° *Les attractions et les répulsions électriques sont en raison inverse du carré des distances*; 2° *Les attractions et les répulsions électriques sont en raison directe des quantités d'électricité dont les corps sont chargés.*

Ce sont là, au fond, comme on voit, les mêmes lois que celles de la gravitation universelle (*Pesanteur*, tome I<sup>er</sup>, page 84). On en doit la découverte aux travaux de Wilke, Æpinus, Franklin, Beccaria, de Luc, Poisson, etc. La démonstration expérimentale en est due à Coulomb (1), à l'aide de l'appareil connu sous le nom de *balance de torsion* ou *balance de Coulomb*.

Cet appareil (*fig. 4*) se compose d'une cage cylindrique en verre ABCD, fermée à sa partie supérieure par un disque AB également en verre. Ce disque est percé à son centre d'une ouverture sur laquelle est monté un tube de verre T, lequel n'est point fixé invariablement au disque AB, mais peut tourner librement dans l'ouverture, comme une vis dans son écrou. A son sommet, ce tube est muni d'une garniture de cuivre formée de deux pièces : l'une *b*, fixée au tube ; l'autre *k*, s'engageant dans la première au moyen d'une douille, de manière que le bouton *t* puisse la tourner à volonté. La pièce *k* porte un cadran divisé en 360 degrés et tournant avec elle ; à la pièce *b* est adapté un indicateur *a*, qui, par un trait de repère, marque de combien de degrés on fait mouvoir le cadran. Au-dessous de celui-ci est fixé un fil d'argent très fin G auquel est suspendue une aiguille de gomme laque, terminée par un disque de clinquant ou de papier doré. Enfin, dans le couvercle AB, près du bord, est une seconde ouverture, sur laquelle s'applique un petit plateau de bois V,

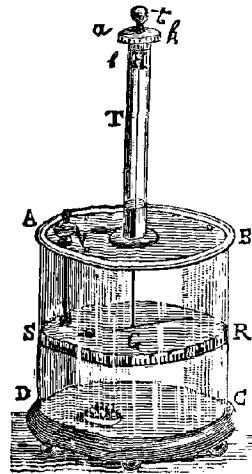


FIG. 4. — BALANCE DE COULOMB.

(1) COULOMB (Charles-Augustin), d'une famille de magistrats de Montpellier (1736-1808), fut d'abord officier du génie, et fut envoyé en cette qualité en Amérique pour diriger la construction du Fort-de-France, à la Martinique. De retour en France, il s'adonna aux sciences mathématiques et physiques, et, tout en restant officier, il se fit connaître et obtint, en 1779, le prix décerné par l'Académie pour ses *Recherches sur la meilleure manière d'aimanter les aiguilles de boussole*, puis il entra peu de temps après à l'Académie, à la suite de son grand travail sur les *machines simples*. Louis XVI le nomma alors intendant général des eaux et fontaines de France, sinécure qui lui permit de poursuivre ses travaux. Il n'émigra pas à la Révolution, et fut appelé à l'Institut dès la réorganisation de ce corps. Il fut ensuite nommé inspecteur général des études, et mourut à Paris. Le congrès des électriciens vient de donner son nom à une des unités de mesures électriques (1881).

auquel est fixée une tige de verre terminée par une boule de laiton M. Une bande de papier SR, collée sur le pourtour de la cage, porte une graduation en 360 degrés, dont le zéro correspond au centre de la boule M.

Pour démontrer avec cet appareil la première des deux lois ci-dessus, on a d'abord soin de dessécher l'air contenu dans la cage en y plaçant, pendant plusieurs jours, une capsule remplie de chaux vive. Cela fait, on fait mouvoir le cadran  $k$  de manière que son zéro corresponde au point de repère de l'indicateur  $a$ ; puis on fait tourner lentement le tube T et la garniture  $b$  jusqu'à ce que le fil d'argent HG étant sans torsion et l'aiguille de gomme laque au repos, celle-ci corresponde au zéro de la graduation SR. Retirant alors la boule M, on l'électrise en lui faisant toucher un corps électrisé quelconque, puis on la replace rapidement dans l'appareil. Le disque de clinquant de l'aiguille, s'électrisant aussitôt par son contact avec la boule, est repoussé par elle et s'arrête, après quelques oscillations, à une certaine distance, soit 40 degrés. Il y a alors équilibre entre la force répulsive de l'électricité et la force de torsion du fil métallique HG qui soutient le disque. Or, cette force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion : la répulsion électrique sera donc représentée, à la distance actuelle, par 40 degrés de torsion. Que l'on tourne alors le cadran  $k$  de manière à tordre le fil jusqu'à ce que le disque de clinquant soit ramené devant la division 20 de la circonférence SR; à cette distance, qui est la moitié de la précédente, la répulsion électrique est toujours égale à la force de torsion du fil. Or cette force de torsion se compose actuellement de l'angle de torsion 20, plus du nombre de degrés dont il a fallu tourner le cadran  $k$ . On trouve que ce nombre est de 140 degrés; ce qui donne une torsion totale de 160 degrés, pour mesure de la répulsion électrique à la distance actuelle. A la distance précédente, double de celle-ci, la force de répulsion électrique n'était que de 40 degrés, c'est-à-dire quatre fois moindre. On verrait de la même manière qu'à une distance triple la force de répulsion est neuf fois plus petite. Donc les *répulsions électriques sont en raison inverse du carré de la distance*. On constate de la même manière que les attractions électriques sont soumises aux mêmes lois.

Pour démontrer la seconde loi, on électrise la boule de laiton M, puis on note la répulsion du disque de clinquant de l'aiguille de gomme laque. Ensuite on retire cette boule, on la touche avec une autre boule de cuivre non électrisée, de même diamètre et isolée. La boule M perd alors la moitié de son électricité. Or, en la remplaçant dans l'appareil, on voit que sa force de répulsion n'est plus que la moitié de ce qu'elle était d'abord. Si l'on continue l'expérience, on verra que sa force n'est plus que le quart,

le huitième, et ainsi de suite de sa force primitive; ce qui démontre la loi.

**ÉLECTROSCOPES ET ÉLECTROMÈTRES.** — Il est indispensable que nous décrivions ici des appareils imaginés pour constater ou pour mesurer l'intensité électrique des corps. Quelques-uns d'entre eux, cependant, ont été construits en se basant sur des principes que nous verrons ci-après. Le *pendule électrique* et l'*électromètre à feuilles d'or*, dont nous avons déjà parlé, ne peuvent être employés dans tous les cas; il est utile que nous connaissions les principaux de ces appareils.

D'après M. Hoeffler, Gray eut le premier l'idée de mesurer l'intensité électrique par l'écartement d'un fil suspendu à un corps conducteur. C'est le moyen dont se servait Dufay, vers 1733. Nollet faisait usage de deux fils, et il mesurait l'angle de leur écartement sur la projection de leur ombre. Waitz y ajouta des petits poids aux extrémités des tiges; Canton y fixa des petites boules de liège; Henley imagina l'*électromètre à cadran*. Cet appareil, très usité, se compose (*fig. 5*) d'une tige cylindrique AB d'une

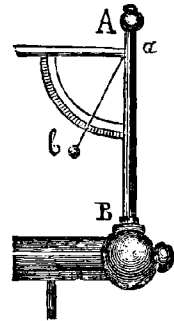
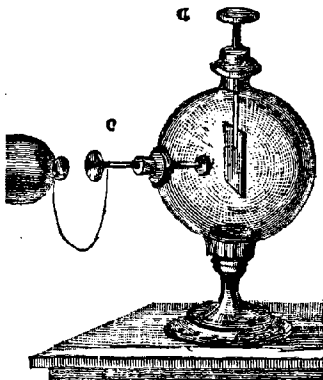


Fig. 5.

ÉLECTROSCOPE  
DE HENLEY.Fig. 6. — ÉLECTROSCOPE  
À UNE SEULE FEUILLE D'OR.

matière conductrice, en ivoire, en ébène ou en cuivre, longue de 0<sup>m</sup>,20 environ, et terminée par une boule A; immédiatement au-dessous est fixé un quart de cercle en ivoire, dont le centre porte un axe autour duquel se meut librement une aiguille légère *ab* de 0<sup>m</sup>,12 de longueur, et portant à son extrémité une petite balle de sureau *b*. Cette aiguille peut parcourir avec facilité le quart de circonférence divisée et donne les angles d'écartement. Dans les conditions ordinaires, l'aiguille est dans la direction verticale; mais, dès que l'appareil est électrisé, la balle s'écarte de la tige, et l'index s'en éloigne plus ou moins en raison de la tension électrique. Ce petit instrument se visse sur l'un des conducteurs d'une machine électrique ou d'une batterie.

Le docteur Hare, de Philadelphie, a le premier décrit un *électroscope à une seule feuille d'or*. Voici, selon M. Snow Harris, une bonne manière de le construire. Une feuille d'or d'environ 0<sup>m</sup>,075 de longueur et 0<sup>m</sup>,006 de largeur est suspendue à une petite tige de laiton (*fig. 6*), à l'intérieur

d'un cylindre ou d'une sphère en verre. A la hauteur de l'autre extrémité de la feuille d'or, une tige de laiton traverse la paroi de la sphère et porte un disque de papier ou de bois doré *b* de 0<sup>m</sup>,025 environ de diamètre. Ces deux tiges de laiton sont terminées extérieurement par deux petites plaques de laiton ou de bois doré *a*, *c*, d'environ 0<sup>m</sup>,025 de diamètre. En *a*, la tige métallique glisse dans des morceaux de liège placés à l'intérieur d'un tube de verre supporté par une pièce de bois, ou bien un morceau de liège peut être fixé au col du ballon de verre.

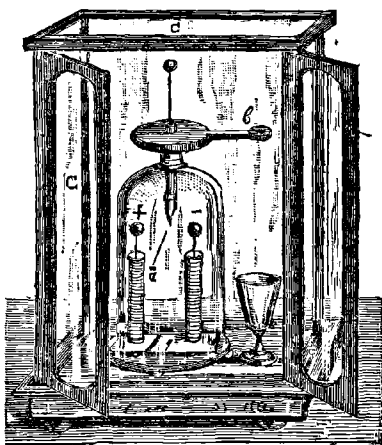


Fig. 7.

ÉLECTROSCOPE DE BOHNENBERGER.

La seconde tige *bc* glisse dans un bouchon semblable, fixé à l'ouverture du col latéral, ou dans une pièce de bois, mastiquée dans l'ouverture pratiquée sur la sphère. Le tout est supporté par un poids convenable. Si l'on veut, à l'aide de cet électroscope, qui est fort sensible, reconnaître la présence de l'électricité, on attache un fil de métal en *c* de manière à permettre une action par influence; alors on touche le disque *a* avec le corps électrisé. Quand la distance de la feuille d'or et du disque *b* est très petite, la plus petite attraction devient sensible. Si l'on veut déterminer l'espèce d'électricité, on fait glisser la tige *bc* jusqu'à ce que le disque *b* touche la feuille et le disque *b*, positivement ou négativement, avec un cylindre de verre ou de cire convenablement frotté. La feuille d'or sera alors repoussée et se tiendra éloignée du disque. Si l'on présente dans ces circonstances le corps électrisé à un des boutons *a* ou *c*, la distance de la feuille au disque *b* augmentera ou diminuera, suivant que l'électricité du corps examiné est d'espèce identique ou opposée à celle dont on a d'abord chargé la feuille.

Bohnenberger, en se servant de *piles sèches*, que nous décrirons plus loin, et que nous devons seulement considérer ici comme des colonnes ou des tiges toujours chargées d'une faible quantité d'électricité, a construit un *électroscope* d'une très grande sensibilité. Il se compose (*fig. 7*) d'une cloche en verre à l'extrémité supérieure de laquelle est une douille pouvant supporter un *condensateur* (page 52). Cette douille ne doit pas reposer immédiatement sur la cloche, mais être fixée à une tige de cuivre, passant dans un tube de verre recouvert de plusieurs couches de vernis à la gomme laque; c'est ce tube de verre qui est fixé solidement à la

cloche. A la base de la tige de cuivre se trouve une feuille d'or  $a$  qui, dans les conditions ordinaires, reste verticale. La cloche repose sur un support métallique plan, placé sur trois pieds en bois. Deux piles sèches sont placées dans une position verticale, les extrémités chargées d'électricité en regard. Ces deux piles peuvent s'approcher ou s'éloigner de  $a$ , à l'aide de deux écrous fixés sur le plateau. Aussitôt que la tige, et par conséquent la feuille d'or  $a$ , a reçu une très faible quantité d'électricité, elle est attirée par le pôle de la pile sèche qui possède l'électricité contraire, et repoussée par l'autre; ces deux actions s'ajoutent, et cette feuille est alors d'autant plus attirée que la somme d'action est plus considérable. Cet appareil est muni de divers accessoires : une tige  $b$  peut recevoir les différents corps, capsules, etc. Enfin le tout est placé dans une cage vitrée CT, desséchée à la chaux, afin d'opérer toujours dans un air sec.

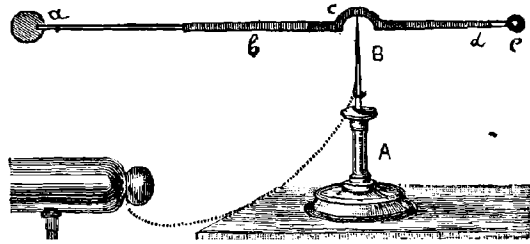


Fig. 8.

ÉLECTROSCOPE A AIGUILLE ÉQUILIBRÉE.

On peut commodément construire un *electroscope*, de la manière suivante, imaginée par M. Snow Harris. A un petit fil de laiton recourbé  $bcd$  (fig. 8), on fixe deux pailles  $ab$  et  $de$ , de manière à former des bras d'inégale longueur. Le long bras  $bc$  porte un léger disque  $a$  de papier doré d'environ 0<sup>m</sup>,012 de diamètre; le petit bras  $cd$  porte un contre-poids  $e$ , qui peut être un grain de plomb ou une boule de cire à cacheter. Le tout repose délicatement par son centre  $c$  sur une tige de laiton B, supportée par un tube de verre A. Le contre-poids peut s'ajuster facilement en faisant glisser les pailles  $b$  et  $d$  sur le fil de laiton recourbé, de manière à allonger ou à raccourcir les bras opposés. Quand on emploie l'aiguille à déceler simplement la présence de l'électricité, on attache un fil métallique à la tige de laiton B pour la mettre en communication avec le sol, et on présente au disque  $a$  la substance électrisée. Si on veut déterminer l'espèce d'électricité, on enlève le fil métallique, et on électrise le disque  $a$ , soit positivement, soit négativement. En présentant alors le corps électrisé au disque  $a$ , il sera attiré ou repoussé soit positivement, soit négativement, suivant que son électricité sera d'espèce identique ou opposée à celle dont le disque est chargé.

M. Snow Harris construit encore, de la manière suivante, un *electroscope simple* très délicat. Il fixe une longue paille  $ab$  (fig. 9) à la base d'une

grosse aiguille très aiguë ; l'aiguille et la paille sont ensuite passées au travers d'une petite boule de liège, et le système est équilibré sur la pointe d'aiguille  $a$  à l'aide de deux fortes épingles, piquées obliquement dans le liège et recouvertes d'un peu de cire pour assurer la stabilité du système. On place le tout sur un petit fil de laiton  $a$ , supporté par un

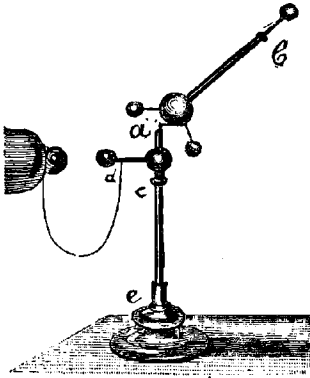


Fig. 9.

ÉLECTROSCOPE DE HARRIS.

tube de verre  $ce$  de manière à mettre le tout, au moyen d'un petit bras  $cd$ , en communication avec le sol, comme il convient, quand on veut mettre en évidence une attraction ou une répulsion sur une petite boule  $b$  fixée à l'extrémité de la paille.

La *balance de Coulomb* est un électromètre d'une grande précision, et dont on peut varier la sensibilité suivant la force de torsion du fil employé, mais pourvu qu'on ne dépasse pas la limite d'élasticité de ce fil. M. Snow Harris, pour remédier à l'inconvénient de l'emploi, dans la balance de torsion, d'un fil de métal dont l'élasticité n'est jamais parfaite, a construit un appareil nommé *balance bifilaire*, à cause de deux fils de suspension dont on fait usage au lieu d'un seul. La forme extérieure de l'appareil est à peu près la même que celle de la balance de Coulomb ; mais la force de réaction de l'instrument ne provient plus d'aucun principe d'élasticité, mais bien de l'action de la pesanteur. Lorsqu'une aiguille horizontale  $mn$  (fig. 10) est suspendue à deux fils de soie non tordus  $ab, a'b'$ , placés parallèlement l'un à l'autre à égale distance des centres  $c, c'$ , et fixés aux deux points  $a, a'$ , elle est dans sa position d'équilibre quand elle est horizontale dans le plan vertical passant par les deux fils. A l'aide de cette disposition,

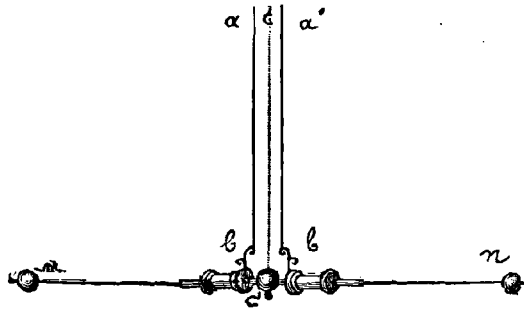
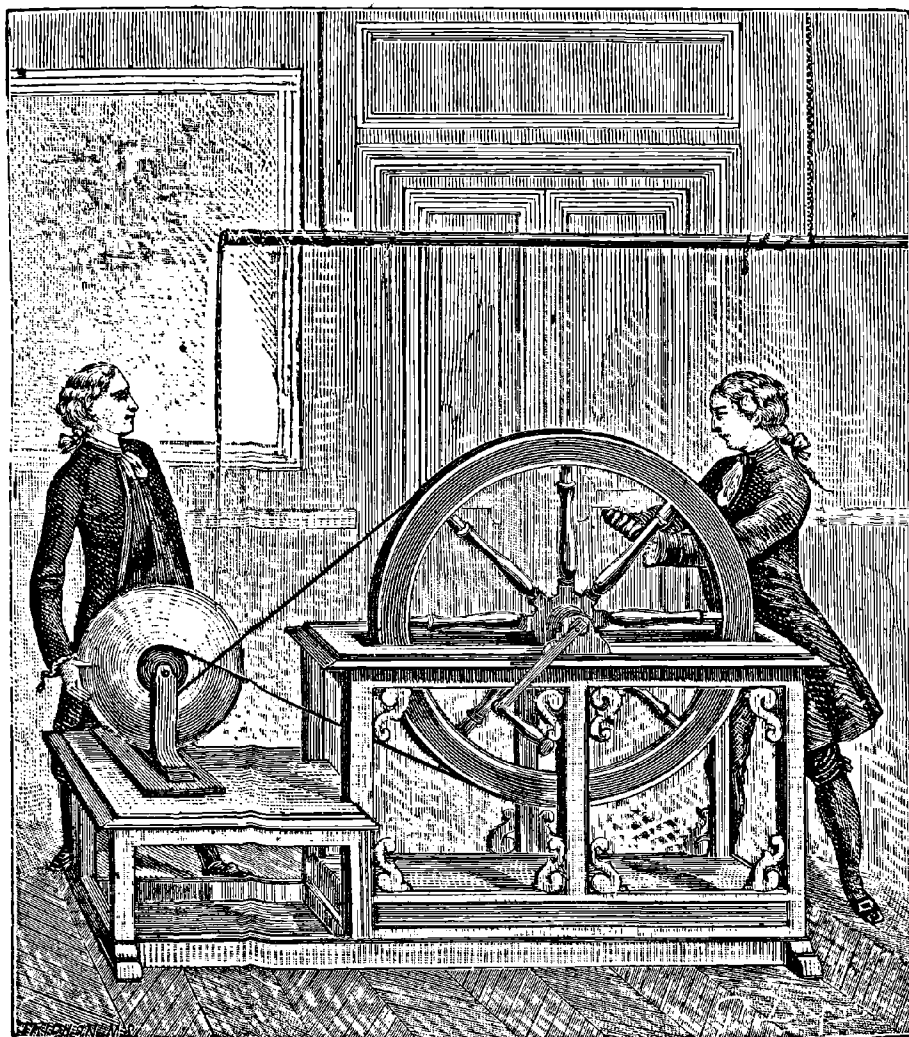


Fig. 10. — BALANCE BIFILAIRE.

en tournant l'aiguille autour de l'axe imaginaire  $cc'$ , les lignes de suspension se dévient de la verticale, et la distance  $cc'$  est moindre. On a donc une force de réaction provenant du poids de l'aiguille, laquelle est transmise, pour ainsi dire, aux points de suspension, puisque le centre de gravité de la masse s'élève, et tend sans cesse à revenir dans sa position



première, et se trouve dans une position semblable à celle d'un corps qui tombe suivant un très petit arc circulaire. D'après cela, si l'on fait osciller l'aiguille, et qu'on observe les effets produits, on peut déterminer, au



Machine électrique d'Hauksbee, perfectionnée par Bose (page 38).

moyen des formules relatives aux corps oscillants, la nature de la force qui produit les oscillations.

L'*électromètre de Lane* permet de communiquer une charge déterminée à un corps conducteur. Il consiste (*fig. 11*) en une bouteille de

Leyde A (page 50), isolée sur un plateau MM et dont la garniture intérieure communique avec la boule B. Une autre boule C, de même dimension, et placée à l'extrémité d'une tige de cuivre qui se trouve supportée par une tige ED, communique avec la garniture extérieure; la boule C

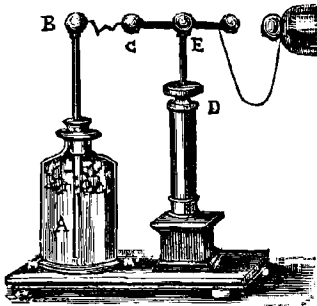


Fig. 11.

ÉLECTROMÈTRE DE LANE.

peut être mise en contact ou placée à une distance déterminée de la boule B. On met B en contact avec une machine électrique et CE avec l'appareil auquel on veut donner une charge électrique déterminée. Quand l'électricité a chargé A, une étincelle éclate entre B et C, et comme cet effet est produit chaque fois que la bouteille est chargée au même degré, la charge que l'on communique est proportionnelle au nombre d'étincelles qui éclatent entre B et C.

Il existe un grand nombre d'autres *électromètres*; nous parlerons ci-après de quelques-uns destinés spécialement à mesurer l'électricité atmosphérique.

**DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ.** — L'électricité d'un corps qui en est chargé ne réside pas également dans toutes les parties de ce corps; mais principalement à sa surface. Cela résulte de nombreuses expériences dont les premières sont dues à Coulomb. Il se servait d'une sphère de cuivre, isolée sur un pied de verre et ayant une ouverture à sa partie supérieure (*fig. 12*). Après l'avoir électrisée, il la touchait avec une baguette de gomme laque à l'extrémité de laquelle est fixé un petit disque de papier doré, et qui porte le nom de *plan d'épreuve*. Quand il touchait différentes parties de la surface extérieure de la sphère, le plan d'épreuve était chargé d'une quantité d'électricité à peu près égale, comme il s'en assurait au moyen de la balance; quand, au contraire, il touchait l'intérieur de la sphère, le plan d'épreuve n'était point électrisé.

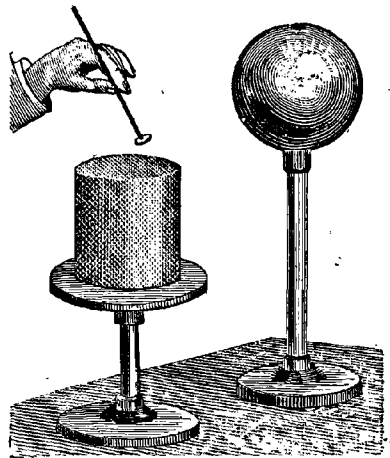


Fig. 12. — EXPÉRIENCES

DE COULOMB ET DE FARADAY.

Faraday se servait d'un cylindre en treillis métallique (*fig. 12*) reposant sur un disque de métal isolé. Le disque étant électrisé, il recueil-

lait de l'électricité sur la surface extérieure et jamais sur la surface intérieure.

Biot indiqua cette expérience, souvent répétée dans les cours (*fig. 13*). Sur une sphère métallique isolée par un pied de verre, on applique deux hémisphères de cuivre du même diamètre qu'elle, ayant des manches de verre. Quand la sphère est électrisée, si on les retire vivement, on observe que la sphère n'est plus électrisée, toute son électricité est passée dans les disques.

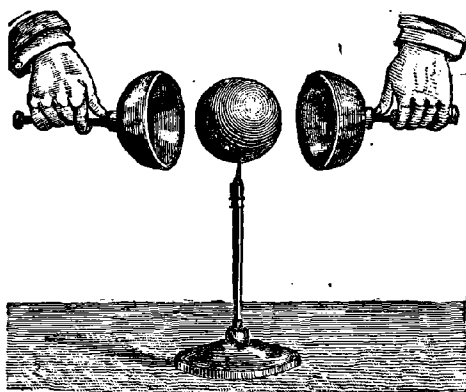


Fig. 13. — EXPÉRIENCE DE BIOT.

On démontre encore que l'électricité se dirige à la surface des corps au moyen de l'appareil suivant dû à Faraday (*fig. 14*). Il consiste en un cylindre C de cuivre isolé, sur lequel s'enroule une feuille métallique M très flexible, qui se développe à volonté lorsqu'on tourne le cylindre au moyen de la manivelle A, puis en

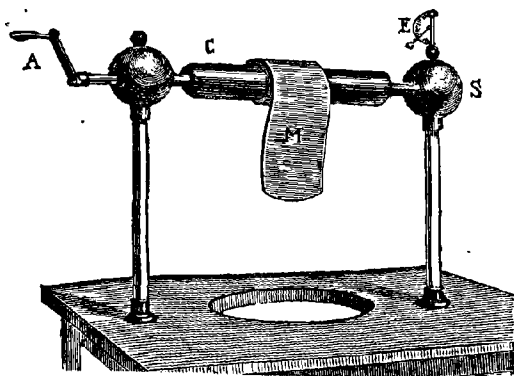


Fig. 14. — EXPÉRIENCE DE FARADAY.

une sphère de métal S qui communique avec le cylindre C et qui supporte un petit électroscope d'Henley. Si l'on électrise le cylindre, on voit que la

boule de sureau remonte sur le cadran en vertu de la répulsion électrique; mais, à mesure que l'on déroule la feuille métallique en faisant tourner le cylindre, l'écartement diminue, et il augmente quand de nouveau on enroule la feuille. Donc la quantité d'électricité d'un corps ne variant pas, la répulsion qu'il exerce est d'autant plus petite que la surface est plus

petite, ce qui démontre que le fluide électrique se tient à la surface du corps.

Il faut considérer comme une conséquence de la force répulsive que chacune des deux électricités exerce sur elle-même ce fait de l'accumulation de l'électricité à la surface des corps. En effet, en soumettant au calcul l'hypothèse des deux fluides, et en admettant qu'ils s'attirent mutuellement ou se repoussent en raison du carré des distances, le mathéma-

ticien Poisson arrive aux résultats donnés par les expériences de Coulomb. Il en conclut que l'électricité n'est retenue à la surface des corps que par la pression de l'air environnant et par le peu de conductibilité de ce gaz lorsqu'il est sec. Cette couche très mince d'électricité est donc dans un état de *tension* permanente, dû à la force de répulsion réciproque de ses molécules, et luttant contre la résistance de l'air.

**INFLUENCE DE LA FORME DES CORPS SUR L'ACCUMULATION DE L'ÉLECTRICITÉ. — POUVOIR DES POINTES.** — Il est intéressant de pouvoir se rendre compte de

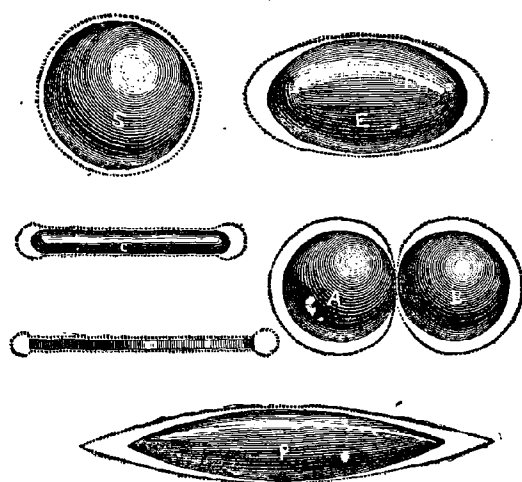


Fig. 15. — DISPOSITION DE L'ÉLECTRICITÉ  
A LA SURFACE DES CORPS.

l'influence de la forme du corps sur la répartition de la *charge électrique* à la surface. A l'aide de sa balance, Coulomb est arrivé à quelques résultats bons à connaître (*fig. 15*). Sur une sphère S, la charge électrique est la même sur tous les points de la surface; sur un ellipsoïde allongé E, la charge est maxima à l'extrémité du grand axe et minima à l'extrémité du petit; de plus, le rapport entre ces deux charges est d'au-

tant plus grand que l'ellipsoïde est plus allongé; sur un disque plat D, la charge, presque nulle au centre et jusque près des bords, s'accroît très vite sur les bords eux-mêmes; sur un cylindre C terminé par deux hémisphères, la charge est minima et très faible au milieu, maxima à l'extrémité, et tend là à devenir d'autant plus grande que le rayon du cylindre est plus petit par rapport à sa longueur; dans les sphères en contact, si elles sont égales A et B, la charge, nulle au point de contact, et très faible jusqu'à 30° de ce point, croît très rapidement de 30° à 60°, moins rapidement de 60° à 90°, et d'une manière insensible de 90° à 180°. Quand les sphères sont inégales, la charge, en un point quelconque de la petite sphère, est plus forte que dans le point semblable de la grande; lorsqu'une des sphères devient de plus en plus petite, le rapport des charges aux extrémités de la ligne des centres tend à devenir égal à 2; pour un ellipsoïde très allongé P, la charge est à l'extrémité de la pointe.

Une pointe peut être considérée comme l'extrémité d'un cylindre dont le rayon est très petit, ou comme l'extrémité d'une série de sphères dont les rayons vont en diminuant; dans les deux cas, la charge doit y être considérable; l'électricité y prend une tension infiniment grande. Or, la résistance de l'air étant limitée, il est facile de voir que l'électricité, quelque faible qu'elle soit, aura toujours à la pointe une tension supérieure à cette résistance, et s'écoulera, par conséquent, dans l'atmosphère où elle se dispersera entièrement. C'est ce fait que l'on désigne sous le nom de *pouvoir des pointes*. Franklin l'a découvert; l'expérience le démontre. Une pointe métallique, adaptée au conducteur d'une machine électrique, l'empêche de se charger, parce que l'électricité s'écoule par son extrémité à mesure qu'elle se produit. C'est pourquoi tous les appareils électriques sont terminés par des boules ou des parties arrondies.

**DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ.** — Les corps électrisés, même étant isolés, perdent toujours plus ou moins promptement leur électricité; cette déperdition est due à la conductibilité de l'air et des vapeurs qui enveloppent les corps, et ensuite aux supports isolants eux-mêmes.

Les causes de cette déperdition sont assez complexes, dit M. Privat-Deschanel dans son *Cours de physique*; il y a d'abord la propagation par les supports, qui ne sont jamais isolants et qui peuvent d'ailleurs se recouvrir d'une couche d'humidité plus ou moins grande provenant de l'air. L'écoulement peut aussi se faire dans l'air considéré comme corps isolant; en outre, les molécules d'air, qui viennent successivement au contact du corps électrisé, partagent son électricité et sont repoussées par lui en emportant une portion de la charge. En fait, c'est surtout à l'humidité de l'air qu'il faut attribuer la déperdition; lorsque cette humidité est un peu considérable, les expériences d'électricité deviennent littéralement impossibles. Au contraire, dans une cloche renfermant de l'air complètement desséché, un corps peut rester électrisé pendant un temps très considérable. Il résulte des recherches de Coulomb sur ce point que le pouvoir isolant des corps mauvais conducteurs augmente beaucoup quand la section de ces corps diminue, de telle sorte qu'on peut arriver à les choisir assez minces pour que l'isolement soit complet, ou que, du moins, il ne se produise pas par le support une perte plus grande que par l'air. Quant à la déperdition par l'air, elle dépend de causes trop nombreuses pour qu'il soit possible, dans l'état actuel de la science du moins, de formuler une loi précise à ce sujet. Coulomb, en observant, dans des circonstances spéciales, le décroissement de la force répulsive des deux boules de sa balance, avait remarqué que *la valeur de ce décroissement*

*était à chaque instant proportionnelle à la force répulsive elle-même.* Cette loi ne se vérifie pas d'une manière générale, et surtout quand les boules sont un peu voisines l'une de l'autre. La force élastique de l'air ambiant joue un rôle important dans la déperdition. Suivant qu'elle augmente ou qu'elle diminue, la charge que peut conserver un corps conducteur augmente ou diminue elle-même d'une manière proportionnelle; ainsi, dans le vide, aucune charge n'est possible et toute trace d'électricité disparaît. D'autre part, cette charge, compatible avec l'état de densité de l'air ambiant, se dissipe d'autant plus vite que la force élastique est plus forte.

Coulomb avait expérimenté dans l'air humide; or, dans les gaz parfaitement desséchés, Matteucci a montré que la déperdition de l'électricité ne suit pas la loi de Coulomb, et que, dans certaines limites de tension, elle est indépendante de la charge et proportionnelle au temps, c'est-à-dire que, en des temps égaux, les déperditions successives sont égales. Suivant ce même physicien, à égalité de température et de pression, la déperdition est égale dans l'air, dans l'hydrogène et dans l'acide carbonique, quand ces gaz sont parfaitement desséchés; avec des corps fortement électrisés, la déperdition est plus grande quand ils sont électrisés *négativement* que lorsqu'ils le sont *positivement*; enfin, la déperdition, dans ces gaz, est indépendante de la nature du corps, c'est-à-dire qu'elle est la même que le corps soit bon ou mauvais conducteur.

## CHAPITRE II

### ACTION DES CORPS ÉLECTRISÉS SUR LES CORPS A L'ÉTAT NEUTRE MACHINES ÉLECTRIQUES

**ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE OU PAR INDUCTION.** — Lorsqu'un corps électrisé est placé à quelque distance d'un autre corps à l'*état neutre*, c'est-à-dire à l'état naturel, il décompose le fluide neutre de ce corps, attire vers lui l'électricité contraire à celle dont il est chargé, et repousse à l'extrémité opposée l'électricité du même nom. Cette action, qui est une conséquence de la loi des attractions et des répulsions (page 12), et qui

s'exerce non seulement à toutes les distances, mais encore au travers de tous les corps isolants, comme l'air, le verre, les résines, etc., est connue sous le nom d'*électrisation par influence* ou *par induction*.

Pour démontrer expérimentalement cette influence, on se sert d'un cylindre de laiton, isolé sur un pied de verre (*fig. 16*) et muni de petits pendules de moelle de sureau, suspendus à des fils de chanvre qui sont conducteurs. Or, lorsqu'on approche ce cylindre d'une machine élec-

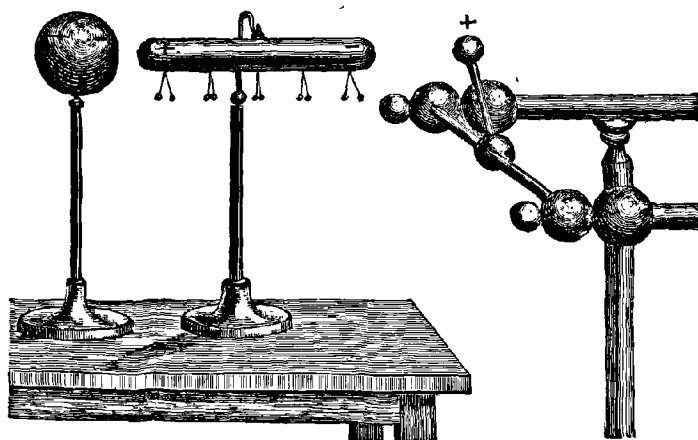


FIG. 16. — ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE.

trique, qui est chargée de fluide positif ou d'une sphère électrisée positivement, on voit les petits pendules voisins se repousser et diverger entre eux, mais inégalement; c'est aux extrémités que se produit la plus grande divergence. Vers la partie médiane, les pendules restent en contact sans se repousser; d'où l'on conclut que c'est aux extrémités que se porte l'électricité et que le milieu du cylindre est à l'état neutre. De plus, si des pendules voisins de la machine électrique on approche un bâton de résine frotté, on voit qu'ils sont repoussés, ce qui prouve qu'ils sont chargés de la même électricité que la résine, c'est-à-dire d'électricité négative. Si l'on approche ensuite un tube de verre frotté de l'autre extrémité du cylindre, les pendules sont aussi repoussés, parce qu'ils sont chargés d'électricité positive. Enfin, les électricités contraires accumulées aux extrémités opposées du cylindre sont en quantité égale, car si on éloigne le cylindre de la machine, les pendules cessent de diverger, ce qui indique que les deux fluides, d'abord séparés, se recombinent actuellement pour former du fluide neutre.

Cependant, on constate que la ligne neutre ne partage pas le cylindre:

en deux parties égales ; cette inégalité est d'autant plus notable que le cylindre est plus long. Or, les quantités des deux fluides étant les mêmes, il est clair que, près de la machine, l'électricité est plus condensée, et que le fluide du même nom que celui de la machine, étant répandu sur un plus grand espace, n'aura en chaque point qu'une épaisseur très faible et d'autant plus faible que le cylindre sera plus grand. Si maintenant on met le cylindre en communication avec le sol, la machine agira alors par influence

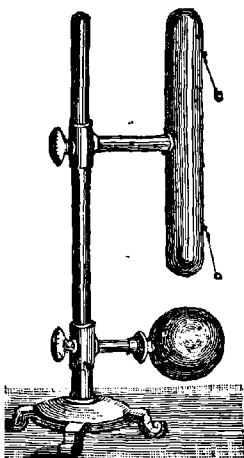


Fig. 17.

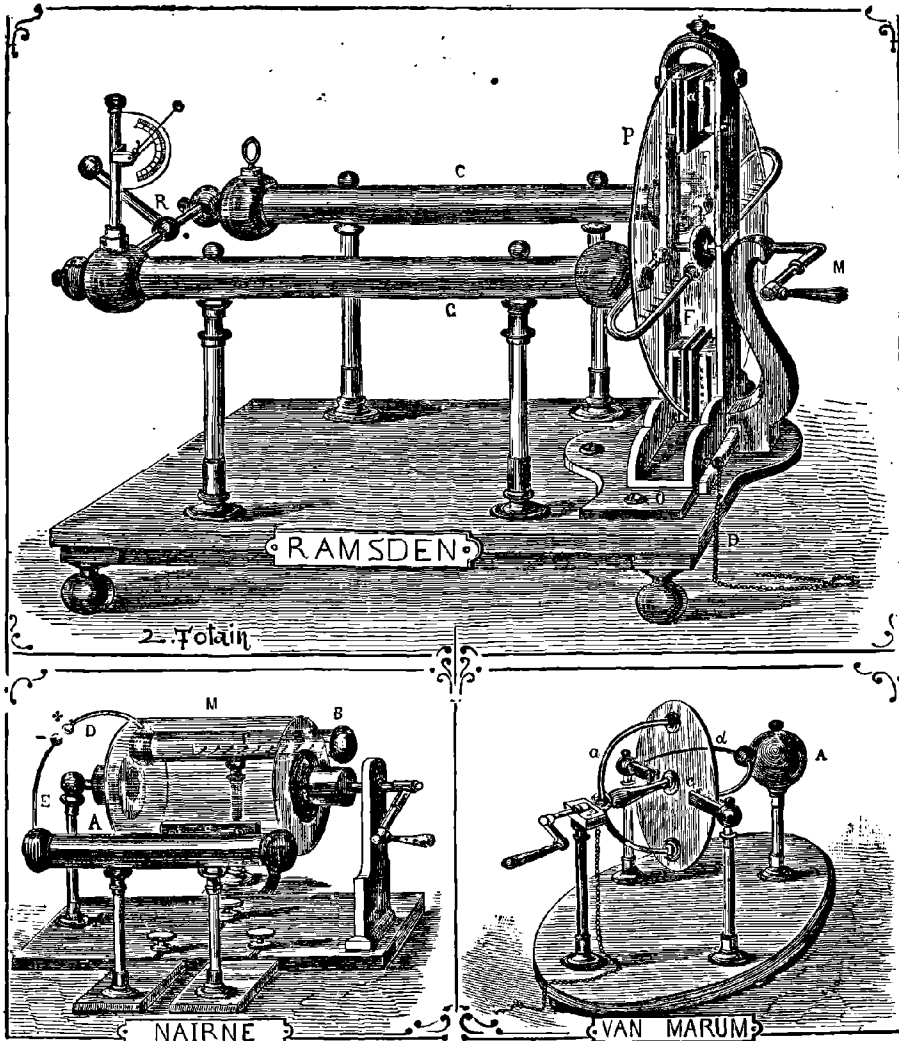
APPAREIL DE REISS.

sur lui et sur le globe terrestre lui-même, l'électricité de nom contraire viendra s'accumuler dans la partie voisine de la machine ; mais l'électricité de même nom, se répandant sur le globe terrestre, ne possédera plus aucune épaisseur sensible ; il n'y aura plus, sur le corps soumis à l'influence, qu'un seul fluide dont on puisse constater la présence ; l'électricité négative subsistera seule. Il importe de remarquer que ce résultat est le même, quel que soit le point du cylindre par lequel on établit la communication avec le sol ; c'est toujours le fluide repoussé qui disparaît, le corps ne possède plus que l'espèce d'électricité contraire à celle du corps influent. Toutefois, il peut se présenter, suivant le mode de communication avec le *réservoir commun*, quelques petites variations dans le détail de la distribution de l'électricité ; mais ces variations ne changent pas le sens du phénomène.

**APPAREIL DE REISS.** — L'expérience précédente, faite à l'aide d'un cylindre et due à Æpinus, fut pendant longtemps le seul appareil pour démontrer l'électrisation par influence. Les physiciens allemands objectèrent qu'il ne démontrait pas que l'extrémité la plus voisine du foyer d'électricité n'avait pas perdu quelque-une de ses propriétés, lorsque le corps était en communication avec le sol. M. Reiss, professeur de Berlin, détruisit cette objection en donnant à l'expérience une disposition différente. Il plaçait le corps influencé, un cylindre (*fig. 17*), au-dessus du corps électrisé produisant l'influence : ce cylindre porte un pendule à chacune de ses extrémités ; ces pendules divergent de leur position d'équilibre par la répulsion du fluide sur lui-même. Le corps qui détermine l'influence ne peut, en effet, par sa présence, faire diverger les pendules ; il tendrait, au contraire, à les maintenir verticaux. L'électricité du corps influencé n'a donc pas perdu la propriété de repousser l'électricité du même nom.



**THÉORIE DE FARADAY RELATIVE A L'ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE.**  
 — Faraday a donné de l'électricité *par influence* une théorie qu'il importe de connaître. « Cette théorie, dit M. de La Rive, mérite l'attention de tous



Machines électriques (pages 39 et suivantes).

les physiciens, parce qu'elle repose sur un principe juste, c'est-à-dire que les actions électriques ne se manifestent jamais sinon par l'intermédiaire de molécules matérielles, ce qui tend à prouver une connexion évidente entre les forces électriques et celles de la nature. »

Reconnaissant deux espèces de forces électriques, Faraday suppose que l'induction électrique dépend d'une forme particulière d'action physique qui se propage entre des *molécules de force* contiguës (1). Les électricités opposées sont séparées dans ces molécules intermédiaires, et elles se disposent alors en séries présentant une succession de pôles négatifs et positifs; c'est ce qu'on appelle la *polarisation des molécules*, et, de cette façon, la force se transporte à distance. L'effet immédiat produit par un corps électrisé consiste donc à mettre les particules qui se touchent dans un état forcé particulier, résultant d'une nouvelle distribution des forces électriques qu'il contient, et par suite duquel ces forces se placent dans une certaine nouvelle position relative par rapport au corps électrisé. Ces particules voisines, ainsi modifiées électriquement, agissent maintenant sur les molécules qui leur sont contiguës, et celles-ci sur d'autres, et ainsi de suite, jusqu'à ce que les forces de l'ensemble soient arrangées systématiquement en formant une série de points positifs et négatifs, ou, en d'autres termes, soient *polarisées*; propageant ainsi la force primitive à une distance où elle se manifeste comme une force de même nature, égale, mais de sens opposé. Dans les corps métalliques et les autres corps bons conducteurs, la polarisation des molécules intermédiaires ne subsiste pas même un instant, parce que les molécules se communiquent de l'une à l'autre les forces opposées, ce qui détruit l'état particulier. C'est en réalité une décharge de particule à particule, qui constitue la conduction. C'est pourquoi les métaux et les autres conducteurs présentent la polarisation dans leur ensemble. Ce résultat est tout à fait indépendant de la masse du corps et n'exige pas une épaisseur sensible pour se produire. La feuille d'or la plus mince devient positive sur l'une de ses faces et négative sur l'autre, et cela sans que les deux forces électriques se mélangent le moins du monde. D'après cela, c'est à la surface des corps conducteurs qu'on devra nécessairement trouver l'électricité, puisque c'est là que commence le milieu environnant et résistant capable de subir l'influence d'où dépend la charge. Si le conducteur est creux ou contient de l'air, il n'y aura pas induction, à cause des actions opposées que la surface intérieure du corps électrisé exerce dans toutes les directions. Dans le cas où l'un des corps électriques forme des milieux *diélectriques*, comme, par exemple, de l'air ou du verre placé entre deux plans conducteurs, l'épaisseur de la couche a une très grande influence. Dans de tels milieux, les forces ne peuvent se dé-

(1) W. Snow Harris, *Leçons d'électricité* (traduction de M. E. Garnaut). — Becquerel, *Traité d'électricité*.

charger, pour ainsi dire, l'une avec l'autre, comme dans le cas précédent, et le résultat est une *polarisation* permanente dans toute la série, constituant ce que l'on appelle une *isolation*, et par laquelle on obtient une sorte de propagation de la force dans toute la série des molécules, jusqu'à ce que les forces atteignent quelque surface conductrice et se manifestent là à une certaine distance du point où elles ont pris naissance. Par l'expression *parties contiguës*, on doit comprendre parties qui se suivent ou parties voisines, sans se préoccuper de la question d'éloignement ou de rapprochement infiniment grand entre ces parties; par *polarité*, on comprend une disposition de forces capable de faire acquérir aux particules des forces opposées dans leurs différentes parties.

Pour analyser, d'après Faraday, les effets électriques produits au travers des différentes substances, on opère ainsi. On place dans un vase sphérique en métal B (fig. 18) une boule métallique A isolée à l'aide d'une grosse tige en gomme laque CD; une sphère en cuivre C communique au moyen d'une petite tige métallique fixée au centre de la tige en gomme laque CD à la boule A, de sorte qu'en électrisant C, A se trouve chargé de la même espèce d'électricité, laquelle ne peut se transmettre à la sphère extérieure B que par influence au travers du milieu qui les sépare et qui se trouve dans l'intérieur de B. L'appareil est tellement disposé que l'on peut employer comme milieu intermédiaire de la gomme laque, du verre, des gaz plus ou moins raréfiés, etc.; à cet effet, le vase se sépare en deux hémisphères suivant le grand cercle *ab*, et est muni de robinets à la partie inférieure.

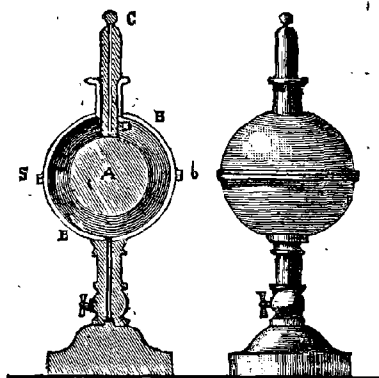


Fig. 18. — THÉORIE DE FARADAY.

Afin de comparer les effets d'induction de différents milieux, on opère avec deux appareils exactement semblables, et on se place à proximité d'une *balance de Coulomb* pour apprécier l'intensité des différentes charges électriques. On met dans un des appareils de l'air, dans l'autre des hémisphères de gomme laque ou de verre. On donne une charge à la boule intérieure de l'appareil plein d'air, dont on mesure la tension à l'aide de la balance de torsion; puis on fait communiquer les deux appareils par les boules C touchant aux conducteurs intérieurs. On mesure ensuite, après le contact, les charges des deux boules A, en les enlevant des vases et les portant dans la balance de torsion. Il est évident

que l'électricité se répartit sur chacune d'elles et agit par influence sur le vase sphérique enveloppant, et qui communique au sol ; elles prennent alors d'autant plus d'électricité que le pouvoir d'induction de la substance isolante est plus grand.

En opérant ainsi, Faraday est arrivé aux conclusions indiquées ci-dessus et que nous résumons :

1° L'induction ou action par influence paraît être une action des particules contiguës des corps isolants, par l'intermédiaire de laquelle la puissance électrique est transmise à distance ; on doit donc la considérer comme une polarité des particules du corps interposé.

2° Les meilleurs isolants solides : la laque, le verre, le soufre ont des propriétés conductrices faibles, il est vrai, mais sensibles et qui permettent à l'électricité de les pénétrer, tout en servant à transmettre les actions par influence ; plus les corps sont isolants, moins la charge sensible pénètre dans l'intérieur.

3° Les gaz possèdent tous à peu près le même pouvoir inducteur. Les variations dans la pression ou la densité n'ont aucune influence pour modifier cette propriété générale. Ainsi, dans l'air raréfié, les actions par influence se transmettent comme dans l'air ordinaire.

4° Les pouvoirs inducteurs des corps peuvent être représentés par les nombres suivants :

Air et gaz à diverses pressions . .	1,00	Cire jaune. . . . .	1,86
Flint-glass . . . . .	1,76	Verre. . . . .	1,90
Résine. . . . .	1,77	Gomme laque. . . . .	2,00
Poix. . . . .	1,80	Soufre. . . . .	2,24

Ainsi, au travers du soufre, l'action par influence produite par une même charge électrique est plus forte qu'au travers d'une même épaisseur d'air.

Les physiciens qui se sont occupés de cette question après Faraday, et parmi lesquels nous citerons MM. Snow Harris, Matteucci et Masson, ont trouvé des résultats peu différents. On doit seulement faire remarquer que si, dans les gaz raréfiés, le pouvoir inducteur est le même que dans les gaz à la pression ordinaire, dans le vide, l'induction devrait également avoir lieu. Or, il est généralement admis que, dans le vide absolu, l'électricité ne pourrait se transmettre, parce qu'il n'y aurait plus de particules matérielles pour permettre à la polarité de s'établir.

**MACHINES ÉLECTRIQUES.** — Ce fut Otto de Guéricke, qui, afin de s'éclairer sur la nature de l'électricité, construisit un appareil qui fut la première *machine électrique*. Cet appareil était simplement un globe de soufre (*fig. 19*) qu'il avait obtenu en faisant fondre du soufre dans un globe de verre, qu'il brisait après le refroidissement de la masse; traversé par un axe ou tige de fer, ce globe de soufre était porté sur une planche de bois, tourné avec une manivelle, et frotté avec la main qu'il touchait pour être électrisé.

Avec cet appareil élémentaire, Guéricke découvrit que les corps légers, après avoir été d'abord attirés par la matière électrisée, sont ensuite repoussés et qu'ils ne sont attirés qu'après avoir subi l'approche ou le contact d'un autre corps. Il remarqua que ces corps légers, lorsqu'ils étaient attirés ou repoussés, avaient, « comme la lune à l'égard de la terre, constamment la même face tournée vers le globe, » et que des fils suspendus librement à une petite distance du globe électrisé étaient repoussés dès qu'il en approchait le doigt. Il en tira cette conclusion que les corps reçoivent une électricité contraire à celle du milieu où ils sont plongés. Il fut aussi le premier à constater le bruit et la lumière que produit l'électricité obtenue par le frottement. Le bruit était bien faible; quant à la lumière, il la comparait, chose remarquable, à la lueur que le sucre répand quand on le casse la nuit. Par suite de la friction, le soufre s'électrisait *négativement*, et l'électricité positive s'écoulait dans le sol par la main de l'observateur. Les effets produits par cette machine étaient certes peu intenses; les étincelles n'apparaissaient que dans l'obscurité. Peu de temps après, Hauksbee remplaça le globe de soufre par un globe de verre, que l'on frottait encore avec la main: l'électricité obtenue ainsi était *positive*, et les effets lumineux présentaient une plus grande intensité. Vers 1746, Winckler, professeur à Leipzig, et Sigaud de Lafond (1),



Fig. 19. — MACHINE D'OTTO DE GUÉRICKE.

(1) SIGAUD DE LAFOND (J. René), physicien et chirurgien français (1739-1819). Il est surtout célèbre comme chirurgien, et fit d'importantes découvertes dans l'art des accouchements. Cependant il s'occupa beaucoup de physique, principalement d'électricité, et il a laissé quelques ouvrages classiques de physique.

imaginèrent des coussins de crin recouverts de soie pour produire le frottement, au lieu de la main de l'expérimentateur. A la même époque, Bose (1), professeur de physique dans le duché de Wurtemberg, perfectionna la machine d'Hauksbee en adaptant à la machine, pour conducteur, un tube de fer-blanc, suspendu au plafond par des fils de soie et mis en communication avec le globe par une chaîne. L'abbé Nollet et la plupart des physiciens du XVIII<sup>e</sup> siècle préféraient de beaucoup cette machine, ainsi modifiée, à celles qui portaient des coussinets, et continuèrent à frotter avec la main le globe de verre (*fig.* à la page 25).

Les perfectionnements successifs de la machine électrique firent surgir des faits nouveaux dont l'étrangeté attira l'attention universelle. On consacra, en Allemagne et en Hollande, rapporte M. Hoeffler (2), des sommes considérables à ce genre d'expériences, et on en parlait dans les feuilles publiques. Au commencement de l'année 1744, Ludolph (3) parvint, le premier, à enflammer l'éther sulfurique avec un tube de verre électrisé. Il fit cette expérience durant la première réunion générale de l'Académie de Berlin. En mai de la même année, Winckler enflamma de l'alcool par une étincelle électrique tirée d'un de ses doigts, et Bose enflamma, par le même moyen, de la poudre à canon. Ce dernier se donna aussi beaucoup de peine pour s'assurer si l'électricité augmente le poids des corps, et il put se convaincre qu'il n'y a aucune augmentation de poids. Le P. Gordon et Winckler changèrent l'électricité en mouvement : le premier, en faisant tourner par ce moyen ce qu'il appelle *l'étoile électrique* (cercle de fer-blanc à trois rayons) ; le second, une roue. Watson fit, en 1745, partir des mousquets par des étincelles électriques ; et il constata, le premier, que l'électricité se propage toujours en ligne droite et qu'elle ne réfracte pas,

(1) BOSE (Georges-Mathias), physicien allemand (1710-1761), professeur de physique à Wittemberg. Il a publié, en latin et en allemand, un grand nombre d'ouvrages traitant de médecine, d'astronomie, de physique et tout spécialement d'électricité. Nous nous contenterons de citer : *Oratio de attractione ex electricitate* (1738, in-4°) ; *Tentamina electrica* (1744) ; *Description poétique de l'électricité, depuis sa découverte* (Wittemberg, 1744, in-4°) ; *Recherches sur la cause et la véritable théorie de l'électricité* (1745, in-4°).

(2) Nous avons si souvent déjà cité le nom de M. Hoeffler que nous croyons devoir consacrer une notice à ce modeste savant :

M. HOFFER (Ferdinand), né à Dœchitz (Thuringe) en 1818, fut Français de bonne heure, et resta tel même pendant nos désastres. Reçu docteur en 1840, il fut secrétaire du professeur Cousin pendant quelques années ; puis, après avoir publié quelques ouvrages de médecine pure, il se consacra aux travaux d'érudition, publia la *Biographie générale* chez MM. Didot, œuvre remarquable, puis rédigea, dans la collection des volumes historiques exécutée sous la direction de M. V. Duruy, l'*Histoire de la physique et de la chimie, de la botanique, de l'astronomie*, etc. M. Hoeffler est mort à Brunoy en 1878.

(3) LUDOLPH (Jérôme), petit-fils du célèbre mathématicien Jean-Job Ludolph (1708-1764), d'abord clerc de procureur, étudia dans ses loisirs et devint professeur de chimie à l'université d'Erfurt et, plus tard, médecin de l'électeur de Bavière.

comme la lumière, en traversant le verre. L'abbé Nollet électrisa pendant plusieurs jours une certaine quantité de terreau où l'on avait semé des graines, et il remarqua que ces graines germaient plus vite qu'à l'ordinaire.

Vers 1766 furent construites les premières machines électriques à *disques de verre*, qu'on faisait tourner à l'aide d'une manivelle. Priestley, dans sa première édition de son *Histoire de l'électricité*, nomme Ramsden comme leur inventeur, tandis que, dans la seconde édition du même ouvrage, il en attribue l'invention à Ingenhousz. Mais Sigaud de Lafond dit, dans son *Précis historique des phénomènes électriques*, que, dès 1756, il s'était servi avec avantage de disques de cristal, qu'il faisait tourner autour d'un axe. Ingenhousz rapporte aussi qu'il avait, en 1764, fait usage des machines électriques à disques de verre, qu'il en avait communiqué un modèle à Franklin et que ce fut d'après ce modèle que Ramsden et d'autres artistes fabriquèrent des machines électriques.

Quel qu'en soit l'inventeur, la machine dont on se sert assez généralement aujourd'hui est la machine électrique qui parut vers 1766, sous le nom de Ramsden, et qui, depuis cette époque, n'a reçu que quelques modifications insignifiantes.

**MACHINE DE RAMSDEN.** — Voici la description de cette machine (*fig.* à la page 33). Entre deux montants de bois est un plateau circulaire P, en verre, fixé par son centre à un axe que fait tourner une manivelle M. Ce plateau est ajusté, dans le sens de son diamètre vertical, entre quatre coussins F de cuir ou de soie rembourrés de crin, et passe, dans le sens de son diamètre horizontal, entre deux cylindres de laiton recourbés en forme de fer à cheval et nommés *peignes* ou *mâchoires*, parce qu'ils sont armés de pointes disposées des deux côtés en face du plateau. Ces peignes sont fixés dans les *conducteurs*, cylindres plus gros C, isolés sur quatre pieds de verre et qui communiquent entre eux par un cylindre de moindre dimension R. Enfin des bandes d'étain O, incrustées des deux côtés des montants qui soutiennent les coussins, font communiquer ceux-ci avec une chaîne de métal D et avec le sol.

Ceci établi, on comprend bien facilement la théorie de la machine, qui repose sur l'électrisation par le frottement et par influence. Le plateau de verre, dans son mouvement de rotation, s'électrise positivement, tandis que les coussins s'électrisent négativement. Mais ceux-ci étant en communication avec le sol, perdent à chaque instant leur électricité. Il ne reste donc que l'électricité positive développée à la surface du plateau de verre. Cette électricité décompose alors par influence le fluide neutre

des conducteurs, attire l'électricité négative qui, s'échappant par les pointes, vient la neutraliser à la surface du plateau à mesure qu'elle se produit et laisse sur les conducteurs l'électricité positive. La machine étant ainsi *chargée*, si l'on en approche la main, il s'en échappe une vive étincelle qui peut se renouveler, si l'on tourne encore le disque; en effet, elle est le résultat de la combinaison du fluide négatif de la main et du fluide positif de la machine, laquelle, à chaque étincelle, tend à reprendre l'état neutre lorsque l'influence du plateau l'électrise de nouveau.

La qualité d'une machine dépend principalement de la nature du verre du plateau. Le plateau ne doit guère avoir plus de 0<sup>m</sup>,80 de diamètre, et il ne doit pas être hygrométrique, ce qui fait préférer les verres de fabrication ancienne. Il faut aussi, avant de s'en servir, sécher avec soin toutes les parties de l'appareil et maintenir dans la pièce où l'on se trouve pendant les expériences une température modérée, ni trop chaude ni trop froide. Les coussins méritent une attention toute particulière, tant pour leur fabrication que pour leur état de conservation. Généralement ils sont en cuir fin, remplis de crin, et recouverts *d'or mussif*, matière pulvérulente qui est du deuto-sulfure d'étain et qui augmente beaucoup le développement de l'électricité; mais ce corps a l'inconvénient d'être rarement pur; il est presque toujours mélangé de substances hygrométriques qui paralysent son effet. Cependant M. Becquerel n'hésite pas à affirmer que l'état moléculaire des corps frottés influe énormément sur la production de l'électricité, et il a prouvé que les substances en poudre et douces au toucher, comme l'or mussif, le talc, la plombagine, la farine, la fleur de soufre, etc., développent beaucoup d'électricité. C'est pourquoi, depuis quelques années, on fabrique les coussins d'une planchette de noyer très sec sur l'une des faces de laquelle on colle une feuille de papier doré; on pose dessus une feuille d'étain repliée cinq fois sur elle-même et entre les plis de laquelle se trouvent quatre morceaux de flanelle destinés au rembourrage; on recouvre le tout avec de la moleskine, que l'on cloue sur les bords de la planchette; on enduit cette étoffe d'un amalgame d'étain, de bismuth et de zinc, et l'on coud par-dessus une bande de taffetas que l'on enduit de même. Steiner, qui a inauguré ce genre de coussinets d'après Van Marum, donne les proportions dans lesquelles le bismuth, l'étain et le zinc doivent être mélangés; il a même remarqué que la couleur de la moleskine influe sur le développement de l'électricité: la couleur jaune est celle qui convient le mieux, puis le vert, le bleu clair, le rouge et le blanc, ensuite le gris, le violet foncé et enfin le noir, qui n'est pas favorable.

La décomposition par influence, exercée par le plateau de la machine sur les conducteurs, a évidemment une limite: c'est ce qu'on nomme la



*tension maxima* de la machine. En effet, l'action décomposante du plateau de verre s'exerce principalement sur les parties les plus rapprochées du conducteur et donne lieu à du fluide positif qui se répand sur la surface.



L'abbé Nollet donna une commotion électrique aux religieux d'un couvent de chartreux (p. 51).

Mais celui-ci agit alors en sens inverse du plateau, de sorte qu'il arrivera nécessairement un instant où l'équilibre s'établira entre ces forces contraires. La charge électrique aura alors atteint sa limite. Cette limite d'ailleurs sera très variable suivant l'état de l'air.

On reconnaît que la machine fonctionne bien, la manière dont elle se charge et conserve son électricité, au moyen de l'*électromètre de Hanley*, que l'on visse sur un des conducteurs.

**MACHINE DE NAIRNE.** — La machine de Ramsden ne donne que de l'électricité positive; la machine de Nairne, médecin anglais, donne en même temps les deux électricités. Elle se compose (*fig.* à la page 33, tome II) de deux conducteurs A et B ne communiquant pas entre eux. L'un, A, porte les coussins C, tandis que l'autre, B, est armé de pointes P.

Entre ces deux conducteurs est un grand cylindre en verre M tournant autour de son axe au moyen d'une manivelle et qui, d'un côté, frotte contre les coussins, et de l'autre passe devant les pointes. Le conducteur qui porte les coussins s'électrise négativement, tandis que l'autre s'électrise positivement. Chaque conducteur porte une tige terminée par une boule, E et D; les deux fluides se trouvent en présence sur ces boules et se combinent par une série d'étincelles. Si l'on ne veut avoir qu'une électricité, on fait communiquer avec le sol le conducteur correspondant à l'autre électricité. Cette machine est aujourd'hui peu employée.

**MACHINE DE VAN MARUM.** — Van Marum, physicien hollandais, construisit aussi une machine qui donne à volonté l'une ou l'autre électricité. Cette machine (*fig.* à la page 33, tome II) se compose d'un plateau de verre P, tournant entre des coussins *c*, fixés sur des sphères de cuivre isolées par des pieds de verre. Devant le plateau est un arc de cuivre *a*, à deux branches, soutenu par un pied et auquel on peut faire prendre la position verticale ou la position horizontale. Enfin, de l'autre côté du plateau est une grosse sphère de cuivre A isolée sur un pied de verre et ayant un arc *d*, semblable à l'arc *a* et pouvant également être placé verticalement ou horizontalement.

Quand l'arc *d* de la sphère A est horizontal, ses extrémités touchent les coussins, tandis que celles de l'arc *a* vertical sont proches du plateau, mais sans le toucher. Les coussins s'électrisent négativement, cèdent leur électricité à l'arc *d*, puis à la sphère qui s'électrise négativement, tandis que l'électricité positive du plateau agit par influence sur l'arc *a* et neutralise son électricité négative. Le contraire a lieu quand l'arc *a*, étant horizontal, touche les coussins, l'arc *d* étant vertical.

**MACHINE D'ARMSTRONG.** — Ayant observé, vers 1840, que lorsque la vapeur d'eau, sous une forte pression, se dégage par de petits orifices,

elle se charge d'électricité positive tandis que la chaudière s'électrise négativement, Armstrong (1) construisit, d'après ce fait, une machine à laquelle on a donné le nom de *machine hydro-électrique*. Cette machine (fig. 20) consiste en une chaudière à vapeur isolée sur quatre pieds en verre. Au-dessus de la chaudière est un robinet destiné à donner issue à la vapeur et muni de plusieurs becs A, qui ont une disposition particulière. Chacun d'eux présente à son entrée une lame métallique sur laquelle la vapeur se brise avant de pénétrer dans le bec lui-même. Le bec est en *bois de perdriz*, et c'est le frottement contre ce bois qui produit l'électricité. Pour qu'il y ait frottement du liquide contre le bois, il faut que la vapeur contienne des gouttelettes liquides; on entoure à cet effet les tubes d'échappement d'une boîte B réfrigérante, qui condense partiellement la vapeur. Cette boîte B contient de l'eau à basse température; le niveau de cette eau n'atteint pas tout à fait les tubes; seulement des

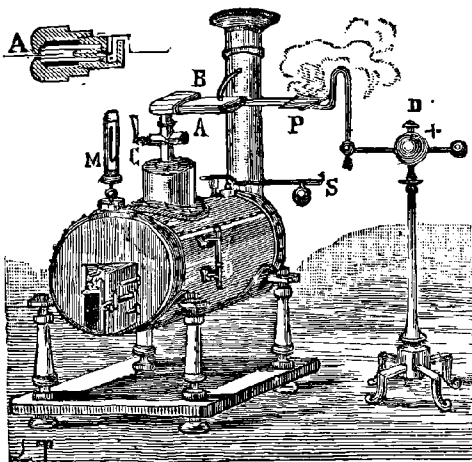


Fig. 20. — MACHINE D'ARMSTRONG.

mèches de coton, posées sur ces derniers, plongent dans le liquide par leurs extrémités, et, restant imbibées par capillarité (*Pesanteur*, page 231, tome I<sup>er</sup>), produisent un refroidissement convenable de la vapeur. Un petit manomètre M marque la tension de la vapeur; un tube de cristal O permet de connaître le niveau de l'eau dans la chaudière; S est une soupape de sûreté. Près de la chaudière est un conducteur isolé et armé de pointes P sur lesquelles on dirige la vapeur qui s'échappe par les orifices quand on tourne la clef C. Ce conducteur porte une boule B qui reçoit l'électricité de la vapeur, et sur laquelle on tire les étincelles. Cette machine est très puissante : avec une chaudière ayant seulement 0<sup>m</sup>,08 de longueur et 0<sup>m</sup>,04 de diamètre, on obtient plus d'électricité qu'avec trois machines de Ramsden ayant des plateaux de 1 mètre. A la Faculté des sciences de Paris, il y en a une qui

(1) ARMSTRONG (William-George), inventeur anglais (1810-1871), d'abord avocat, abandonna le barreau pour fonder un atelier de construction de machines et de canons. Le système de canons dont il est l'inventeur fut appliqué à toute l'armée anglaise en 1858 et devint célèbre. En récompense de ce service, Armstrong fut nommé chevalier du Bain et reçut une pension nationale. Outre ses canons et sa machine électrique, il inventa diverses machines à pression hydraulique.

donne des étincelles de plusieurs centimètres de largeur et de plusieurs décimètres de longueur.

**MACHINE DE HOLTZ.** — Toutes les machines que nous venons de décrire développent l'électricité par le frottement ; depuis quelques années,

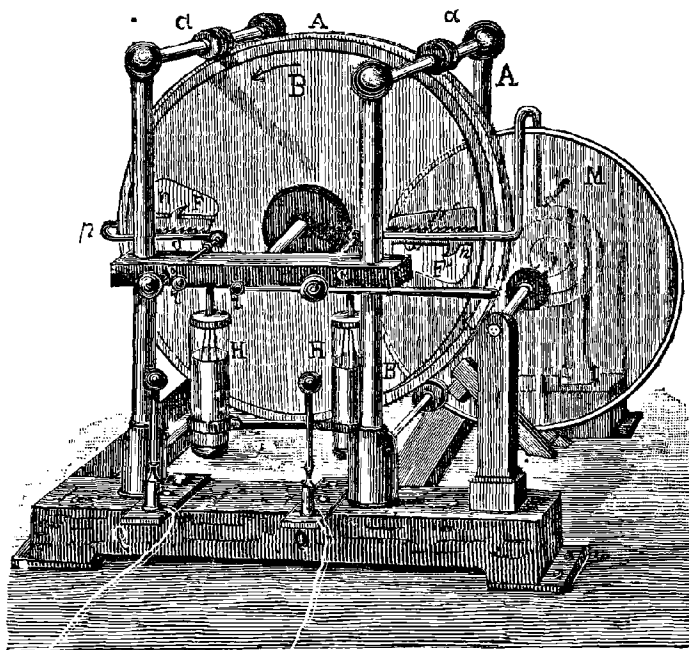


Fig. 21. — MACHINE DE HOLTZ.

on en construit d'un genre tout différent, dans lesquelles un corps, électrisé une fois pour toutes, agit par influence sur un système mobile et donne lieu à une production continue d'électricité.

A la fin du siècle dernier, il en avait été construit en Angleterre, paraît-il, sur les mêmes principes ; mais ce n'est qu'en 1865 que MM. Holtz, constructeur, de Berlin, et Tœpler, de Riga, présentèrent au public savant, chacun de son côté, un appareil de ce genre.

La machine de M. Tœpler, très compliquée d'ailleurs, est à peu près inconnue en France ; celle de M. Holtz est, au contraire, très répandue et son introduction dans les cabinets de physique constitue un service sérieux rendu aux sciences.

Nous décrivons la *machine de Holtz* telle que l'a modifiée, dans quelques détails, un habile constructeur de Paris, M. Andriveau, surtout

afin qu'elle pût servir à l'usage médical, comme nous le dirons ci-après.

Cette machine se compose (*fig.* 21) de deux plateaux de verre circulaires, distants entre eux de 3 millimètres et de diamètres différents. Le plus grand, A, est maintenu fixe par quatre morceaux de bois *a*, soutenus par des tiges et des pieds de verre. Devant ce plateau A est un second plateau BB, plus petit, qui tourne avec un axe horizontal de verre, lequel, par une ouverture centrale, communique avec le plateau fixe. Il porte, sur un même diamètre, deux grandes ouvertures ou fenêtres représentées en FF'.

Le long du bord inférieur de la fenêtre F et sur la face intérieure du plateau est fixée une feuille de carton *p*, et sur la face extérieure une languette *n* de carton mince, réunie au carton *p* par une feuille de papier qui passe par l'extrémité du bord de la fenêtre. L'ouverture F' est disposée de la même manière, et l'on appelle les feuilles de carton *p* et *p'* les *armatures* de la machine. Les deux plateaux de verre, les armatures et les languettes de carton sont recouverts d'une sorte de vernis de gomme laque. Devant le plateau B et à la hauteur des armatures sont placés deux *peignes* de cuivre OO', soutenus par deux conducteurs de même métal CC', lesquels se terminent à leurs extrémités antérieures par deux boules assez grosses que traversent deux tiges de cuivre terminées également par des boules *rr'*, assujetties à l'extrémité de manches de bois KK', et pouvant, non seulement tourner à frottement doux dans ces grosses boules, mais encore être placées, en même temps qu'elles, plus ou moins horizontalement.

La rotation du plateau B s'obtient au moyen de la manivelle M et d'une série de poulies et de courroies qui lui transmettent le mouvement, à raison de douze à quinze tours par seconde; la rotation étant dans le sens marqué sur la figure par une flèche, c'est-à-dire du côté des pointes des languettes *nn'*.

Pour faire fonctionner cette machine, il ne suffit pas de tourner le plateau B; il est nécessaire d'électriser d'abord les armatures *pp'*, l'une positivement, l'autre négativement; pour cela, on en touche une, soit *p*, avec une plaque de caoutchouc durci, électrisée négativement par le frottement avec une peau de chat, ou simplement avec la main. On a mis en contact les petites boules *rr'*; et ce n'est qu'après quelques tours du plateau qu'on les sépare. L'armature *p'* se trouve chargée d'électricité négative; elle réagit par influence sur le conducteur placé en face d'elles, refoule le fluide négatif sur la boule *r'*, tandis que le fluide positif s'écoule par le peigne O' sur le disque tournant. La boule *r* doit donc se charger

de fluide positif. Mais, en arrivant devant la fenêtre F, l'électricité positive du plateau décompose par influence le fluide neutre de l'armature, attire à elle le fluide négatif qui s'écoule par la pointe, et l'armature reste chargée de fluide positif. Le plateau, ramené à l'état neutre sur l'une de ses faces par le fluide négatif que lui fournit le peigne O, contient sur l'autre face du fluide négatif qui, en passant devant  $n$ , réagira sur cette armature comme sur  $n'$ , mais en lui fournissant l'électricité négative. De cette façon, la machine restitue aux armatures l'électricité que le contact de l'air leur fait perdre et en augmente même la dose.

La machine électrique de Holtz est, à égalité des plateaux, beaucoup plus puissante que toute autre. Sa puissance s'augmente encore si l'on suspend aux conducteurs CC' les deux condensateurs H, H' (page 52), qui consistent en deux tubes de gros verre, dont les parois intérieures et extérieures sont recouvertes d'une feuille d'étain jusqu'au cinquième environ de la hauteur. Chacun d'eux a son bouchon traversé par une tige de cuivre en forme de crochet, qui communique par une extrémité avec la feuille d'étain intérieure, et par l'autre avec l'un des conducteurs. Extérieurement, les deux feuilles d'étain sont en communication par le conducteur G.

En réalité, ces deux tubes ne sont autre chose que des *bouteilles de Leyde* (page 50) qui se chargent, l'une II, d'électricité positive à l'intérieur et négative à l'extérieur, et l'autre, II', d'électricité négative à l'intérieur et positive à l'extérieur. Chargés par l'intermédiaire de la machine et successivement déchargés par les sphères  $rr'$ , ils produisent des étincelles qui peuvent atteindre 0<sup>m</sup>,20 de longueur.

Pour utiliser le courant, on dispose, en avant du bâti qui supporte la machine, deux colonnes de cuivre QQ', desquelles partent deux fils de même métal, et l'on fait tourner les manches KK' de façon que les sphères  $rr'$  soient en contact avec les boules qui surmontent ces colonnes QQ'; on obtient alors, par les fils, un courant, comme avec une pile voltaïque, dont nous parlerons plus loin.

Ces machines ne sont pas encombrantes; d'un prix relativement modique, elles nécessitent beaucoup moins de force pour être mises en mouvement que celles à frottement, et produisent beaucoup d'électricité.

En France, la machine primitive de Holtz a été perfectionnée par de nombreux physiciens, entre autres par Pisch et par Bertsch; il s'agissait de la rendre plus sensible, plus simple, moins coûteuse. Le modèle que nous avons donné est un des plus récents et des plus estimés pour les cabinets de physique.

Il existe un grand nombre d'autres machines électriques, différant entre elles par des détails de construction, mais basées sur les mêmes principes.

Ainsi le journal *l'Électricité* rapporte que l'on a construit récemment en Allemagne une grande *machine électrique*, qui se compose de vingt disques parallèles, de 1<sup>m</sup>,30 de rayon, entre lesquels se trouve un système d'inducteurs parfaitement isolés et intercalés dans les intervalles. Ces inducteurs sont chargés alternativement d'électricité positive et d'électricité négative. Au-dessus des inducteurs se trouve un système de vingt peignes isolés l'un de l'autre, mais disposés de telle manière que tous les peignes pairs sont mis en communication, ainsi que tous les peignes impairs. Les derniers disques de chaque extrémité sont construits comme s'ils formaient une machine de Holtz indépendante, et des dispositions, dans le détail desquelles nous trouvons inutile d'entrer ici, permettent à la machine de s'exciter d'elle-même. En faisant faire à la machine vingt tours à la seconde, on obtient un courant dix fois plus fort, paraît-il, qu'avec une machine de Holtz

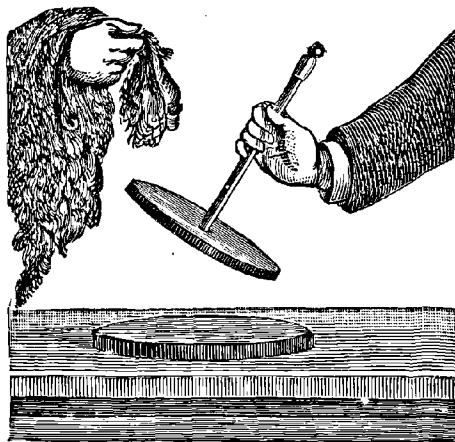


Fig. 22. — ELECTROPHORE.

ordinaire. En deux secondes, la machine pourrait charger trois batteries de dix-huit grosses bouteilles de Leyde, donnant chacune un courant de décharge assez énergique pour porter au rouge un fil fin de platine. Bien entendu, l'on prend la précaution de chauffer cette machine pour la mettre à l'abri de l'humidité de l'air, et l'on pratique dans l'enveloppe des trous par lesquels sortent les fils conducteurs. L'ozone (1) qu'elle produit est absorbé par de l'huile de lin ou de l'essence de térébenthine.

**ÉLECTROPHORE.** — On a souvent besoin, dans les laboratoires, d'une étincelle électrique; en chimie, par exemple, pour faire détoner dans l'eudiomètre un mélange de deux gaz. On obtient facilement cette étincelle au moyen d'un appareil plus simple que la machine électrique, et

(1) Voir notre CHIMIE, *Oxygène*, et, ci-après : *Électricité atmosphérique*. Contentons-nous de dire ici que l'ozone est l'oxygène modifié ou, suivant d'autres, décomposé par l'électricité. Les expériences de Priestley, de Cavendish et surtout celles de Van Marum, en démontrèrent l'existence. Puis vint Schœnbein, qui put se procurer une certaine quantité d'ozone et en étudier les réactions.

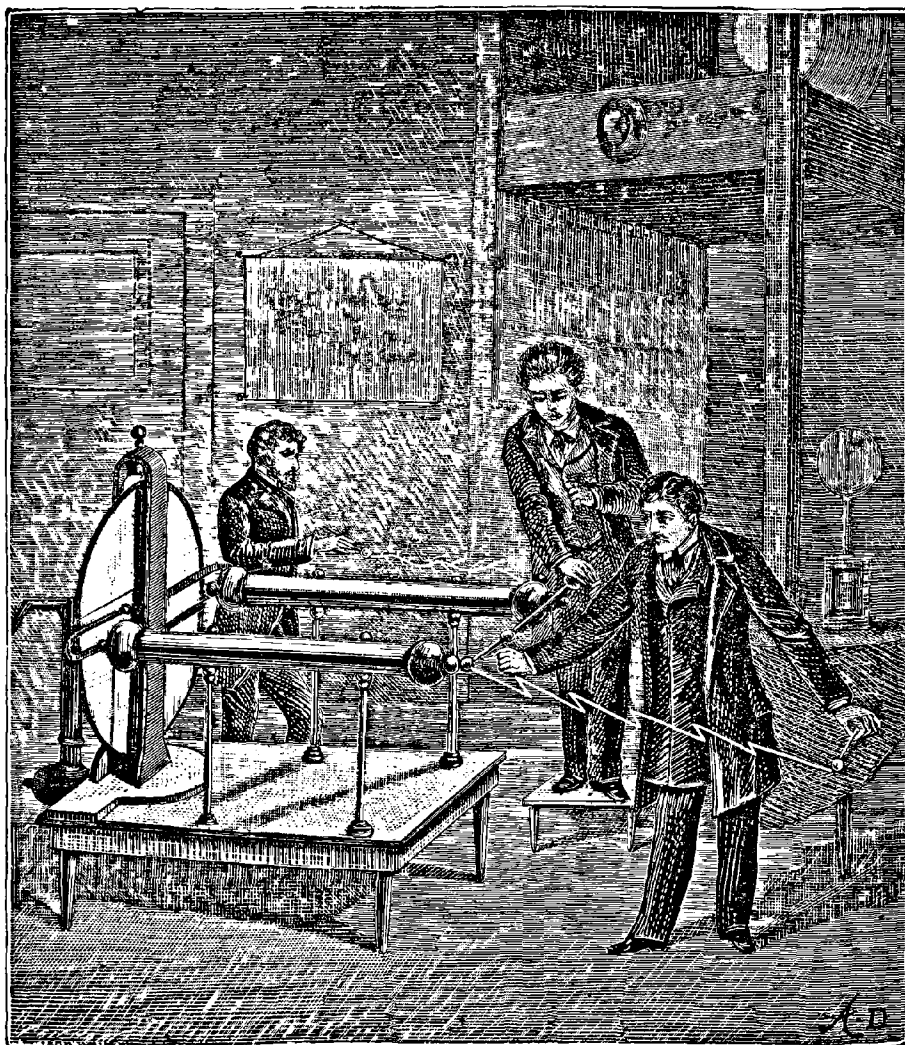
auquel on a donné le nom d'*électrophore* (du grec *electron*, électricité, et *phoros*, qui porte). Comme on le voit, cet instrument tire son nom de la propriété qu'il a de conserver longtemps l'électricité dont il est chargé.

Ce fut en cherchant à perfectionner la machine électrique que Volta et Wilcke, presque en même temps, furent conduits à imaginer cet instrument, qui se compose (*fig. 22*) d'un gâteau de résine et de cire coulé dans un moule en métal peu épais, mais offrant une surface aussi lisse que possible. On frappe la résine avec une peau de chat; elle s'électrise négativement. On pose alors dessus un disque de bois recouvert d'étain et muni d'un manche isolant en verre. Il n'y a pas communication d'électricité par contact, du moins d'une manière sensible, parce que la surface de la résine n'est jamais bien plane, et le contact du disque et du gâteau n'a lieu que par un très petit nombre de points. C'est une décomposition *par influence* qui se produit. L'électricité neutre du plateau est décomposée par l'électricité négative de la résine; le fluide positif est attiré à sa partie inférieure, et le fluide négatif est repoussé à sa partie supérieure. Que l'on touche alors le disque avant de le soulever et en le tenant par le manche isolant, le fluide négatif s'écoule dans le sol, et le fluide positif, devenu libre aussitôt que le disque est séparé du gâteau de résine, donne une vive étincelle à l'approche de tout corps bon conducteur qu'on lui présente. Comme la résine garde longtemps son électricité, surtout quand l'air est sec, si l'on replace le disque sur le gâteau, en le touchant de nouveau avec le doigt et en le soulevant ensuite, on obtiendra une nouvelle étincelle, et ainsi de suite pendant un temps très long.

**CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ. — BOUTEILLE DE LEYDE. — CARREAU ÉLECTRIQUE.** — En 1745, à Leyde, Musschenbroek et quelques amis, au nombre desquels était Cunæus, avaient observé, dit M. Hoefler, que des corps qui, après leur électrisation, étaient exposés à l'air, surtout à l'air humide, laissaient promptement échapper leur électricité, de manière à n'en conserver qu'une faible partie. Cette observation leur suggéra la pensée que, si l'on emprisonnait les corps électrisés dans d'autres corps non conducteurs de l'électricité, on pourrait arriver à augmenter leur puissance. Ils renfermèrent donc de l'eau dans des bouteilles de verre et les firent servir à leurs expériences. Mais, les résultats ne correspondant pas à leur conception, ils allaient y renoncer, lorsque Cunæus éprouva tout à coup une commotion épouvantable pendant qu'il essayait de détacher, avec une main, le fil de fer au moyen duquel la bouteille d'eau, qu'il tenait de l'autre main, communiquait avec le tube



électrisé. Musschenbroek, ayant répété l'expérience, en fut plus impressionné encore ; il lui fallut deux jours pour se remettre de son effroi, et il écrivait à Réaumur que, pour la couronne de France, il ne voudrait pas



L'étincelle électrique (pages 60 et 61).

s'exposer à une nouvelle décharge semblable. Ce fut là l'*expérience de Leyde*.

Quelques mois auparavant, Kleist, chanoine du chapitre de Camin, en Poméranie, avait obtenu, paraît-il, des effets analogues avec une fiole conte-

nant un clou et un fil de laiton électrisés ; mais ce fait était presque inconnu. La nouvelle de l'expérience de Leyde se répandit avec rapidité dans toute l'Europe. Allamand et Winckler la répétèrent d'abord, puis une foule de physiciens et de curieux. Chacun racontait complaisamment les chocs et les douleurs plus ou moins violentes ressenties dans les membres et la poitrine. Ce qui intéressait le plus particulièrement les expérimentateurs, c'était, indépendamment des sensations éprouvées, la violence et le bruit du choc, comparés à l'explosion d'une arme à feu, la grosseur des étincelles et la longueur des distances parcourues par l'électricité. Dans le

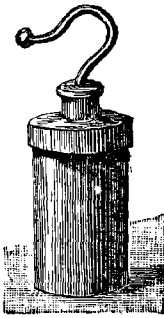


Fig. 23.  
BOUTEILLE  
DE LEYDE.

but d'augmenter ses effets, on rivalisa de zèle pour modifier l'instrument et l'amener peu à peu au degré de perfection où il se trouve aujourd'hui. Bevis appliqua à l'extérieur du flacon une feuille d'étain enveloppant la bouteille jusqu'à une certaine hauteur, afin de remplacer la main, de sorte que l'on pût placer la bouteille sur un support de bois ; et, pensant que l'eau, comme la main, jouait seulement le rôle de conducteur, il lui substitua de la grenaille de plomb. Watson prouva que le choc est plus violent quand le verre est plus mince et que la force de la décharge augmente proportionnellement avec l'étendue de la surface du verre, son intensité étant indépendante de la force de la machine électrique qui la provoque. L'abbé

Nollet montra que la forme de l'appareil n'entre pour rien dans le résultat ; que l'expérience échoue quand l'air est humide ; il remplaça l'eau ou la grenaille de plomb par des feuilles d'or ou de cuivre battu, en ayant soin de les laisser tomber simplement les unes sur les autres, sans les tasser, afin qu'elles présentent une plus grande surface, et il donna à la *bouteille de Leyde* la forme qu'elle a aujourd'hui, c'est-à-dire celle d'un bocal en verre mince (*fig. 23*) sur la paroi extérieure duquel est collée une feuille d'étain qui recouvre aussi le fond, mais laisse le verre à nu jusqu'à une assez grande distance du goulot. Dans ce goulot est un bouchon de liège, traversé par une tige de cuivre recourbée à l'extérieur en forme de crochet, et terminée par une petite boule qu'on nomme le *bouton* ; à l'intérieur, cette tige se prolonge au travers des feuilles d'or qui remplissent la bouteille. On donne au bouton et aux feuilles d'or le nom d'*armature intérieure*, et à la feuille d'étain celui d'*armature extérieure*.

Les expériences de l'abbé Nollet eurent un grand retentissement. En 1752, il exécuta, à Versailles, une expérience devant une commission de l'Académie des sciences, le roi, la reine et toute la cour. Il donna une commotion électrique à toute une compagnie de gardes-françaises, com-

posée de deux cent quarante hommes qui se tenaient par la main, formant ce que l'on appela dès lors la *chaîne électrique*. La commotion se fit sentir à tous les soldats. Quelques jours après, l'abbé Nollet soumit à la même épreuve tous les religieux d'un couvent de chartreux (*fig.* à la page 41).

Pour ces expériences, il avait réuni plusieurs grandes bouteilles de Leyde dans une caisse de bois, formant ainsi ce que l'on nomme une *batterie électrique*. Dans cet appareil, toutes les armatures intérieures des bocaux, appelés *jarres*, communiquent entre elles par des tiges métalliques qui vont se réunir à un bouton central commun (*fig.* 24); quant aux armatures extérieures, elles sont en communication entre elles par une feuille d'étain qui revêt le fond de la caisse, et sur laquelle elles s'appuient. Une batterie se charge, comme la bouteille de Leyde ordinaire, en faisant communiquer l'armature intérieure avec la machine électrique au moyen d'une tige métallique, et l'armature extérieure avec le sol par une chaîne. Les parois des jarres sont recouvertes d'étain en dedans comme en dehors, et les feuilles d'étain intérieures communiquent, par une petite chaîne métallique, au bouton de chaque jarre. Plus celles-ci sont nombreuses, et plus leurs armatures présentent de surface, plus on peut y accumuler d'électricité; mais aussi plus il faut de temps pour charger la batterie. Celle-ci une fois chargée, on enlève le conducteur qui établit la communication avec la machine, en ayant soin, pour cela, de faire usage d'un crochet à manche de verre, afin d'éviter une commotion qui pourrait occasionner des accidents graves.

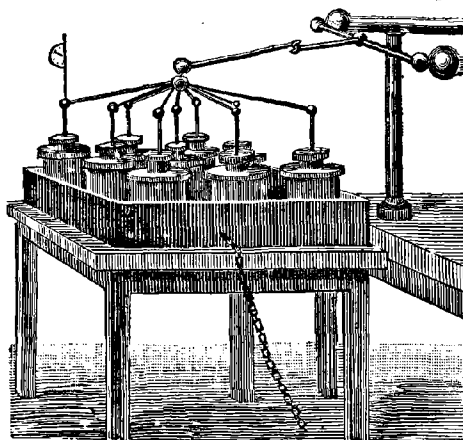


Fig. 24. — BATTERIE ÉLECTRIQUE.

En 1747, peu de temps après l'expérience de Leyde, Bevis trouva qu'un « plateau de verre recouvert d'une mince lame métallique (feuille d'étain) d'un pied carré produisait les mêmes effets qu'une bouteille de Leyde d'une demi-pinte remplie d'eau. » Il en conclut « que la force électrique dépend de la grandeur de la surface recouverte et armée, et non de la masse de la matière qui recouvre le carreau. » Cette expérience, connue sous le nom d'expérience du *carreau magique*, est devenue vulgaire, et les électriciens des places publiques l'exécutent souvent, au moyen d'une plaque de verre dont chaque face est recouverte d'une feuille d'étain

(fig. 25). On place sur la plaque une pièce de monnaie, et, après avoir électrisé l'appareil, on invite un des assistants à prendre la pièce. Dès que la personne en approche la main, elle reçoit aussitôt une forte commotion qui lui fait fléchir le bras et la met en fuite.

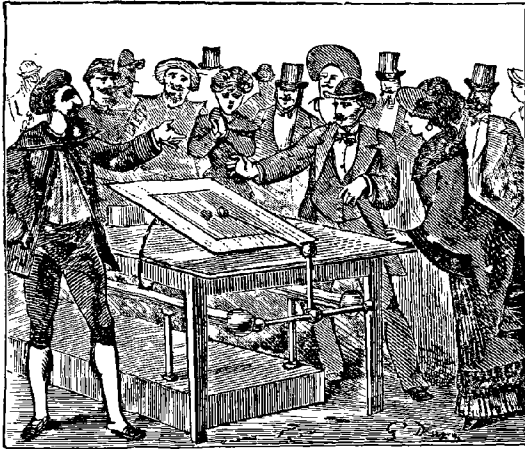


Fig. 25. — CARREAU MAGIQUE.

#### CONDENSATEUR D'ÆPINUS.

— Tous les physiciens de l'Europe, après avoir répété les expériences de la *bouteille de Leyde* et du *carreau magique*, cherchèrent à en trouver la théorie. Æpinus et Franklin surtout s'en occupèrent particulièrement, donnant le nom général de *condensateurs* à tous les appareils qui, comme la *bouteille de Leyde* et le *carreau magique*, accumulent par électrisation par influence, sur

des surfaces relativement petites, des quantités considérables d'électricité.

Le *condensateur d'Æpinus* est formé de deux plateaux circulaires de cuivre A et B, et d'une lame de verre C qui les sépare (fig. 26). Chacun de ces plateaux, muni d'un pendule électrique a et b, et isolé sur un pied de verre, peut courir dans une rainure pratiquée dans la table de bois qui soutient l'appareil, tandis que la lame de verre C reste fixe.

Pour charger ce condensateur, c'est-à-dire pour accumuler les deux électricités sur les plateaux A et B, on les place l'un et l'autre en contact avec la lame de verre; l'on fait ensuite communiquer par une chaîne métallique l'un d'eux A avec une machine électrique, et l'autre B avec le sol. Le disque A s'électrise positivement, comme la machine, et s'il restait seul, il prendrait, à égalité de surface, la même quantité de fluide, sauf

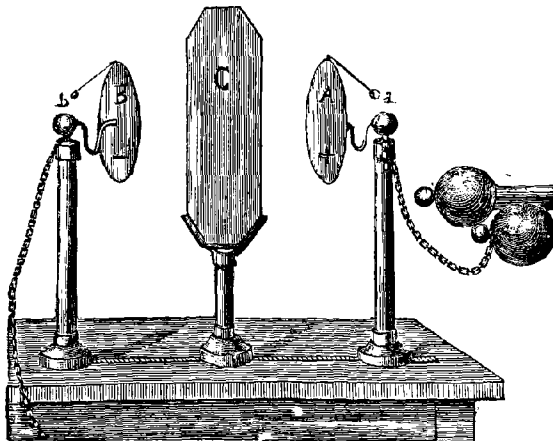


Fig. 26. — CONDENSATEUR D'ÆPINUS.

L'influence de la forme ; mais la présence du disque B change complètement le phénomène, de sorte qu'il est la cause de l'accumulation des deux électricités. En effet, le fluide positif du disque A agit par influence sur le disque B à travers le plateau de verre C, attire le fluide négatif et repousse dans le sol le fluide positif ; à son tour, le fluide négatif du disque B réagit sur le fluide positif de A et le neutralise, mais seulement en partie, à cause de l'espace qui les sépare. D'après cela, la tension électrique dans le disque A n'équilibre pas celle de la machine ; d'où il résulte que celle-ci donne au plateau une nouvelle quantité de fluide positif, lequel agit comme précédemment sur le disque B, et ainsi de suite, de sorte qu'entre les deux disques s'accumulent, se *condensent*, des quantités considérables d'électricités contraires jusqu'à une certaine limite dont nous parlerons tout à l'heure. Le plateau *condensateur* C une fois chargé, si l'on interrompt les communications des disques avec le sol et avec la machine, on observe que le pendule *a* diverge seul, tandis que le pendule *b* reste vertical : la divergence du premier s'explique par l'excès de l'électricité du plateau A, et, pour rendre compte que le pendule *b* reste vertical, on admet généralement que l'électricité négative du plateau B est toute neutralisée à distance par l'électricité positive du plateau A, ce que l'on exprime en disant que, dans le plateau C, l'électricité est *dissimulée* ou à l'état *latent*, sans que l'on doive entendre, par cette expression, que cette électricité ait en rien perdu de ses propriétés ordinaires, mais seulement que les effets de chaque espèce de fluide sont contre-balancés à distance par ceux du fluide contraire. Cependant, on commence à abandonner ces dénominations d'*électricité dissimulée*, *électricité latente*, parce qu'en effet cette dissimulation est plus apparente que réelle, comme le prouve une seconde théorie des condensateurs que voici.

Convenons d'appeler faces *antérieures* des plateaux celles qui regardent la lame de verre C, et *postérieures* celles qui lui sont opposées ; puis supposons le plateau B assez distant de A pour ne recevoir de lui aucune influence. Si alors on fait communiquer le plateau A avec la machine électrique, il acquiert une force très grande qui se distribue également sur les deux faces, et le pendule *a* diverge beaucoup. En supprimant la communication, il ne varie en rien ; or, en approchant peu à peu le plateau B, que nous supposons pour un instant isolé du sol, son fluide neutre est décomposé par l'influence de A, son électricité négative ira à la face antérieure et la positive à la face postérieure, et l'on voit en effet diverger le pendule *b*. Il s'ensuit qu'à son tour l'électricité négative du plateau B, agissant par attraction sur l'électricité positive du plateau A, le fluide de celui-ci cesse de se distribuer également sur les deux faces et s'accumule

presque tout sur la face qui regarde l'autre plateau, et, effectivement, le pendule *a* commence à retomber. Si alors on met le plateau B en communication avec le sol, toute son électricité positive s'écoule, il ne conserve que le fluide négatif; mais en même temps il se produit en lui une nouvelle décomposition du fluide neutre, qui donne à sa face antérieure une plus grande quantité de fluide négatif, et par conséquent le fluide positif tend à passer de la face postérieure du plateau A dans la face antérieure, comme l'indique le pendule *a*, qui retombe davantage. La face postérieure du plateau A étant ainsi presque revenue à l'état neutre, on conçoit que si on place de nouveau celui-ci en communication avec la machine électrique, il acquerra une autre charge d'électricité positive, laquelle se partagera en deux parties : l'une qui se condensera sur la face antérieure du plateau, et l'autre qui ira sur la face postérieure et fera augmenter la divergence du pendule *b*. En augmentant progressivement le fluide qui s'accumule sur les deux faces, le pendule arrivera enfin à indiquer la même divergence que lorsque, au commencement de l'expérience, le plateau A était chargé sans être soumis à l'influence de B. En établissant alors l'équilibre entre la tension de l'électricité sur la face postérieure du plateau et la machine électrique, on obtiendra la limite de la charge.

Dans cette façon de considérer la théorie des *condensateurs*, on voit que, sans recourir à l'hypothèse de l'*électricité dissimulée*, on explique mieux la condensation électrique par l'accumulation du fluide sur la face postérieure du plateau *collecteur*, accumulation qui permet à une nouvelle charge de se porter sur la face antérieure.

La *bouteille de Leyde* est donc un véritable condensateur, dont la lame isolante est la paroi même de la bouteille, et dont les deux plateaux métalliques sont, l'un la feuille d'étain extérieure, et l'autre les feuilles d'or qui remplissent la bouteille. Il en est de même du *carreau magique*.

Pour charger la bouteille de Leyde, on la tient par la main, et, en approchant le *bouton* d'une machine électrique en activité, l'armature intérieure reçoit de l'électricité positive, tandis que l'armature extérieure reçoit à travers le verre une grande quantité de fluide négatif. On peut encore charger plusieurs bouteilles de Leyde à la fois en les suspendant les unes au-dessous des autres au conducteur de la machine électrique, de manière que l'armature extérieure de la première communique avec l'intérieur de la seconde, et ainsi de suite jusqu'à la dernière, dont l'armature extérieure doit communiquer avec le sol. Cette méthode s'appelle *charge par cascade*.

La bouteille une fois chargée, on peut impunément tenir d'une main l'armature extérieure; mais si l'on touche en même temps le bouton de l'autre main, on recevra une forte commotion par suite de la décharge de la bouteille.

**LIMITE DE CHARGE DES CONDENSATEURS.** — La quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur chacune des faces d'un condensateur est, dans des circonstances analogues, proportionnelle à la tension de la source électrique et à la surface des plateaux; de plus, elle décroît quand augmente l'épaisseur de la lame isolante. Dans tous les cas, deux causes limitent la quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur les deux faces des condensateurs: la première, c'est que, l'électricité libre augmentant graduellement sur le plateau collecteur; la tension sur celui-ci arriverait nécessairement à égaler celle de la machine, et à un moment celle-ci ne pourrait en céder au condensateur; la seconde est la résistance limitée que présente à la recombinaison des deux électricités la lame isolante placée entre les deux plateaux; lorsque, en effet, la tension des deux fluides pour se recombinaison est plus forte que leur résistance, cette recombinaison a lieu.

**DÉCHARGE DES CONDENSATEURS.** — Lorsque le condensateur est chargé, c'est-à-dire lorsque sur les deux faces sont accumulées les électricités contraires, les communications s'interrompent avec la machine électrique et avec le sol en retirant les chaînes métalliques. Pour le disque le plus voisin de la machine (*fig.* 26), une seule partie de l'électricité du plateau A est alors neutralisée, tandis que celle du plateau B l'est complètement. En effet, le pendule *a* diverge seul, et *b* reste vertical; mais si l'on éloigne les plateaux, les deux pendules divergent aussitôt parce que les électricités ne se neutralisent pas. En plaçant alors les plateaux en contact avec la lame isolante C, on peut *décharger* le condensateur, c'est-à-dire le ramener à l'état neutre par deux moyens, par *décharge lente* ou par *décharge instantanée*.

Pour décharger le condensateur *lentement*, on approche le doigt du plateau A, on obtient une petite étincelle, le pendule *a* retombe aussitôt et à l'instant même le pendule *b* s'écarte du plateau B. Une certaine quantité d'électricité négative devient donc libre à son tour sur le plateau B, tandis que le fluide positif qui reste sur le plateau A est complètement neutralisé. Si maintenant on touche le plateau B, on obtient une seconde étincelle, le pendule *b* retombe, et le pendule *a* se relève de nouveau, ce qui accuse un nouvel excès d'électricité positive devenue libre

sur ce plateau A. En continuant à toucher alternativement les deux lames, les mêmes effets se reproduiront. On enlèvera ainsi, à chaque contact, une partie du fluide dont chaque lame est chargée, ce qui donnera une longue série d'étincelles électriques dont l'intensité ira s'affaiblissant jusqu'à ce que l'appareil soit complètement déchargé.

Si l'on veut décharger *instantanément* le condensateur, on fait communiquer les deux plateaux au moyen d'un *excitateur*. On appelle ainsi un appareil (*fig. 27*) formé de deux arcs de laiton, terminés par des petites boules du même métal, réunis par une charnière.

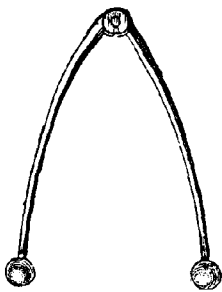


Fig. 27.

EXCITATEUR.

Deux manches de verre servent souvent à tenir l'instrument et à préserver l'expérimentateur de toute commotion, si le condensateur était fortement chargé. Pour se servir de l'excitateur, on applique une des boules sur un des plateaux du condensateur, puis l'autre boule sur l'autre plateau; une vive étincelle jaillit alors provenant de la recombinaison des deux électricités accumulées sur les deux faces du condensateur.

Une première étincelle ne suffit pas toujours pour décharger le condensateur; on peut obtenir encore une petite étincelle en les réunissant de nouveau, et cela même un certain nombre de fois; c'est ce que l'on appelle les *décharges secondaires*. Cela s'explique facilement. En effet, il résulte de la théorie que la quantité d'électricité du plateau collecteur surpasse celle du plateau condensateur. Il reste donc, après la première décharge, une certaine quantité d'électricité sur le premier plateau. Celle-ci détermine la production d'électricité contraire sur le second plateau, mais toujours en quantité moindre qu'elle-même. Les étincelles diminuent cependant rapidement d'intensité, et, au bout de peu de temps, elles cessent d'être perceptibles.

De plus, les électricités de nom contraire, s'attirant à travers une lame isolante, se portent, au moins pour la plus grande partie, sur les deux faces de cette lame, et même pénètrent à une certaine profondeur dans l'intérieur. Or, au moment de la décharge, le défaut de conductibilité de la lame oppose au mouvement des fluides une certaine résistance qui empêche leur neutralisation complète. Il se produit ainsi une nouvelle disposition de l'électricité qui donne lieu aux diverses décharges successives. Pour démontrer expérimentalement que, dans tous les condensateurs, les deux électricités ne résident pas uniquement dans les armatures, mais surtout dans la plaque de verre qui les sépare, on se sert d'une bouteille, imaginée par Franklin, dont les différentes parties peuvent se séparer



(fig. 28). Cet appareil se compose d'un grand vase conique en verre, d'une armature extérieure de fer-blanc et d'une autre intérieure de même matière supportant le crochet : le tout réuni forme une *bouteille de Leyde*.



Expériences de l'abbé Nollet  
(d'après la gravure de son livre intitulé : *Essai sur l'Électricité*) [page 61].

On la charge comme d'ordinaire, on l'isole sur un gâteau de résine; on retire ensuite avec la main l'armature intérieure, puis le vase de verre, et on les place l'une à côté de l'autre, le vase de verre étant à une extrémité. Il est évident que les deux armatures reviennent alors à l'état neutre. Si

alors on les replace dans l'ordre sur le gâteau de résine, d'abord l'armature extérieure, puis le vase de verre dedans, puis l'armature intérieure à sa place, la bouteille de Leyde est reconstituée, et donne une étincelle comme si les armatures n'avaient point été déchargées.

Il y a *décharge conductive*, c'est-à-dire par conductibilité électrique, lorsque l'électricité traverse des corps conducteurs.

La décharge est dite *disruptive* lorsqu'elle se produit à travers un

corps isolant qui se trouve rompu par la décharge. C'est une *décharge disruptive* qui se produit quand l'étincelle jaillit dans l'air et déplace violemment les molécules. Voici quelques expériences de décharge éruptive qui se font souvent dans les cabinets de physique.

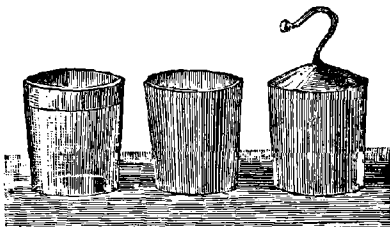


Fig. 28.

BOUTEILLE A ARMATURES MOBILES.

**PERCE-VERRE. PERCE-CARTE.** — On dispose (*fig. 29*) sur un tube une lame de verre, qui se trouve ainsi placée en contact avec une pointe de fer située dans l'axe du tube; on met un peu d'huile là où la pointe touche le verre, afin de s'opposer à la diffusion de l'électricité; si alors on fait passer une étincelle d'une bouteille de Leyde, dont la charge soit suffisante, ou d'une batterie, le verre se trouve percé d'un trou rond.

L'expérience du *perce-carte* mérite d'être citée; elle met en évidence un fait très important (page 15). On dispose entre deux pointes faisant partie de deux garnitures métalliques, séparées l'une de l'autre par une colonne de verre (*fig. 30*), une carte ordinaire. Les pointes sont en contact avec la carte de chaque côté de celle-ci, mais de façon que les deux pointes soient à 2 ou 3 centimètres de distance. On fait éclater l'étincelle d'une bouteille de Leyde entre elles, et la carte se trouve percée en un point situé en face de la pointe négative. Il résulte de là que l'électricité positive a plus de facilité pour franchir les obstacles qui se trouvent sur son passage que l'électricité négative; elle traverse effectivement l'air pour venir rejoindre la négative en face de la pointe par où débouche celle-ci. Mais l'action n'a pas lieu seulement comme si le flux électrique se transmettait de la pointe + à la pointe —, car l'ouverture de la carte a des bavures de chaque côté, ce qui montre qu'au milieu du papier constituant

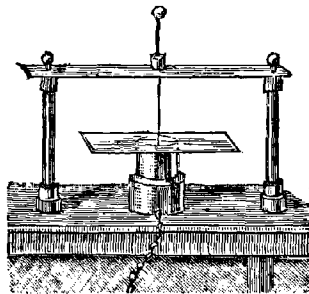


Fig. 29. — PERCE-VERRE.

la carte il y a eu décomposition des électricités par influence, et ensuite déchirure dans tous les sens. Si l'on place l'appareil du *perce-carte* sous la cloche d'une machine pneumatique, on trouve que, dans l'air raréfié, l'ouverture n'est plus placée en face de la pointe négative, qu'elle se déplace et tend à se mettre au milieu de la distance qui sépare les deux pointes. C'est donc sous l'action d'une pression extérieure que l'ouverture tend à se produire en face de la pointe négative.

**VITESSE DE PRÓPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ.** — Dès les premières expériences faites avec la bouteille de Leyde, on chercha à s'assurer si la vitesse de transmission de l'électricité à une certaine distance pouvait être appréciée. En France, Lemonnier (1) et l'abbé Nollet; en Angleterre, Watson (2), firent de nombreuses expériences montrant que cette vitesse de transmission était trop grande pour permettre une mesure directe. Ce n'est qu'en 1834 que M. Wheastone trouva un moyen de mesurer la durée de l'étincelle; dès lors, on put se former une idée de l'énorme vitesse de propagation de l'électricité.

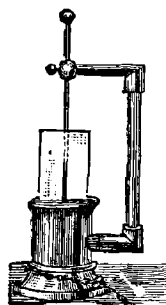


Fig. 30.

PERCE-CARTE.

L'appareil à l'aide duquel M. Wheastone a tenté de déterminer cette vitesse consiste en un miroir tournant autour d'un axe vertical avec une très grande rapidité (800 tours par minute); on place en avant de ce miroir deux boules situées sur une même ligne verticale, et destinées à faire éclater entre elles une étincelle. Si l'on examine l'image de l'étincelle par réflexion dans le miroir quand celui-ci est fixe, on voit une ligne lumineuse verticale, parce que le passage rapide d'un point lumineux paraît une ligne continue, par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine. Mais si l'électricité met un certain temps à passer d'une boule à l'autre, et que le mouvement de rotation du miroir soit extrêmement rapide, alors l'étincelle devrait paraître une ligne inclinée dans le sens du mouvement de rotation. Pour réaliser cette expérience, on place verticalement au-dessus l'un de l'autre plusieurs systèmes de boules semblables aux pré-

(1) LEMONNIER (Pierre-Charles), fils du professeur de philosophie, membre de l'Académie des sciences, Pierre LEMONNIER, fut lui-même professeur de physique au Collège de France, membre de l'Académie des sciences. Il a laissé quelques ouvrages d'astronomie. Il eut pour élève Lalande, avec lequel il eut plus tard de vives discussions (1745-1799).

(2) WATSON (William), physicien anglais (1715-1787). D'abord tailleur, puis apothicaire, il se livra avec passion à la botanique, et fut admis en 1741 à la Société royale. Il se livra alors à ses travaux sur l'électricité et particulièrement sur l'électricité atmosphérique. Après s'être fait recevoir médecin, il fut attaché à l'hospice des Enfants trouvés en 1762. La noblesse à vie lui fut accordée en 1786.

cédentes et dans les mêmes positions vis-à-vis du miroir, puis on interpose le circuit métallique que parcourt l'électricité entre deux systèmes de boules. Alors l'électricité éprouvant un retard dans son passage à travers le fil, les images des étincelles sur le miroir tournant, au lieu d'être sur la même ligne verticale, paraissent placées sur une ligne brisée. M. Wheastone put déduire de ses expériences que la décharge emploierait  $\frac{1}{1\ 152\ 000}$  de seconde pour parcourir un fil de cuivre de 400 mètres de longueur; donc, dans une seconde, l'électricité parcourrait  $1\ 152\ 000 \times 400^m = 460\ 800$  kilomètres, vitesse bien supérieure à celle de la lumière, qui parcourt seulement 19 250 kilomètres par seconde.

**ÉTINCELLE.** — Le premier phénomène que l'on observe, lorsqu'on fait des expériences avec une machine électrique, est la vive étincelle qui se produit lorsqu'on approche la main des conducteurs, et nous avons parlé de l'enthousiasme de ceux qui découvrirent que l'on pouvait en tirer du corps humain. Ces étincelles proviennent de la combinaison des deux fluides contraires, par suite d'une électrisation par influence. En effet, le fluide positif de la machine, agissant à distance sur le fluide neutre de la main pour le décomposer, repousse dans le sol le fluide positif et attire le fluide négatif. Or, lorsque l'attraction mutuelle des électricités contraires de la machine et de la main l'emporte sur la résistance de l'air, les deux fluides font explosion pour se réunir, avec un bruit sec et une vive lumière qui constituent l'étincelle électrique. Cette étincelle est de forme variable; quand elle se produit à peu de distance, elle forme une ligne droite; à 5 ou 6 centimètres de distance, elle présente la forme d'une courbe sinueuse, accompagnée de ramifications très fines (*fig.* à la page 49); enfin, si la décharge est très forte, l'étincelle est en zigzag. Les étincelles des nuées orageuses affectent toujours ces deux dernières formes.

On s'est beaucoup occupé autrefois des moyens d'accroître la longueur de l'étincelle; on y parvient en faisant communiquer les conducteurs principaux de la machine avec des conducteurs d'une section plus petite et d'une assez grande longueur, appelés *conducteurs secondaires*. Volta obtint ainsi des étincelles de 0<sup>m</sup>,60.

La couleur de l'étincelle électrique dépend de la nature des conducteurs métalliques entre lesquels elle jaillit, et du milieu gazeux dans lequel elle se produit. Lorsque l'étincelle est forte, la première influence tend à prédominer; c'est le contraire quand l'étincelle est faible. La modification qu'apporte la substance est due, sans doute, à une portion de cette substance qui se vaporise: l'étincelle est jaune, si c'est du charbon;

verte, si c'est du cuivre; carmin, si c'est du bois ou de l'ivoire. Quant au milieu ambiant, on a constaté que l'étincelle est blanche dans l'air ou dans l'oxygène, avec une nuance de bleu; rouge dans l'hydrogène, bleue dans l'azote, ou rouge, et accompagnée d'un bruit particulier; verte dans l'acide carbonique et dans la vapeur de mercure.

Les propriétés physiologiques de l'étincelle sont d'une nature toute spéciale et difficile à définir. Si l'on tire avec le doigt une étincelle d'une machine électrique, on éprouve une sorte de choc douloureux dans les articulations des bras qui les fait fléchir immédiatement : ce choc est plus ou moins violent, selon la puissance de la machine. Avec une machine de Ramsden dont le plateau aurait 1<sup>m</sup>,50 ou 2 mètres de diamètre et un système convenable de conducteurs secondaires, les étincelles pourraient être redoutables. Si une personne se place sur le tabouret isolant, c'est-à-dire à pieds en verre, et qu'elle pose sa main sur le conducteur d'une machine (*fig.* à la page 49), elle éprouve, sur le visage, une sensation de frottement léger, comparé par l'abbé Nollet à celui que produirait une toile d'araignée (*fig.* à la page 57). Elle devient une dépendance ou un prolongement du conducteur lui-même; elle s'électrise; ses cheveux se hérissent et deviennent lumineux dans l'obscurité. Si l'on approche d'elle un corps conducteur, les cheveux retombent à chaque étincelle produite pour se relever immédiatement après.

On démontre que l'étincelle électrique produit un ébranlement mécanique très intense dans le milieu où il se produit au moyen du *mortier électrique* et du *thermomètre de Kinnersley* (*fig.* 31). L'expérience du *mortier électrique* se comprend à l'inspection de la figure. La boule placée sur les conducteurs est projetée dès que l'on tire une étincelle d'une machine. Quant au *thermomètre*, il se compose de deux tubes de verre d'inégal diamètre; le plus large est complètement fermé; quant à l'autre, il communique d'un côté avec le gros tube, de l'autre avec l'air. La partie supérieure du large tube est traversée par une tige métallique terminée en boule, qui peut se placer à une distance variable d'une autre boule communiquant avec la garniture inférieure de l'appareil. On verse de l'alcool dans ce tube jusqu'à la hauteur de la boule inférieure. Que l'on

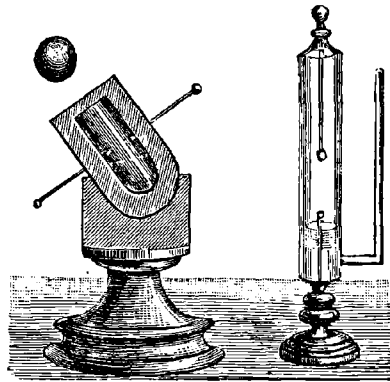


Fig. 31.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES  
DE L'ÉTINCELLE.

fasse alors passer une étincelle à l'intérieur, le liquide du petit tube sera projeté avec une grande violence, à plusieurs mètres en l'air, si l'étincelle est assez forte.

Il se dégage évidemment en même temps de la chaleur. Kinnersley attribuait même seulement à elle le mouvement du liquide ; c'est pourquoi il avait appelé son appareil *thermomètre*, et on lui a laissé ce nom.

Les effets calorifiques sont très variés et on les observe toutes les fois que l'électricité est transmise au travers des corps. En faisant éclater l'étincelle au travers de l'alcool ou de l'éther, on enflamme ces liquides ; on les place pour cela dans un petit vase en verre ayant au fond un bouton métallique communiquant au manche, également en métal,



Fig. 32. — INFLAMMATION  
D'UN CORPS COMBUSTIBLE.

en relation avec un conducteur de machine électrique (*fig. 32*). L'appareil est disposé de manière que l'électricité éclate entre le fond du vase et une boule placée au-dessus du liquide ; de cette façon, l'étincelle est forcée de traverser l'alcool ou l'éther et produit son inflammation. Elle agit particu-

lièrement sur le mélange d'air et de vapeur qui se trouve au-dessus de la surface du liquide. Si l'on entoure la boule d'un excitateur à manche avec du coton saupoudré de résine pilée, et qu'en déchargeant une jarre ou une bouteille de Leyde on fasse éclater l'étincelle au milieu de ce mélange, la résine est enflammée. On peut enflammer aussi d'autres corps combustibles, tels que la poudre à canon ; c'est même à l'aide de cette propriété que l'on peut enflammer à distance les poudres des mines ; mais l'on se sert plus généralement de procédés et d'appareils que nous décrirons plus loin.

Lorsque l'étincelle électrique traverse des fils fins de métal, souvent le fil s'échauffe sur une certaine longueur jusqu'à l'incandescence, la fusion ou la volatilisation, suivant l'intensité de la décharge électrique. Pour montrer ce phénomène, on dispose entre les branches d'un *excitateur* un fil très fin d'or ou de fer et on fait passer au travers une décharge à l'aide d'une batterie suffisamment puissante. Les fils de soie dorée présentent un phénomène curieux, qui montre avec quelle rapidité les molécules de matière conductrice sont saisies par l'électricité : l'or qui les recouvre est volatilisé sans que la chaleur soit capable de brûler la soie.

On se sert également des effets de fusion produits avec les lames minces d'or et de platine pour produire une très jolie expérience, connue sous le nom de *portrait électrique*. Pour cela, sur un carton mince on dé-

coupe à jour le portrait qu'on veut reproduire, puis on colle une feuille d'étain sur le reste du carton. On applique ensuite sur la découpure une mince feuille d'or, en ayant soin qu'elle touche les deux feuilles d'étain. On place dessus un second carton, et dessous un ruban de soie blanche ou du papier, etc. On porte le tout sous une presse de bois (*fig. 33*) qu'on serre fortement, en laissant déborder les feuilles d'étain. En faisant alors passer la décharge d'une batterie entre les lames d'étain, celles-ci, plus épaisses, ne sont pas fondues; mais la feuille d'or se volatilise et va produire, à travers les découpures, des taches violettes qui reproduisent le dessin.

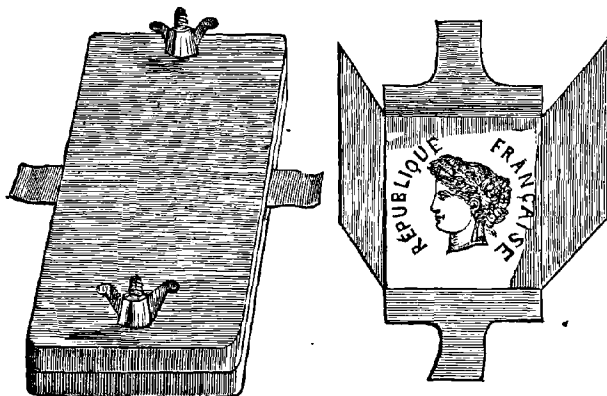


Fig. 33. — PORTRAIT ÉLECTRIQUE.

Les propriétés chimiques de l'étincelle électrique sont excessivement importantes. Elle détermine la combinaison de certains corps et produit également la décomposition de corps composés. Une expérience, imaginée

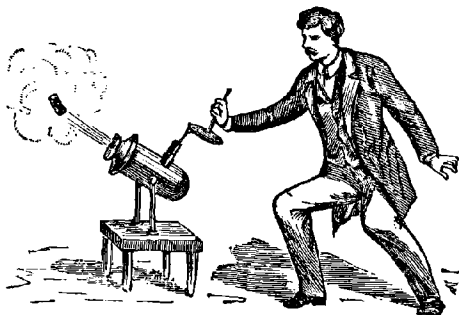


Fig. 34. — PISTOLET DE VOLTA.

par Volta, le démontre. Cet appareil, appelé *canon de Volta*, se compose (*fig. 34*) d'un vase de métal, bien bouché, isolé sur un pied de cuivre, et contenant un mélange détonant de deux parties d'hydrogène et d'une partie d'oxygène. Dans la lumière de ce canon est un tube de verre, et dans ce tube une tige de cuivre terminée, au bout extérieur, par une petite boule

du même métal, et de l'autre approchant très près de la paroi intérieure du canon, mais sans la toucher. Si l'on fait jaillir une étincelle sur la petite boule, cette étincelle passe dans l'intérieur du canon, et détermine la combinaison des deux gaz avec une violente explosion qui lance au loin le bouchon.

**CLAVECIN ET CARILLON ÉLECTRIQUES. — DANSE DES PANTINS ÉLECTRIQUES.** — En 1761, le Père de La Borde inventa un petit instrument composé de deux rangées de timbres métalliques, formant ensemble un clavier de deux octaves et qu'il appela *clavecin électrique*. Chaque timbre, pris dans une rangée, répond à un timbre dans l'autre rangée, avec lequel il est à l'unisson. Afin que le son des deux timbres soit

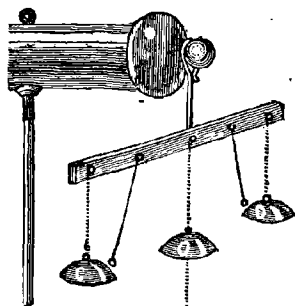


Fig. 35.

CARILLON ÉLECTRIQUE.

le même, l'une des deux rangées est susceptible d'être électrisée par de petits conducteurs, en touchant, sur le clavier, la touche correspondante; aussitôt le timbre électrisé attire son petit battoir et le repousse contre le timbre du même ton non électrisé, de manière qu'en posant convenablement les doigts sur les touches, on produit les sons que l'on désire.

Le *carillon électrique*, que l'on voit dans tous les cabinets de physique, repose sur un mécanisme analogue, mais moins compliqué. C'est une tige métallique AB (fig. 35), fixée au conducteur d'une machine électrique. Aux extrémités de cette tige sont attachés, par des chaînes métalliques, deux timbres C et D; un troisième timbre O, communiquant avec le sol par une petite chaîne métallique, est suspendu par un fil de soie. Entre les timbres sont également suspendues, par des fils de soie, des petites balles métalliques. Lorsque la machine est mise en activité, les deux timbres C et D s'électrisent, tandis que le timbre O, qui est isolé, reste à l'état neutre. Les deux balles, aussitôt attirées par les timbres C et D, viennent les frapper et s'électrisent comme eux. Elles sont alors repoussées et vont frapper le timbre O, au contact duquel elles retombent à l'état neutre. Elles sont alors de nouveau attirées, puis repoussées par les timbres C et D, exécutant ainsi une série d'oscillations.

La *danse des pantins* est encore une application des attractions et des répulsions des corps électrisés. Cette expérience (fig. 36) consiste à placer un petit pantin en moelle de sureau entre deux disques métalliques, communiquant, l'un avec la machine électrique, et l'autre, par une chaîne, avec le sol. Le petit bonhomme, attiré et repoussé vivement de

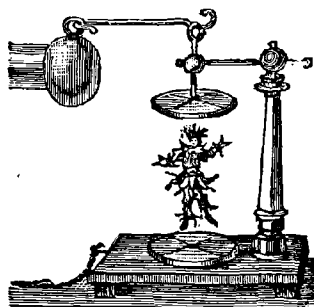
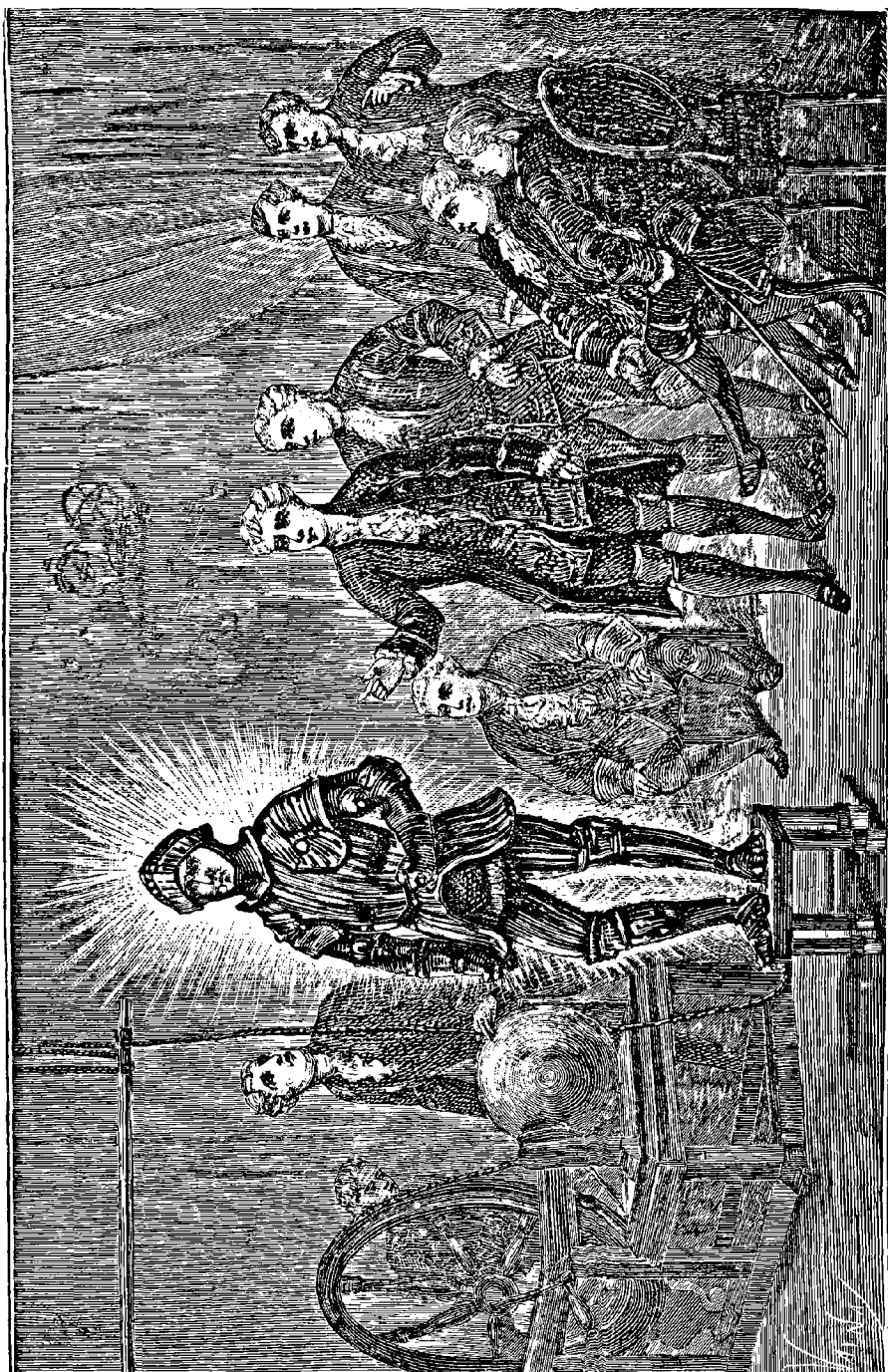


Fig. 36.

DANSE DES PANTINS.





La béatification de Bose (page 69).



l'un à l'autre disque, semble exécuter des sauts avec une grande agilité.

Une expérience analogue, que Volta imagina dans un but plus sérieux, et dont nous parlerons plus loin, est celle de la *grêle électrique*. Une cloche de verre (*fig. 37*) est posée sur un plateau de cuivre, sur lequel on a placé une certaine quantité de petites balles de sureau. Une tige de cuivre, terminée à son extrémité inférieure par une boule de même métal, traverse, à frottement doux, une ouverture pratiquée dans le haut de la cloche; or, si l'on met cette tige en communication avec une machine électrique, la boule s'électrise, et les balles de sureau sont tour à tour attirées et repoussées par elle avec une rapidité extrême.



Fig. 37.  
GRÊLE ÉLECTRIQUE.

**TOURNIQUET, ARROSOIR, SOUFFLET ÉLECTRIQUES. — POISSON VOLANT.** — On appelle *tournequet électrique* un petit appareil formé de plusieurs tiges de fer recourbées dans le même sens (*fig. 38*) et rayonnant autour d'un axe commun. Si on le place sur la machine électrique, on obtient, après quelques tours du disque de verre, un mouvement rapide de rotation dans le sens opposé à celui des pointes des tiges. Ce mouvement n'est point, comme l'ont cru quelques physiciens, un effet de réaction analogue à celui du tournequet hydraulique (*Pesanteur*, p. 178); il est dû à l'action répulsive des couches d'air environnant qui sont électrisées par l'électricité sortant des pointes. En approchant la main, on sent le courant d'air produit à chacune des pointes, et, dans l'obscurité, on voit l'aigrette qui les termine.

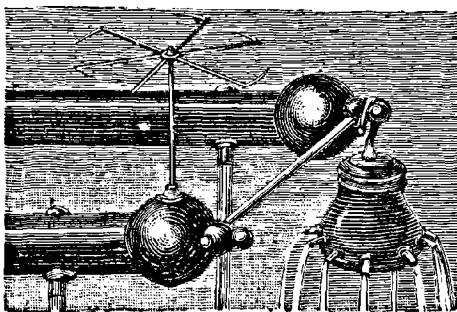


Fig. 38.  
TOURNIQUET ET ARROSOIR ÉLECTRIQUES.

Ce même phénomène se constate en fixant une pointe recourbée sur le conducteur d'une machine électrique (*fig. 39*); l'électricité s'écoule par cette pointe et électrise l'air qu'elle rencontre. L'air, chargé de la même électricité que la pointe, est repoussé, et si l'on approche de celle-ci une bougie allumée, on la voit soufflée par un courant d'air, quelquefois assez vif pour l'éteindre.

Si l'on suspend à la machine un vase renfermant de l'eau et muni d'ajutages capillaires (*fig. 38*), le liquide, qui d'abord s'écoulait goutte à goutte, s'échappe en formant un filet lumineux continu dès qu'on a développé de l'électricité. En effet, les actions mutuelles qui s'exercent entre les molécules électrisées ne sauraient modifier l'effet propre de la pesanteur.

On désigne sous le nom d'expérience du *poisson volant* une expérience qui consiste à maintenir en équilibre un corps léger au milieu de

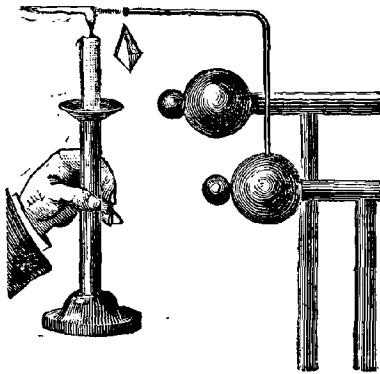


Fig. 39 et 40.

SOUFFLET ÉLECTRIQUE. — POISSON VOLANT.

l'atmosphère, par l'influence de l'attraction et de la répulsion combinées dans un corps électrisé. On se sert pour cela d'un petit morceau de papier d'argent plié en pointe (*fig. 40*); on le présente par la pointe à un conducteur d'une machine électrique en activité. Quand on le lâche, il reste suspendu devant le conducteur dans une immobilité presque complète. Si le conducteur est électrisé positivement, par exemple, il décompose le fluide neutre du *poisson*, attire à la pointe proche de lui l'électricité négative et repousse dans l'autre pointe l'électricité positive.

Il résulte de là une attraction et une répulsion dont la différence peut devenir égale au poids du papier et le maintenir en équilibre.

**AIGRETTE LUMINEUSE. — TUBE, GLOBE, CARREAU MAGIQUES. — LA BÉATIFICATION DE BOSE.** — Van Marum a fait, un des premiers, remarquer que, surtout par des temps très secs, et quand une machine assez puissante fonctionne convenablement, on entendait un bruissement, qui est le signe d'une décharge continue dans l'air; si l'on opère dans l'obscurité, on voit, en effet, se former des lueurs, que l'on peut rendre très apparentes en approchant un corps conducteur à une certaine distance, assez grande pour ne pas provoquer une étincelle. Ces lueurs prennent la forme d'une *aigrette*, qui se compose d'un petit pied du sommet duquel divergent en éventail des traits déliés qui se ramifient à leur tour un plus ou moins grand nombre de fois.

Toutes ces expériences constituent un spectacle intéressant, qui excitait, sans jamais l'épuiser, la curiosité des physiciens du siècle dernier, et qui les poussait à imaginer de nouveaux procédés pour produire

de nouveaux effets. On doit ainsi à l'abbé Bertholon une série de petits appareils connus sous le nom de *tube étincelant*, *globe magique*, *carreau électrique*, etc. (fig. 41).

Le principe de tous ces appareils, sans but véritablement utile d'ailleurs, est le même.

On colle sur une lame isolante des petits losanges en étain, dont les extrémités successives, très rapprochées les unes des autres, laissent néanmoins entre elles des espaces vides que l'on dispose de façon à for-

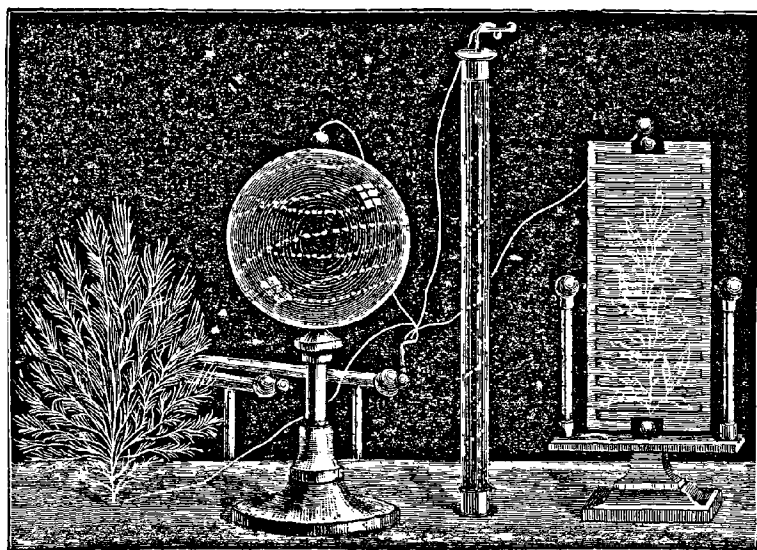


Fig. 41. — EXPÉRIENCES ÉLECTRIQUES.

mer un dessin, des lettres, des portraits, etc. Le premier losange de la série est en relation avec une boule métallique qu'on peut faire communiquer avec une machine électrique, tandis que le dernier touche une autre boule communiquant avec le sol.

Si l'on fait passer une décharge électrique à travers ces feuilles métalliques, une étincelle apparaît à chaque solution de continuité, et, comme le fluide électrique se propage avec la vitesse effroyable d'environ 460,000 kilomètres par seconde (page 60), ces étincelles, en réalité successives, paraissent simultanées à l'œil, et il en résulte un dessin lumineux.

M. Hoefler rapporte que, vers 1750, Bose annonça qu'en faisant arriver de l'électricité sur une personne isolée sur un tabouret de résine, il avait vu une flamme sortir de ce tabouret, serpenter autour des pieds de la

personne isolée et s'élever de là jusqu'à la tête qu'elle aurait environnée d'une auréole, semblable à la *gloire* des saints. Les physiiciens essayèrent en vain de reproduire ce qu'ils appelaient la *béatification de Bose*. Watson, qui s'était donné le plus de peine pour répéter cette expérience, écrivit à Bose pour lui demander des détails. Bose lui répondit qu'il s'était servi de toute une armure garnie d'ornements d'acier, dont les uns étaient pointus, les autres aplatis, d'autres en forme de coins ou de pyramides, et que, quand l'électrisation était très forte, les bords du casque surmontant la cuirasse projetaient des rayons groupés comme ceux de l'auréole des saints (*fig.* à la page 63).

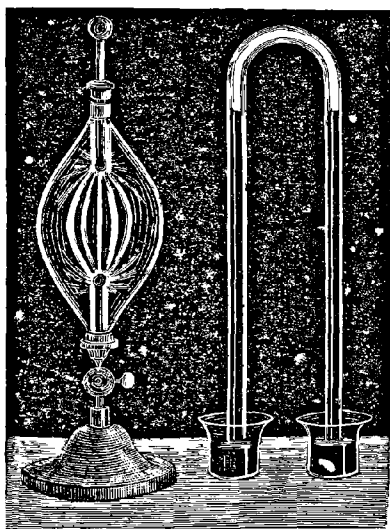


Fig. 42.

## ÉTINCELLE DANS LES GAZ RARÉFIÉS.

Il faut, certes, faire la part de l'exagération dans ces récits du XVIII<sup>e</sup> siècle; mais il faut aussi en conclure l'enthousiasme qu'inspirèrent dès leur découverte les phénomènes électriques.

## ÉTINCELLE DANS LES GAZ RARÉFIÉS.

— Dans les gaz raréfiés, l'étincelle se modifie considérablement; elle se produit sans bruit et est accompagnée d'une lueur qui varie avec la nature du gaz et avec son degré de raréfaction. Les expériences se font avec un appareil appelé *œuf électrique*. C'est un vase ovoïde en verre (*fig.* 42), muni de deux montures métalliques, portant chacune une tige de cuivre terminée par une petite boule.

On fait plus ou moins le vide dans ce vase en le plaçant sur une machine pneumatique, puis on ferme le robinet qui garnit sa monture inférieure et l'on met les deux pôles d'une machine de Holtz en communication avec les garnitures de l'œuf. A une pression de 6 centimètres de mercure (*Pesanteur*, p. 292), il s'échappe de la boule positive une sorte de gerbe ramifiée, d'une couleur purpurine très vive, dont quelques rayons se terminent à une petite distance, tandis que d'autres, d'un violet assez vif, vont rejoindre la boule négative, qui est d'ailleurs entourée d'une lueur violette plus pâle. Si la pression diminue jusqu'à n'être plus égale qu'à quelques millimètres, les rayons s'élargissent, et finalement on n'observe plus qu'une sorte de vapeur violacée, de forme ovoïde, établissant la communication entre les deux boules, avec une teinte d'un violet sombre à la boule négative et rougeâtre à la boule positive. Si, au lieu de l'œuf élec-

trique, on se sert du tube destiné à l'expérience de la chute des corps dans le vide (*Pesanteur*, p. 104), on constate une sorte de courant dans le sens de l'électricité positive. Dans le vide barométrique, la décharge électrique s'accompagne d'une lueur très perceptible, quoique assez faible. Cavendish l'a démontrée au moyen de deux baromètres (*fig. 42*) dont les chambres communiquent et qui reposent sur deux cuvettes. L'une des cuvettes est mise en relation avec la machine électrique, l'autre avec le sol. On voit alors une lueur se produire, d'autant plus marquée que la chaleur est plus grande, ce qui provient évidemment de la plus grande quantité de vapeur de mercure qui s'élève dans la chambre barométrique, car, dans le vide absolu, aucune lueur ne peut se produire.

**POISSONS ÉLECTRIQUES.** — Plusieurs poissons, parmi lesquels les plus curieux sont la *torpille* (*roja torpedo*), le *silure* (*silurus electricus*) et le *gymnote* (*gymnotus electricus*) jouissent de la singulière propriété de produire à volonté des décharges électriques plus ou moins violentes. Richer, dans son voyage à Cayenne en 1671, nota le premier l'observation d'un poisson qui, lorsqu'on le touche avec le doigt ou avec une canne, engourdit le bras et cause des vertiges. Ce poisson était à la vérité connu des anciens; mais, bien entendu, ils étaient loin d'attribuer ce fait à l'électricité.

La *torpille* habite les côtes de la Vendée, de la Provence, et aussi de la mer Adriatique; elle a la même forme que la *raie*. C'est chez elle que l'on découvrit tout d'abord cette propriété curieuse. Quand on l'irrite en la touchant, soit dans l'eau, soit dans l'air, elle lance ses décharges électriques répétées, qui peuvent être arrêtées par l'interposition de corps mauvais conducteurs. Dans l'eau, elle atteint, par des décharges, les petits poissons dont elle fait sa nourriture. Matteucci est parvenu à rendre visible l'étincelle produite par une décharge en plaçant des armatures métalliques sur le dos et le ventre de l'animal.

Le *silure* habite le Nil; il est de forme allongée, de 3 ou 4 décimètres de longueur environ. Les Arabes le nomment *raasch*, c'est-à-dire *tonnerre*.

Le *gymnote* est le poisson électrique le plus curieux. Son corps est allongé comme celui de l'anguille; aussi l'appelle-t-on quelquefois *anguille de Surinam*; sa peau est lisse, gluante. Il atteint souvent une longueur de 2 mètres, et habite les petits ruisseaux et les mares de l'Amérique méridionale.

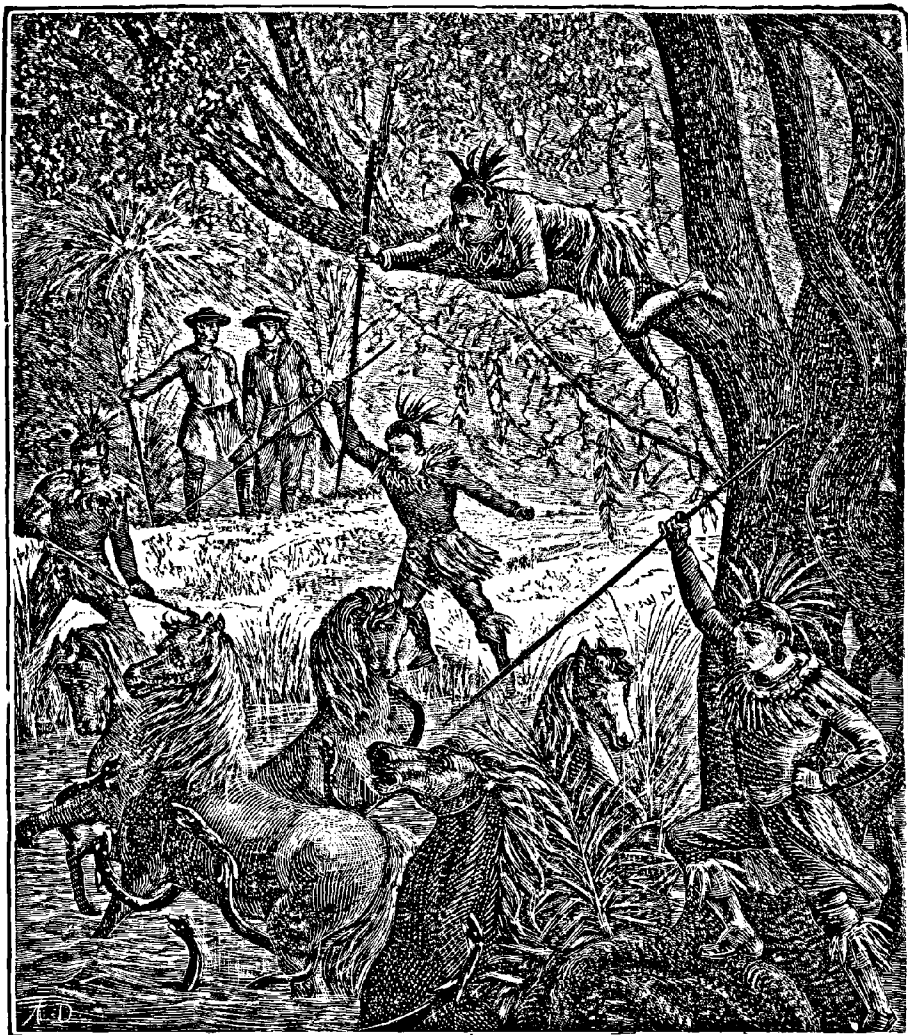
La faculté de produire l'électricité paraît résider dans un organe formé de petits tubes cloisonnés, remplis de mucosités et animés par plusieurs gros faisceaux nerveux. Les travaux de Williamson, d'Alex. Gar-

den, de Hunter, de Schilling, de Humboldt ont bien fait connaître l'anatomie du gymnote. Walsh, en 1773, communiqua à la Société royale de Londres un Mémoire sur les propriétés électriques de la torpille, que personne n'avait encore signalées. Cavendish, entre autres, se mit à faire, pour son compte personnel, des expériences qui lui parurent concluantes, expliquant à l'aide des principes déjà reconnus cette propriété merveilleuse, sans avoir recours à de nouvelles hypothèses. Et, le 27 mai 1775, en présence de John Hunter, le grand anatomiste, qui avait été le premier à décrire la constitution de l'organe électrique de la torpille, de Priestley, de Nairne et d'autres savants, il montra une torpille artificielle en bois, couverte de cuir, qu'il avait fait construire. L'électricité était fournie aux organes de ce mannequin à l'aide d'une batterie de Leyde, et elle lui était communiquée par des fils de fer enveloppés de tubes de verre, procédé nouveau, et qui devait être si prodigieusement usité un siècle plus tard pour faire traverser les mers à une espèce d'électricité dont, malgré son génie, Cavendish ne pouvait même soupçonner l'existence. Il avait placé sa torpille artificielle dans une espèce de petit aquarium rempli d'eau de la Tamise, dans laquelle il avait fait dissoudre une quantité de sel suffisante pour que sa conductibilité électrique pût être considérée comme équivalente à la conductibilité de l'eau de mer. Il avait fait disposer un lit de sable humide, où l'on enfonçait légèrement la torpille artificielle, et des gants de peau humectés d'eau de mer, à l'aide desquels on sentait très bien la secousse. Cavendish cherchait ainsi à montrer à ses visiteurs de quelle nature serait l'impression du voyageur qui foulerait aux pieds une torpille embusquée, suivant son habitude, dans un bas-fond et recouverte de sable.

Jobert de Lamballe, qui a disséqué beaucoup de *molaptérures*, poissons de la tribu des *silures* et possédant la même puissance électrique, donnait, en 1858, à l'Académie des sciences, une description de l'appareil qui produisait ces effets, et qui consiste dans une membrane enveloppant tout le corps, et étendue sous la peau et sur l'aponévrose. (On appelle aponévrose une membrane ferme, blanche et luisante, qui couvre les muscles et forme corps avec eux.) La membrane électrique est donc placée tout autour de ce poisson, différant en cela de la torpille, dont l'appareil électrisant ne s'étend qu'aux deux côtés de la tête, et aussi du gymnote chez lequel cet appareil est limité aux côtés de la queue. La membrane électrique est de plus garnie des ramifications d'un gros nerf qu'on peut appeler le nerf excitateur, très long, qui tord la tête de l'animal au-dessous de la première nageoire de l'ouïe, et qui étend ses branches de chaque côté du corps, en les collant sur l'aponévrose,



laquelle lui sert d'appui, comme une muraille aux ramifications d'un lierre, bien qu'il ne joue son rôle que dans la membrane électrique dont il fait partie. M. Geoffroy Saint-Hilaire a le premier décrit l'appareil électrique



Pêche aux gymnotes (page 74).

de ces poissons, tissu fibreux entre-croisé, renfermant une substance albumino-gélatineuse.

Le célèbre voyageur de Humboldt, au cours de son excursion à travers l'Amérique tropicale, voulut étudier l'appareil électrique du

gymnote. Pour se procurer des sujets vivants sur lesquels il pût faire des expériences, il dut assister lui-même à une pêche aux gymnotes. Il nous en a laissé une relation saisissante à laquelle nous empruntons les détails qui suivent (*fig.* à la page 73) :

« Nous partîmes le 9 mars de grand matin pour le petit village de Rasro de Abazo. De là, les Indiens nous conduisirent à un ruisseau qui, dans les temps de sécheresse, forme un bassin d'eau bourbeuse entouré de beaux arbres, de clusias, d'amyris et de mimosas, à fleurs odoriférantes. La pêche des gymnotes avec des filets est très difficile, à cause de l'extrême agilité de ces poissons, qui s'enfoncent dans la vase comme des serpents. On ne voulut pas employer le *barbasco*, c'est-à-dire les racines du *piscidia erithyrna*, du *jacquinia armillaris* et de quelques espèces de *phyllanthus* qui, jetées dans une mare, enivrent ou engourdissent les poissons. Ce moyen aurait affaibli les gymnotes. Les Indiens nous disaient qu'ils allaient pêcher avec des chevaux. Nous eûmes de la peine à nous faire une idée de cette pêche extraordinaire ; mais bientôt nous vîmes nos guides revenir de la sáyane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domptés. Ils en amenèrent une trentaine, qu'on força d'entrer dans la mare.

» Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles jaunâtres et livides, semblables à de grands serpents aquatiques, nagent à la surface de l'eau et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets ; une lutte entre des animaux d'une organisation si différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, munis de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la mare ; quelques-uns d'entre eux montent sur les arbres, dont les branches s'étendent horizontalement au-dessus de la surface de l'eau. Par leurs cris sauvages et la longueur de leurs jongs, ils empêchent les chevaux de se sauver en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par les décharges répétées de leurs batteries électriques.

» Pendant longtemps, elles ont l'air de remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toutes parts dans les organes les plus essentiels à la vie ; étourdis par la force et la violence des commotions, ils disparaissent sous l'eau ; d'autres, haletants, la crinière hérissée, les yeux hagards et exprimant l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend ; ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau. Cependant un certain nombre parvient à tromper l'active vigilance des pêcheurs ; on les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre sur le sable, excédés de fatigue et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes. En moins de cinq minutes, deux chevaux étaient noyés. L'anguille, ayant cinq pieds de long et se pressant contre le ventre des chevaux, fait une décharge dans toute l'étendue de son organe électrique ; elle attaque à la fois le cœur, les viscères et le *plexus coeliacus* des nerfs abdominaux. Il est naturel que l'effet éprouvé par les chevaux soit plus puissant que celui que le même poisson produit sur l'homme, lorsqu'il

ne le touche que par une des extrémités. Les chevaux ne sont probablement pas tués, mais simplement étourdis; ils se noient, étant dans l'impossibilité de se relever par la lutte prolongée entre les autres chevaux et les gymnotes.

» Nous ne doutons pas que la pêche ne se terminât par la mort successive des animaux qu'on y emploie; mais peu à peu l'impétuosité de ce combat diminue. Les gymnotes, fatigués, se dispersent; ils ont besoin d'un long repos et d'une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de force galvanique.

» Les mulets et les chevaux parurent moins effrayés; ils ne hérissaient plus la crinière; leurs yeux exprimaient moins d'épouvante; les gymnotes s'approchaient timidement des bords du marais, où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes. Lorsque les cordes sont bien sèches, les Indiens, en soulevant le poisson en l'air, ne ressentent pas de commotion. En peu de minutes, nous eûmes cinq grandes anguilles, dont la plupart n'étaient que légèrement blessées.

» La température des eaux dans lesquelles vivent habituellement les gymnotes est de 26 à 27 degrés. On assure que leur force électrique diminue dans les eaux plus froides; et il est assez remarquable, en général, comme on l'a déjà observé, que les animaux doués d'organes électromoteurs dont les effets deviennent sensibles à l'homme, ne se rencontrent pas dans l'air, mais dans un fluide conducteur de l'électricité. Le gymnote est le plus grand des poissons électriques; j'en ai mesuré qui avaient cinq pieds trois pouces de long. Les Indiens assuraient qu'ils en avaient vu de plus grands encore. Nous avons trouvé qu'un poisson qui avait trois pieds dix pouces de long pesait douze livres. Le diamètre transversal du corps était, sans compter la nageoire anale, qui est prolongée en forme de carène, de plus de trois pouces. Les gymnotes du *Cano de Bera* sont d'un beau vert d'olive; le dessous de la tête est jaune mêlé de rouge; deux rangées de petites taches jaunes sont placées symétriquement le long du dos, depuis la tête jusqu'au bout de la queue; chaque tache renferme une ouverture excrétoire; aussi la peau de l'animal est constamment couverte d'une matière muqueuse qui, comme Volta l'a prouvé, conduit l'électricité de vingt à trente fois mieux que l'eau pure. Il est, en général, assez remarquable qu'aucun des poissons électriques découverts jusqu'ici dans les différentes parties du monde ne soit couvert d'écaillés. »

Contrairement à ce que de Humboldt dit ci-dessus, il existe, paraît-il, certains insectes jouissant de la propriété, comme le gymnote, de donner des commotions et des secousses électriques à ceux qui les touchent. Kirby et Spence, entomologistes américains, décrivent dans leur ouvrage un de ces insectes, le *reduvius arratus*, connu dans les Antilles sous le nom de *Wheel Eug.*, doué de cette propriété. Récemment, il a été signalé deux cas de secousses électriques produites par des insectes: le premier, par un scarabée de la famille des *elateridae*, dont l'effet se ressentait depuis la main jusqu'au coude quand on touchait l'animal; le second, par une

grande chenille de l'Amérique du Sud dont la commotion, fort vive, s'étendit dans tout le bras du premier qui la trouva, et qui le paralysa, pendant un moment, au point de faire croire à un médecin, appelé en toute hâte, que la vie de l'expérimentateur était en danger.

## CHAPITRE III

### ÉLECTRICITÉ ATMOSPHERIQUE

**IDENTITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE LA Foudre.** — Tout ce que les anciens savaient et pensaient de la foudre est résumé par Pline, dans ce passage de son *Histoire naturelle* :

« On ignore généralement que, par une observation attentive du ciel, les maîtres de la science ont établi que les trois planètes supérieures projettent des feux qui, tombant sur la terre, ont le nom de *foudres*. Ces feux proviennent surtout de la planète intermédiaire, peut-être parce que, recevant un excès d'humidité du cercle supérieur, et un excès de chaleur du cercle inférieur, elle se débarrasse de cette façon : c'est pour cela que l'on a dit que Jupiter lançait la foudre. Ainsi, de même qu'un bois enflammé projette un charbon avec bruit, de même l'astre projette un feu céleste qui apporte en même temps des présages, les opérations divines ne cessant même pas dans la partie rejetée. C'est surtout lorsque l'air est agité que survient ce phénomène, parce que les humidités retenues dans l'atmosphère provoquent l'émission d'un feu abondant, ou parce que la perturbation est due à une sorte d'enfantement de la planète.

» Je ne contesterai pas que les feux des étoiles peuvent tomber d'en haut sur les nuages, comme on le voit souvent par un temps serein. Il est certain que le choc de ces feux ébranle l'air : c'est ainsi que les traits sifflent dans leur trajet. Quand ils sont arrivés à la nue, il en résulte de la vapeur avec un bruit étrange, comme quand on plonge un fer rouge dans l'eau, et il se forme un tourbillon de fumée ; de là naissent les tempêtes. S'il y a, dans la nue, lutte de l'air ou de la vapeur, le tonnerre gronde ; si éruption ardente, la foudre éclate ; si effort prolongé dans un plus grand espace, l'éclair brille. Les éclairs fendent la nue, les foudres la déchirent. Le tonnerre est le retentissement des corps que frappent les feux ; aussi la flamme rayonne-t-elle dès que le nuage se fend. Le souffle émané de la terre peut aussi, repoussé en bas par les astres et arrêté dans les nuages, faire entendre le grondement du tonnerre tant que le son reste étouffé pendant la

lutte, et les éclats de la foudre, au moment de l'éruption, comme pour une vessie distendue par l'air. Il se peut encore que ce souffle, quel qu'il soit, s'allume par le frottement dans une descente rapide. Il se peut enfin que le choc des nuages fasse jaillir des éclairs, comme le choc de deux pierres fait jaillir des étincelles. Mais tout cela est dû au hasard. De là des foudres aveugles et vaines toujours, n'étant le produit d'aucune des lois de la nature : elles frappent les monts, elles se précipitent dans les mers, et portent tant d'autres coups inutiles ; mais les foudres qui viennent de plus haut sont les interprètes du destin, elles ont des causes fixes, et elles sont envoyées par les astres qui les engendrent.

» En hiver et en été, la foudre est rare par des causes opposées. En hiver, l'air condensé est recouvert d'une enveloppe plus épaisse de nuages, et les exhalaisons terrestres, denses et congelées, éteignent tout ce qu'elles reçoivent de vapeur ignée. Au printemps et dans l'automne, la foudre est plus fréquente, les conditions de l'été et de l'hiver s'altérant dans ces deux saisons ; aussi est-elle commune en Italie ; car avec un air plus variable, un hiver plus doux et un été nuageux, on a, pour ainsi dire, perpétuellement le printemps ou l'automne.

» Dans la foudre, on distingue plusieurs espèces : celle qui est sèche ne consume pas, elle disperse ; celle qui est humide ne brûle pas, elle noircit ; il y en a une troisième espèce qu'on appelle claire ; elle est d'une nature tout à fait extraordinaire, vide les tonneaux sans les endommager, et sans laisser aucune trace de son passage, fond l'or, l'airain, l'argent contenu dans un sac, sans le brûler, et même sans en altérer les cachets de cire. Marcia, princesse des dames romaines, fut, étant enceinte, frappée par la foudre : elle eut son enfant tué dans son sein, et n'éprouva, quant à elle, aucun mal. Hérennius, décurion du municipe de Pompéi, fut atteint de la foudre dans un jour serein.

» Dans les livres des Étrusques, il est dit que neuf dieux lancent la foudre, dont il y a onze espèces ; le seul Jupiter en lançant trois. Les Romains n'ont conservé que deux espèces de foudres, attribuant celle de jour à Jupiter, celle de nuit à Summanus ; ces dernières plus rares, sans doute à cause de la fraîcheur du ciel. On pense que de la terre partent aussi des foudres qu'on appelle inférieures, foudres qui, arrivant en hiver, passent pour funestes et exécrables. Un fait incontestable, c'est que toutes les foudres qui tombent du ciel supérieur frappent en zigzag, tandis que toutes celles qu'on appelle terrestres frappent en droite ligne.

» Les Annales rapportent que, par certains rites et certaines invocations, on force ou l'on obtient la descente des foudres. C'est une vieille tradition de l'Étrurie, qu'on fit ainsi descendre la foudre sur un monstre appelé Volta, qui menaçait la ville de Volsinies, après avoir dévasté le territoire. Elle a été aussi évoquée par le roi étrusque Porsenna. Avant lui, cela avait été pratiqué souvent par Numa : ce fut en imitant cette pratique d'une manière peu conforme aux rites, que Tullus Hostilius fut frappé de la foudre. Pour cela nous avons des bois, des autels, des rites ; et parmi les Jupiter Stator, Tonnant, Fénétrien, nous avons reçu un Jupiter Élicius (*qui attire la foudre*). Sur ce point, l'opinion des hommes varie, suivant les dispositions de chacun. Il y a de l'audace à croire que l'on commande à la nature,

comme il y a de la stupidité à contester les services qu'on peut tirer de la foudre, puisque la science est parvenue, dans l'interprétation de ce phénomène, au point d'en prédire l'arrivée à jour fixe, et d'annoncer si la foudre qui éclatera doit interrompre une destinée ou ouvrir la voie à de nouveaux destins voilés jusqu'alors; cela est prouvé par des exemples innombrables, tant privés que publics (1). »

On le voit, les anciens cherchaient, en ce point encore, l'explication des phénomènes qui frappaient leurs yeux, non dans l'observation, mais dans des théories imaginaires. Il faut de plus remarquer ici que, dès l'antiquité la plus reculée, les hommes — certains hommes du moins, qui prétendaient avoir reçu des dieux la mission de gouverner à leur gré, les autres hommes, — ont cherché à s'emparer du feu du ciel pour en faire un projectile qu'ils pussent manier à leur guise; mais les moyens qu'ils employaient n'étaient point de nature à résoudre ce grand problème. En effet, autant qu'on en peut juger par ce qui nous reste des livres des augures et des aruspices, les procédés suivis par ces soi-disant directeurs de la foudre se bornaient à des incantations ou à des pratiques magiques qui devaient laisser le fluide naturel parfaitement insensible.

Dans un livre récent, plein de science et d'intérêt, les *Miracles devant la science*, M. W. de Fonvielle a analysé un certain nombre de traditions bizarres ou de récits singuliers, relatifs au pouvoir de diriger la foudre, notamment sur les autels où l'on avait accumulé les offrandes. Lorsque le bûcher s'allumait tout seul, on considérait que la divinité acceptait l'offrande qui lui était faite. L'histoire religieuse de toutes les nations est remplie de circonstances analogues, que l'auteur explique par des *trucs* de deux espèces. Il est possible qu'un feu caché fût allumé en secret à l'aide d'une mèche ou d'une substance analogue à l'amadou, et qu'il fit explosion au moment choisi pour l'invocation. On peut également admettre qu'une substance chimique, plus ou moins semblable à celle qui garnit le bout de nos allumettes chimiques, ait été connue par ces charlatans sacrés et leur ait permis d'exécuter leurs prestiges.

Toutefois, la foudre n'était pas considérée par tous les peuples comme lancée par un dieu en fureur qui veut châtier l'espèce humaine. Nous voyons dans le *Baumkultus*, de Wilhem Manhardt, que les Scandinaves s'imaginaient qu'un génie bienfaisant parcourt les champs pendant qu'éclate le premier orage, et augmente la force germinatrice des semences. Cette opinion remarquable ne fait que confirmer, de la façon la plus heureuse, les enseignements de la science positive. En effet, la chimie nous apprend que dans les pluies d'orage se trouvent des nitrates que les plantes

(1) Pline, *Histoire naturelle*, traduction de Littré.

s'assimilent avec facilité. Il paraît constaté que toutes les légumineuses possèdent le pouvoir de fixer l'azote de l'air à un haut degré. Mais ne semble-t-il pas que, si elles ont cette faculté, c'est grâce à la foudre, de sorte que le sillon lumineux qui traverse l'atmosphère peut être considéré comme la source directe de la fertilisation des champs ?

C'est d'après cette manière sage de voir, qu'en Carinthie, on croyait que le bruit du tonnerre provient de ce que Dieu a renfermé des grains de blé dans un grand coffre de fer et les agite avec violence. Rosenplanter, dans son ouvrage sur la mythologie, rapporte un hymne finnois, qui est ainsi conçu : « Tonnerre ! nous te sacrifions un bœuf avec deux cornes, pour que tu fasses fructifier nos sueurs et nos semences, pour que notre paille devienne semblable au cuivre et notre grain semblable à l'or. » Suivant Wilhem Manhardt, les agriculteurs aimaient à porter, comme talisman, un morceau d'aérolithe que l'on considérait comme produit par la foudre, et, à défaut de ce fétiche, ils cherchaient à se procurer des morceaux d'un bois éclaté par la foudre. Ces pierres de foudre peuvent être des masses de sable fondu et vitrifié, comme on en trouve souvent sur les bords de la mer Baltique. Les Finnois les ramassent avec soin et les regardent comme un excellent préservatif des incendies et des coups de foudre.

Il n'en est pas de même dans la Bible, et le tonnerre y est toujours considéré comme une marque de la colère céleste. C'est ainsi que s'exprime Samuel, quand il dit aux Hébreux, dont il était mécontent : « C'est aujourd'hui le jour de votre moisson. Eh bien, je vais appeler le Seigneur, qui va vous envoyer sa pluie et ses foudres. » Chez les peuples du midi, où les orages ont une violence inconnue des peuples du nord, les propriétés bienfaisantes de la foudre se trouvaient constamment méconnues. La Bible cite de trop nombreux exemples pour qu'il ne soit pas superflu d'en rapporter de nouveaux.

On trouve, dans le *Rig-Véda* des Hindous, des hymnes au dieu du tonnerre, que l'on nomme, en sanscrit, le rugissant *Rudra*, et dont les dévots cherchent à désarmer la colère par des supplications fort abjectes. Ce Rudra est si puissant que les autres divinités du Panthéon hindou lui ont défendu d'ouvrir les yeux, ce qu'il ne pourrait faire sans réduire la terre en cendres. Il est obligé, pour y voir, à cligner de l'œil, et c'est lorsqu'il nous regarde ainsi que le ciel est sillonné d'éclairs. Les brahmines donc n'avaient pas non plus envisagé la foudre sous son côté bienfaisant et fécondateur. Ils n'ont pas compris que, sur son immense parcours, l'étincelle électrique brûle et enflamme une multitude de corps de toute nature. Le dieu de la foudre, comme celui du feu, a toujours droit

au titre de purificateur. Celui-là le mérite bien mieux encore que celui-ci, puisque la chute de la foudre est toujours accompagnée d'averses plus ou moins abondantes, et qu'on peut ériger en principe qu'il n'y a point d'averse sérieuse à laquelle la foudre ne fasse inévitablement cortège.

Chez les chrétiens, comme chez les Hébreux, la foudre fut toujours considérée comme une manifestation de la colère de Dieu, et, la religion du moyen âge ne permettant pas que l'on pensât autrement que la Bible, on ne chercha jamais, pendant longtemps, à étudier la nature du phénomène, mais seulement à deviner quels malheurs annonçaient ses éclats. On rapporte que Cardan se trouvait à Milan, lorsque l'église Sainte-Marie-l'Assomption fut frappée par la foudre. Le coup fut si violent que le clocher fut renversé. Un de ses amis s'adressa à lui pour savoir quel était le sens augural de ce coup de foudre, et si cet accident indiquait qu'une catastrophe quelconque allait fondre sur la ville qui en avait été témoin.

— « En aucune façon, répondit l'astrologue, parce que notre ville n'est point à la tête de la chrétienté, et que l'église frappée n'en est point la cathédrale. »

Cependant, rentré chez lui, il se mit à étudier ce que disaient les anciens sur la foudre, et il rédigea un traité, intitulé : *De fulgure*, dans lequel on trouve une série de questions peu sérieuses, quoiqu'elles aient été traitées sérieusement par plusieurs physiciens célèbres. La foudre peut-elle sortir d'un ciel serein ? Y a-t-il des arbres, comme le figuier et le laurier, des quadrupèdes comme l'hyène, des oiseaux comme l'aigle, qui ne puissent être foudroyés ? des pierres précieuses qui empêchent ceux qui les portent d'être jamais atteints ? Cardan croyait aux pierres de foudre ; il décrit leur composition avec une précision minutieuse et il cite, à l'appui de cette partie de son travail, l'opinion d'Averroès (1) et d'Avicenne (2). Toutefois, il n'admet pas que la chute d'une pierre accompagne fatalement chaque manifestation fulgurale. Il était trop bon observateur pour se permettre une semblable exagération.

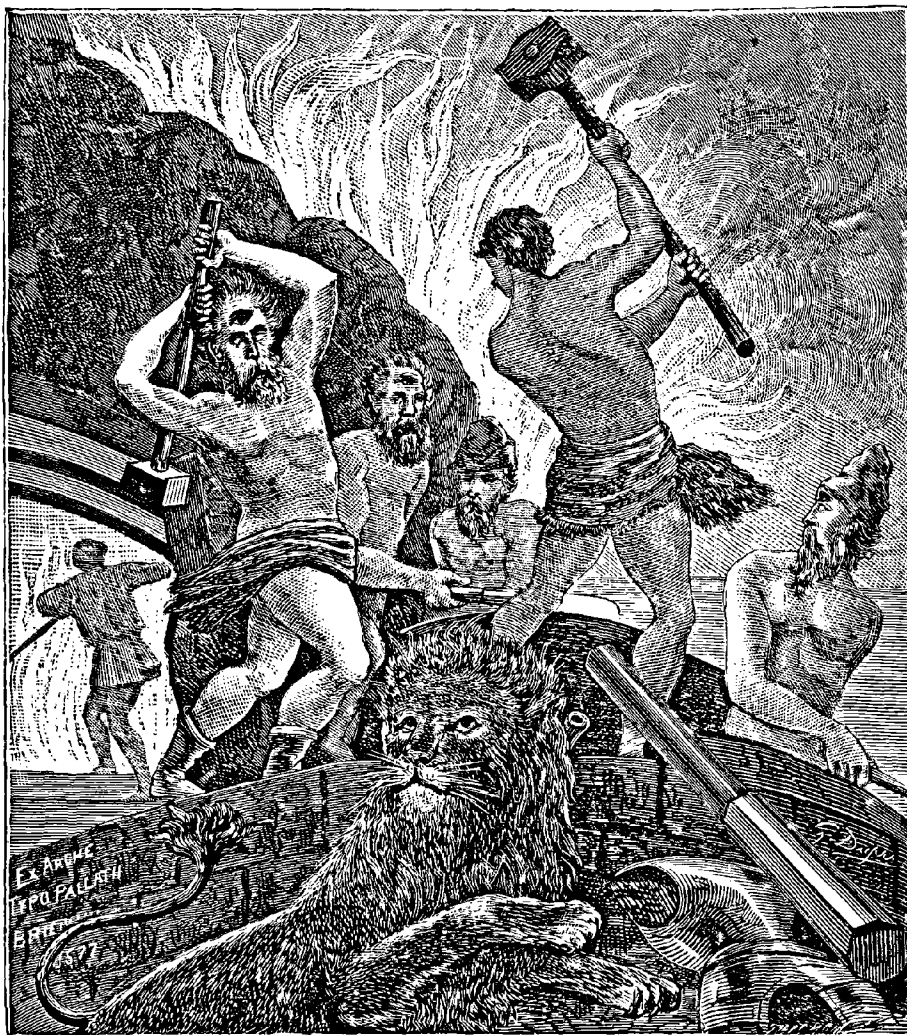
On trouve encore, dans le traité de Cardan, la clef de cette supersti-

(1) AVERROÈS, dont le vrai nom est *Ibn-Rochd*, savant arabe de Cordoue (1130-1206), premier traducteur en arabe des œuvres d'Aristote, qu'il commenta longuement. Pendant presque tout le moyen âge, on ne connut Aristote en Europe que par des traductions latines faites sur la version d'Averroès, et ses commentaires avaient une autorité presque égale à celle du maître. Il était aussi médecin, et il jouit d'une grande faveur à la cour du Maroc. Il avait en religion des sentiments très hardis.

(2) AVICENNE, dont le vrai nom est *Abou-Ibn-Sina*, célèbre philosophe et médecin arabe (980-1037), né en Perse, jouit d'une telle réputation qu'il devint le vizir et le médecin de plusieurs princes d'Asie. Un des premiers à étudier et à faire connaître Aristote et Hippocrate, il fut longtemps le savant dont les œuvres servaient de base à l'enseignement en Europe et en Asie. Il mourut épuisé par le travail et la débauche.



tion des anciens Romains, qui refusaient de brûler le corps des victimes de la foudre. Ils pensaient qu'on ne pouvait sans sacrilège toucher par un feu mortel ceux qui avaient senti le feu divin de Jupiter. Les lieux frappés



Vulcain était chargé, avec les Cyclopes, de la fabrication de la foudre (page 82).

par la foudre devenaient sacrés, leurs propriétaires perdaient immédiatement tous leurs droits et ils devenaient des lieux publics, parce que chacun devait être admis à y rendre hommage à la divinité qui s'y était manifestée.

Comme on le sait encore, les anciens supposaient que Vulcain était chargé, avec les Cyclopes, de la fabrication de la foudre ; mais on ignore généralement qu'il avait trois ouvriers principaux, dont chacun, suivant Cardan, était un spécialiste chargé de confectionner une foudre d'une espèce particulière : *Brontos*, le bruit du tonnerre ; *Astrapes*, la matière fulgurante, et *Pyramon*, les feux follets ou les foudres en boules, que l'on voit quelquefois monter de la terre vers le ciel, et que le plus souvent on voit descendre du ciel vers la terre.

Cependant Lucrèce, exprimant l'opinion des gens instruits de son temps, s'était écrié :

De la terre et des cieux l'imposant phénomène  
 Inspira la terreur à l'ignorance humaine ;  
 Les peuples avilis sous un joug odieux  
 En rois de l'univers ont érigé les dieux.  
 Quelle que soit pourtant leur glorieuse essence,  
 Étrangers à l'amour ainsi qu'à la vengeance,  
 Repaissant de bonheur leur douce éternité,  
 Que sont-ils donc, ces dieux, rois sans autorité?...  
 Cependant quel mortel, quand la tempête gronde,  
 Ne croit qu'un ciel vengeur s'arme contre le monde ?  
 De la noble raison, transfuge épouvanté,  
 Malheureux, il oublie, en sa crédulité,  
 Que la nature règne, éternelle, immuable,  
 Et que tout est soumis à sa loi redoutable !  
 Ainsi l'homme égaré, vaincu par la terreur,  
 Va porter en tous lieux le mensonge et l'erreur.  
 Ah ! périsse à jamais ce préjugé funeste !...

Et il explique les effets du tonnerre et le mouvement des nuages avec une grande sagacité ; il pressent une partie des propriétés de l'air ; il indique fort bien la raison qui fait que l'éclair précède le bruit du tonnerre ; il devine, en un mot, presque tout ce que les physiciens modernes ont constaté depuis la découverte de l'électricité. Aristote, d'ailleurs, avait déjà dit dans ses *Météorologiques*, que l'éclair et le tonnerre sont produits par des *esprits subtils* qui s'enflamment avec bruit, à peu près comme le bois qui, en brûlant, fait quelquefois entendre un pétilllement ; que l'éclair est un *esprit incandescent*. C'est ainsi que Berthollet, l'un des fondateurs de la chimie moderne, croyait que l'éclair et le tonnerre étaient l'effet de la combustion du gaz hydrogène et oxygène dans les régions supérieures de l'atmosphère.

C'est à Franklin (1) et à de Romas que l'on doit la démonstration de l'identité de l'électricité et de la foudre.

Les recherches auxquelles se livraient, au XVIII<sup>e</sup> siècle, en Europe, les physiciens, pour découvrir de nouvelles propriétés de l'électricité, étaient poursuivies avec intérêt dans le nouveau monde par Franklin. Dans un voyage qu'il fit de Philadelphie à Boston, rapporte M. Hoefler, en 1746, l'année même où fut inventée la bouteille de Leyde, Franklin assista à des expériences électriques, imparfaitement exécutées par le docteur Spence, qui arrivait d'Écosse. Peu après son retour à Philadelphie, la bibliothèque qu'il avait fondée dans cette ville reçut de Londres un tube en verre, avec des instructions pour s'en servir. Franklin renouvela les expériences auxquelles il avait assisté; il y en ajouta d'autres, et fabriqua lui-même avec plus de perfection les instruments qui lui étaient nécessaires. La charge se faisait alors avec un seul condensateur: Franklin imagina la charge par cascades (*Électricité*, p. 54), qui devait être la pre-

(1) FRANKLIN (Benjamin), né à Boston le 17 janvier 1706. Fils d'un presbytérien que les persécutions du catholique Charles II avaient forcé d'émigrer en Amérique et qui s'était établi fabricant de chandelles et de savons, il ne montra aucun goût pour le métier de son père, et entra dans une imprimerie comme ouvrier typographe. Il se livra avec ardeur à l'étude en même temps qu'il exerçait sa profession. Ayant inventé un perfectionnement dans son art, il se rendit en Angleterre pour étudier à fond la typographie, et il entra dans la grande imprimerie de Palmer. Tout en composant une copie de la *Religion naturelle* de Wollaston, il la lisait et eut l'idée d'en publier une réfutation qui eut un grand succès. Il retourna en Amérique, à Philadelphie, y établit une imprimerie et fonda un des premiers journaux américains, la *Gazette de Philadelphie*. En même temps, il s'occupait activement des affaires de son pays, fonda une bibliothèque publique, un hôpital, une société académique, publiait un almanach, le *Bonhomme Richard*, plein d'excellents conseils pratiques et traitant toutes les questions qui pouvaient intéresser et instruire un jeune peuple. Il s'occupait également de sciences expérimentales, et il avait déjà inventé les poêles économiques, dont nous avons parlé (*Chaleur*, p. 459) et trouvé quelques lois physiques, lorsqu'il songea à prouver l'identité de l'étincelle électrique et de la foudre. Tous ces travaux ne l'empêchaient pas de se consacrer à des charges publiques. Membre de l'assemblée de Pensylvanie, il fut chargé en 1764 d'aller à Londres et de faire revenir le gouvernement anglais sur les mesures vexatoires qu'il prenait à l'égard des colonies. L'obstination folle de l'Angleterre ne lui permit pas de réussir: la guerre éclata entre l'Amérique et la métropole. Franklin reçut alors la mission de rechercher l'alliance française; il y réussit avec un rare bonheur: l'enthousiasme qui l'accueillit est indescriptible. On sait les vers que Turgot lui adressa:

*Eripuit cælo fulmen, sceptrumque tyrannis*  
(Au ciel il prit la foudre, et le sceptre aux tyrans);

Voltaire, presque mourant, donnait sa bénédiction au petit-fils de Franklin, en s'écriant dans un élan d'enthousiasme, qui semblait exprimer l'idéal de la nouvelle Amérique: « Dieu et la liberté! *God and liberty.* » Franklin, après huit ans de séjour en France, voulut retourner mourir dans son pays; il fut reçu par les ovations de ses concitoyens reconnaissants et mourut le 7 avril 1790.

Ses découvertes concernant l'électricité se trouvent consignées dans *Experiments and observations of electricity, made at Philadelphia in America*; il les adressa sous forme de lettres à P. Collison, membre de la Société royale de Londres; la première porte la date du 28 mars 1747 et la dernière celle du 18 avril 1754. Cet ouvrage a été traduit en français par Dalibard l'année même de son apparition.

mière batterie électrique, et il conclut de ses expériences sa théorie sur la nature du fluide électrique.

La couleur de l'étincelle électrique, son mouvement en ligne brisée lorsqu'elle s'élançait vers un corps, le bruit de sa décharge, les effets singuliers de son action, etc., suggérèrent à Franklin la pensée hardie que l'étincelle électrique était de même nature que la matière dont l'accumulation dans les nuages produisait la capricieuse lumière de l'éclair, le formidable bruit du tonnerre, et qui brisait tout ce qu'elle rencontrait sur son passage lorsqu'elle descendait du ciel pour se remettre en équilibre sur la terre. Il en conclut *l'identité de l'électricité et de la foudre*, déjà entrevue, il faut le dire, par un grand nombre de physiciens, notamment par Désaguliers. Mais comment la démontrer ?

« Le fluide électrique, disait-il, dans un Mémoire publié à Philadelphie le 7 novembre 1749, est attiré par les pointes; nous ignorons si la foudre est douée de la même propriété; mais, puisque l'électricité et la foudre s'accordent par tous les autres points, il est probable qu'ils s'accordent de même en celui-ci : *Il faut en faire l'expérience.* »

Le mémoire de Franklin parvint d'abord à Londres, où l'on n'en comprit point la portée; mais Buffon, l'ayant lu, le fit traduire en français, et, quelque temps après, le 10 mai 1752, l'expérience fut tentée, suivant les indications de Franklin, par Dalibard (1). Il avait fait construire à Marly-la-Ville, près de Paris, une cabane sur un monticule, au-dessus de laquelle il fixa, dans un gâteau de résine, une barre de fer de 13 à 14 mètres de hauteur, pointue par le haut (*fig.* 43). A deux heures vingt minutes, il s'éleva un orage.

« Le nommé Coiffier, ancien dragon (dit Dalibard dans son mémoire à l'Académie), que j'avais chargé de faire les observations en mon absence, ayant entendu un coup de tonnerre assez fort, vole aussitôt à la machine, prend la fiole avec le fil d'archal (bouteille de Leyde), présente le tenon du fil à la verge de fer, en voit sortir une étincelle brillante et entend le pétitement; il tire une seconde étincelle, plus forte que la première, et avec plus de bruit.

» Il appelle les voisins et envoie chercher M. le prier. Celui-ci, nommé Raulet, accourt de toutes ses forces; les paroissiens, voyant la précipitation de leur curé, s'imaginent que le pauvre Coiffier a été tué du tonnerre; l'alarme se répand dans

(1) DALIBARD (Thomas-François), savant botaniste français (1712-1781), introduisit en France la méthode de Linné, et publia une *Flore des environs de Paris*. La traduction des lettres de Franklin relatives à l'électricité atmosphérique a été publiée en 1749.

le village; la grêle qui survient n'empêche point le troupeau de suivre son pasteur. Cet honnête ecclésiastique arrive près de la machine, et, voyant qu'il n'y avait point de danger, met lui-même la main à l'œuvre et tire de fortes étincelles. La nuée d'orage et de grêle ne fut pas plus d'un quart d'heure à passer au zénith de notre machine et l'on n'entendit que ce seul coup de tonnerre. Sitôt que le nuage fut passé, on ne tira plus d'étincelles de la verge de fer. »

Ce fut là un événement dans Paris. Tout le monde s'y entretenait du phénomène de Marly, qui eut son pendant sur la place de l'Estrapade, à Paris (expérience de Delor). « L'admiration, rapporte l'abbé Nollet, monta jusqu'à l'enthousiasme. La plupart de ceux qui apprirent la nouvelle crurent de bonne foi, et sur la parole de ceux qui le leur disaient, que les foudres du ciel seraient désormais en la puissance des hommes, et que, pour se garantir du tonnerre, il suffirait de dresser des pointes sur le sommet des édifices. Quelques personnes même assuraient d'un ton fort sérieux qu'un voyageur en rase campagne pouvait s'en défendre en met-

tant l'épée à la main contre la nuée; les gens d'église, qui n'en portent pas, commençaient à se plaindre de n'avoir pas cet avantage; mais on leur montrait dans le livre de M. Franklin, qui était comme l'évangile du jour, qu'on pouvait suppléer au pouvoir des pointes en laissant bien mouiller ses habits, ce qui est extrêmement facile en temps d'orage. »

Franklin, de son côté, songeait à soutirer des nuages leur électricité à l'aide d'une pointe, comme il l'avait indiqué. Il attendait pour cela qu'un clocher en construction, à Philadelphie, fût terminé; mais, impatient



Fig. 43. — EXPÉRIENCE DE DALIBARD.

d'attendre, et jugeant l'expérience impraticable ainsi, il pensa qu'un *cerf-volant*, muni d'une pointe, pourrait remplir son but. En juin 1752, un mois après l'expérience de Dalibard, et sans en avoir connaissance, il construisit donc un *cerf-volant*, formé par deux bâtons enveloppés d'un



Fig. 44. — EXPÉRIENCE DE FRANKLIN.

mouchoir de soie. Au point de jonction du chanvre, conducteur de l'électricité, et du cordon de soie, non conducteur, il mit une clef où l'électricité devait s'accumuler, et annoncer sa présence par des étincelles. L'appareil ainsi disposé, l'habile expérimentateur se rend dans une prairie un jour d'orage (*fig. 44*). Il dit à son fils de lancer le cerf-volant dans les airs, tandis que lui-même, placé à quelque distance, l'observe avec anxiété. Pendant quelque temps il n'aperçoit rien, et il craint de s'être trompé. Mais tout à coup, une petite pluie étant survenue, les fils de la corde se raidissent, et la clef se charge : c'est l'électricité qui descend. Il court au cerf-volant, présente un doigt à la clef, reçoit une étincelle et ressent une

forte commotion, qui aurait pu le tuer, et qui le transporte de joie. Sa conjecture était changée en certitude, et l'identité de l'électricité et de la foudre était démontrée !

Presque en même temps, un physicien français, de Romas (1), exécutait des expériences analogues, conçues, cela ne fait plus aucun doute

(1) DE ROMAS, lieutenant-assesseur au tribunal de Nérac (1712-1776), était membre correspondant de l'Académie des sciences de Paris.

aujourd'hui, avant celles de Franklin, et de Dalibard, et même communiquées à l'Académie de Bordeaux depuis longtemps.

Le 7 juin 1753, il lançait un cerf-volant, avec 780 pieds de ficelle, à une hauteur de 550 pieds, et il obtenait des étincelles assez fortes pour être entendues à deux cent cinquante pas. Il avait lié au bout inférieur de la corde un cordon de soie de 3 pieds 1/2 de longueur (*fig.* à la page 89). Ce cordon était attaché à un pendule dont le poids était formé par une grosse pierre suspendue au-dessous de l'auvent d'une maison située hors de la ville. Il y avait, de plus, près du cordon de soie, un tuyau de fer-blanc de 1 pied 1/2 de longueur et de 1 pouce de diamètre, d'où l'on faisait partir des étincelles. M. de Romas, voyant que les secousses étaient douloureuses, employa un peu plus tard un excitateur, qui est peut-être un des premiers employés. Il se composait tout simplement d'un morceau de fer-blanc auquel était suspendue une chaîne. Toutes les personnes qui assistaient à l'expérience s'amuserent à l'imiter, sans se douter qu'elles jouaient en réalité avec la foudre; mais de Romas ayant été pris par une décharge plus violente que les autres, les opérateurs devinrent plus-circonspects. On voit encore, au Conservatoire des arts et métiers, le tabouret vernissé qui supportait le fil du cerf-volant. Il est comme grillé par l'électricité qui ruisselait alentour en cascades de feu. Ajoutons que de Romas ayant voulu recommencer ses expériences à Bordeaux, la populace, excitée par des moines et des dévots, le força de fuir sous une grêle de pierres, prétendant qu'il était sorcier et voulait attirer la foudre sur la ville.

Dans son Mémoire, inséré aux *Savants étrangers* pour 1753, de Romas donne des détails intéressants d'observations qui seraient très curieuses encore de nos jours. Le tuyau de fer-blanc étant distant de 3 pieds du sol, il vit quelques brins de paille, dont l'un avait plus de 1 pied de hauteur, exécuter la *danse des pantins* (page 64). Ce phénomène fut suivi d'une violente détonation, produite lorsque la paille vint toucher le bout de fer-blanc. Voici, du reste, comment s'exprime de Romas :

« Le feu qui parut dans le moment de cette explosion avait la forme d'un fuseau de huit pouces de longueur et de quatre ou cinq lignes de diamètre. La paille qui avait occasionné cette explosion suivit la corde du cerf-volant jusqu'à 40 ou 50 toises. Plusieurs assistants la virent tantôt attirée, tantôt repoussée, avec cette circonstance remarquable que, chaque fois qu'elle était attirée par la corde, il paraissait des lames de feu, et que l'on entendait des craquements presque continuels. »

L'expérience fut terminée par un orage de grêle qui ne permit point au cerf-volant de se soutenir plus longtemps. Mais, quand on examina le

sol, on aperçut au-dessous du tuyau de fer-blanc une petite fulgurité profonde d'un pouce et longue d'un demi-pouce. Alors on se rappela qu'on avait senti une odeur de soufre après les explosions et que toute la corde avait paru enveloppée d'une atmosphère de feu.

De Romas eut ensuite l'idée de faire construire un chariot électrique auquel on attachait son cerf-volant, de manière qu'on n'avait pas besoin de s'en approcher pour le manœuvrer.

En France, Mazéas, Delor, Lemonnier répétèrent l'expérience; Canton, Bevis, Wilson, en Angleterre; en Allemagne, Winckler, Wilke; en Italie, Beccaria.

En Russie, Richmann (1) tomba victime de son zèle, le 6 août 1753. A une verge de fer, élevée au-dessus de la maison, il avait attaché des fils métalliques, qui venaient se réunir dans un bocal de verre rempli de feuilles de laiton. C'était là que le fluide électrique, soutiré de l'air, devait se condenser. Pour mesurer l'intensité du fluide au moyen de l'électroscope de Saussure (*Électricité*, page 119), il approcha la tête de l'appareil, et, au même instant, il fut frappé au front par la foudre et tomba raide mort. On remarqua que son corps entra rapidement en putréfaction. Le mort de Richmann fut la démonstration la plus complète de l'identité de l'électricité avec la foudre.

**THÉORIE DE L'ORAGE.** — D'après ces diverses observations, on doit considérer les nuages orageux comme des corps conducteurs chargés d'électricité. La foudre n'est qu'une gigantesque étincelle électrique qui éclate entre un nuage et la terre; les éclairs sont eux-mêmes des étincelles absolument semblables à celles que nous produisons avec nos machines. Si l'étincelle jaillit entre deux nuages, ce qui arrive le plus souvent, elle ne nous fait aucun mal; mais, si elle parvient jusqu'à terre, elle foudroie le point touché.

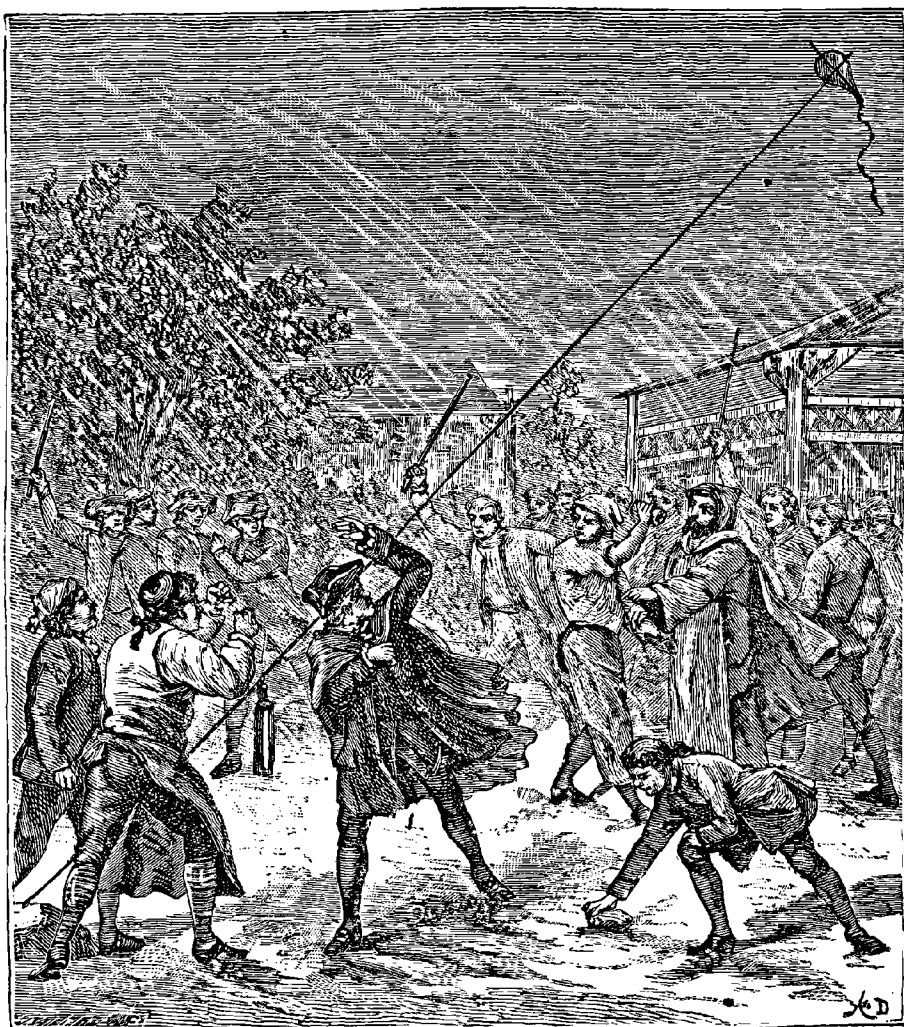
Le recueil scientifique l'*Électricité* publiait dernièrement une théorie de la formation des orages qu'il nous semble bon de reproduire, parce qu'elle présente des vues ingénieuses et donne la plus récente hypothèse pour expliquer le phénomène.

« Il est facile de démontrer avec le *plan-épreuve* de Coulomb (*Électri-*

(1) RICHMANN (Georges-Guillaume), né à Pernow, en Livonie (1711-1753). Adjoint, en 1735, à l'Académie des sciences de Saint-Petersbourg, il y professa les sciences naturelles et particulièrement la physique. Il s'occupa spécialement d'électricité et inventa un instrument auquel il donna le nom d'*indicateur électrique*; c'est en expérimentant cet appareil qu'il fut foudroyé. Il a publié de nombreux mémoires sur des questions de physique dans le *Recueil des mémoires de l'Académie de Saint-Petersbourg*.



*cité*, p. 26) que la capacité électrique d'une sphère est proportionnelle à son rayon. En effet, si l'on répand la même quantité d'électricité sur des sphères dont les rayons sont respectivement 1, 2, 3, etc., on verra que



Expérience de Romas (page 87).

les tensions seront respectivement  $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ , etc. Il en résulte que, si on prend pour unité de capacité celle d'une sphère de 1 centimètre, celle d'une sphère de 1 mètre sera de 100 et celle de la sphère terrestre

de 630,000,000. Celle d'une sphère de 1 millimètre sera  $\frac{1}{10}$  et celle d'une sphère de  $\frac{1}{10}$  de millimètre de  $\frac{1}{100}$ .

» En partant de ces principes incontestables, voici ce qui se passe dans la production d'un orage :

» On sait, par les phénomènes optiques qui produisent le *spectre du Brocken*, dont nous parlerons ci-après, que les simples vapeurs ne sont pas formées par de simples gouttes de pluie, qui, quelque petit que soit leur diamètre, donneraient naissance à un arc-en-ciel ordinaire. Les parties constituantes de la nuée sont de petits ballons remplis d'air et dont l'enveloppe est formée par une mince pellicule d'eau (*Chaleur*, p. 630). Le noyau de ces molécules est très faible, il n'est point égal à  $\frac{1}{10}$  de millimètre, et l'épaisseur de la couche liquide n'est pas la dixième partie du noyau. Supposons qu'elle soit précisément égale à  $\frac{1}{100}$  de millimètre. Chacun de ces globules creux possède une capacité électrique égale à  $\frac{1}{10}$ , qui est la même que si elle était pleine d'eau. En effet, on sait que l'électricité se porte invariablement à la surface des corps.

» Lorsqu'un orage se produit, la nuée devient noire et opaque, ce qui s'explique, parce que les gouttes de vapeur se crèvent et deviennent des globules d'eau, dont le diamètre est parfois très considérable. Il y a donc plusieurs actes consécutifs dans la production de l'orage. Le premier consiste dans la formation de gouttelettes pleines d'eau, le second dans la coagulation de ces gouttelettes en gouttes d'un diamètre plus notable, et le troisième dans la chute de la pluie. Chacune des gouttelettes qui constituent le nuage possède une certaine quantité d'électricité. Mais, comme il faut en réunir trois ou quatre pour former une gouttelette d'un même volume, les trois ou quatre quantités d'électricité se trouvent transportées sur une sphère dont la capacité électrique n'a point augmenté. Il en résulte donc que la tension électrique est trois ou quatre fois plus considérable qu'avant la condensation.

» Mais ce premier travail de condensation n'est pas le seul auquel les gouttes de pluie orageuse soient soumises. En effet, plusieurs gouttelettes ainsi constituées se réunissent pour former une goutte plus grosse. Supposons que huit gouttes soient ainsi rassemblées; elles donneront lieu à une sphère double, et qui sera chargée de trente-deux fois la même quantité d'électricité qu'une gouttelette de vapeur. Comme la capacité

électrique sera double, la tension finale sera seize fois plus grande que la tension primitive. On comprend donc qu'elle puisse atteindre une valeur notable. »

A cette citation de théorie nouvelle, nous devons ajouter le résumé des observations de M. Becquerel, observations qui forment la théorie généralement admise de la formation des orages, et qui, d'ailleurs, n'est point en contradiction avec ce que nous venons de rapporter.

Les nuages orageux, ceux qui produisent des éclairs et font entendre le tonnerre, sont, en général, denses, isolés et d'une grande étendue. Ils se forment ordinairement dans les saisons chaudes, par un temps humide; en effet, l'air, parvenu au terme d'humidité extrême, abandonne, par un abaissement de température de quelques degrés, une quantité d'eau beaucoup plus grande que par un abaissement égal, à une température moindre. C'est par ce motif que la formation des nuages est plus fréquente en été qu'en hiver.

La formation des nuages peut être due à deux causes : 1° à un courant ascendant de vapeur qui vient se condenser dans une région plus froide; 2° à la rencontre de deux courants d'air opposés. En général, la première cause donne lieu aux orages pendant l'été, et les orages que l'on observe l'hiver doivent être rapportés à la seconde; dans tous les cas, une condensation subite de vapeur est la condition essentielle de la production d'un orage. Il ne faudrait pas conclure de là que toute condensation de vapeur, suivie de pluie abondante, soit la cause d'un orage. Cette condensation est bien accompagnée d'électricité, mais la tension n'est pas toujours assez puissante pour donner lieu à des éclairs et au tonnerre; les nuages qui sont produits dans cette circonstance ne diffèrent donc des nuages orageux que par la quantité d'électricité qu'ils renferment.

Dans nos climats, l'été, les orages se forment habituellement lorsque la température est élevée, l'air calme et le ciel serein; la terre humide étant fortement échauffée par les rayons solaires, il en résulte un courant ascendant rapide de vapeurs qui s'élèvent et viennent se condenser dans les parties élevées de l'atmosphère; il peut se produire alors un nuage dense et volumineux qui est fortement électrisé. Lorsque les orages se forment ainsi, ils ont lieu le plus habituellement à l'instant de la plus forte chaleur du jour, et ensuite le ciel peut redevenir serein; mais ce qu'il faut remarquer, c'est que, quelquefois dans la même localité, les conditions restant les mêmes, il se produit un orage plusieurs jours de suite, jusqu'à ce que les vents et les circonstances atmosphériques aient changé. Volta a, le premier, signalé cette périodicité, qui n'a lieu que

pour les orages dus aux courants ascendants, et nullement pour les orages produits par la lutte de deux vents opposés.

Quand l'orage est sur le point d'éclater, les nuages qui le recèlent, suivant Beccaria, éprouvent une espèce de fermentation, dont les autres nuages sont privés. Ces nuages, ordinairement très denses, s'élèvent assez rapidement de quelques points de l'horizon ; ils sont terminés par un grand nombre de contours curvilignes nettement déterminés ; ils se gonflent, diminuent de nombre et augmentent de grandeur, tout en restant attachés invariablement à leur première base. Entre eux et l'horizon, on aperçoit un gros nuage très sombre, par l'intermédiaire duquel ils semblent communiquer avec la terre ; on voit, en outre, se former d'autres nuages, sous l'apparence de longs rameaux, et qui, sans se détacher de lui, couvrent graduellement le ciel. Indépendamment de ces rameaux, de ces lambeaux de nuages, on aperçoit, çà et là, dans l'atmosphère des nuages légers, dont les mouvements sont brusques, incertains et irréguliers, et que Beccaria a appelés *ascitizi* ou nuages additionnels.

Tels sont les effets qui se passent sur la surface du nuage tournée vers la terre ; mais, quand on est placé sur une montagne ou en ballon, et en position d'examiner la face supérieure, on voit que, même lorsqu'une couche de nuages semble unie et parfaitement de niveau sur la surface inférieure, la surface opposée présente de très hautes protubérances et de profondes cavités.

Lorsque les nuages orageux chargés d'électricité contraire se trouvent dans leur sphère d'activité réciproque, de longues étincelles commencent à éclater, même à de grandes distances. Si l'on joint aux attractions et répulsions des nuages l'action des vents contraires qui tendent à leur imprimer des mouvements de rotation et de translation en différents sens, on concevra facilement pourquoi les nuages affectent souvent des formes si bizarres et sont animés de mouvements désordonnés à l'instant où l'éclair brille.

Tels sont les signes avant-coureurs de l'orage, quand il est encore éloigné ; mais, aussitôt que les nuages sont à une distance convenable de la terre, le bruit des décharges électriques se fait entendre, la foudre gronde et les retentissements se prolongent au loin.

Si les causes qui donnent lieu à la formation des orages sont purement locales, ceux-ci sont transportés par les vents, éclatent sur leur passage, et finissent par s'épuiser sans s'étendre de tous côtés. Mais si les causes embrassent une certaine étendue de pays, alors les nuages électriques, d'abord circonscrits, s'étendent en tous sens, et parviennent à couvrir de vastes surfaces. Dans certaines circonstances locales, il se manifeste des

effets électriques analogues à ceux que produisent les orages ; aussi les phénomènes de la foudre s'observent également dans les nuées qui sortent du cratère des volcans.

**LOIS DES ORAGES.** — Sous ce titre, nous ne voulons pas désigner des lois précises et parfaitement établies ; mais simplement présenter quelques observations à peu près généralement admises comme étant confirmées par l'expérience.

1. Les orages viennent presque toujours du sud-ouest.

2. Dans les cas rares où ils paraissent venir du nord-est, on peut expliquer leur apparition, soit parce qu'ils se forment sur place, soit parce qu'ils sont dérivés d'autres orages passant au nord-est.

3. Leur propagation est assez lente pour qu'on puisse facilement prévenir de leur approche les lieux menacés.

4. Cette annonce est d'autant plus facile à faire que leurs trajectoires successives offrent une grande ressemblance, surtout si on compare les orages d'une année à ceux qui se sont déjà produits précédemment dans le même mois.

5. Cette prédiction peut être facilitée par l'observation des mouvements d'un électromètre (*Électricité*, page 22), placé sur le sommet d'un édifice élevé et isolé.

6. L'arrivée de l'orage est précédée d'une dépression barométrique ; mais elle coïncide avec le moment où le baromètre remonte.

7. Pour qu'un orage éclate, il faut que le thermomètre soit élevé et que le vent régnant souffle du sud-ouest ou des régions très voisines.

8. La fin de l'orage est indiquée par le retour du vent au nord-est, au moins temporairement. Tant que le vent n'a pas repris la position nord-est, l'orage n'est que suspendu et ne peut être considéré comme terminé.

9. La durée moyenne d'un orage est de 30 à 40 minutes. Comme les nuées orageuses ne font guère plus de 50 kilomètres, leur diamètre moyen peut être évalué à 25 kilomètres.

10. Le moment où la foudre gronde coïncide ordinairement avec l'arrivée de l'ondée de grande pluie.

11. Les phénomènes semblent indiquer qu'il y a dans les régions supérieures un courant nord-est qui précipite la vapeur d'eau, forme les nues noirâtres, et finit par triompher.

12. Il y a des échéances orageuses, c'est-à-dire des jours, où presque toutes les années des orages éclatent avec plus ou moins d'intensité. Une des principales, à Paris, est le 15 août, quelquefois le 14 ; d'autres fois, le 16. Il est rare que ces trois jours se passent sans incident.

13. Rarement les orages marchent autrement que par séries de deux ou de trois, quelquefois de quatre, se suivant à un ou deux jours d'intervalle ; mais, dans ce cas, il est rare qu'ils reparassent à la même heure. Les intervalles sont généralement de 25 heures ou de 23 heures, ou des multiples de 25 heures ou de 23 heures, comme si le retour de la lune, soit au méridien, soit à l'horizon, exerçait de l'influence sur leur arrivée, sinon sur leur génération.

14. Les éclairs de chaleur ne sont pas tous le reflet d'orages lointains ; cependant il est rare qu'ils se produisent d'une façon sérieuse sans qu'il y ait un orage à l'horizon.

15. Les orages nocturnes ne sont pas plus terribles que les orages diurnes ; mais on entend mieux les coups de foudre, et on voit mieux les éclairs.

16. Il se déclare souvent, vers le coucher du soleil, des orages qui peuvent être locaux et qu'il faudrait observer d'une façon toute particulière.

**ÉCLAIRS. — ÉCLAIRS SPHÉRIQUES.** — L'éclair n'est pas autre chose, avons-nous dit, qu'une immense étincelle électrique. On les distingue en trois classes (*fig.* à la page 105). Ceux de la première classe, éclairs sinueux, sont formés d'un sillon de lumière, mince, serré, très arrêté sur les bords, se mouvant en zigzag ; ils ont, avec l'étincelle électrique, la ressemblance la plus complète. La forme en zigzag de ces éclairs s'explique par la propriété qu'a l'électricité de suivre toujours la ligne qui offre le moins de résistance à sa transmission ; dans les fortes décharges, l'air étant plus ou moins comprimé, l'électricité cherche la partie où l'air est le moins condensé, elle se dévie alors de la ligne droite. De plus, on a remarqué que l'éclair parcourt souvent des distances immenses ; cela pourrait venir, indépendamment de l'action par influence, de la présence de nuages isolés ou de globules vésiculaires servant d'intermédiaires pour opérer la décharge. Il se produit alors l'effet que l'on remarque avec le *carreau magique* ou le *tube étincelant* (*Électricité*, page 69).

Les éclairs de deuxième classe sont de beaucoup les plus fréquents ; ils produisent des lueurs sans contour arrêté, éclairant d'immenses surfaces. Ce sont probablement des masses d'éclairs de première classe qu'on ne voit qu'à travers un voile de nuages. Ils sont comparables à l'étincelle brillante, large et peu longue, qui résulte de la décharge d'une batterie électrique dans laquelle l'électricité est fortement condensée. Comme ceux de première classe, leur durée est, pour ainsi dire, inappréciable ; mais,

tandis que les autres sont ordinairement blancs, les éclairs en masse sont souvent d'un rouge très intense, mêlé quelquefois de blanc ou de violet.

Les éclairs de la troisième classe, appelés *éclairs sphériques* ou *éclairs globulaires*, sont notablement différents des autres. Ce sont des sphères de feu qui descendent du ciel avec une certaine lenteur, qu'on peut apercevoir pendant huit ou dix secondes ; elles arrivent sur le sol, y rebondissent souvent, viennent quelquefois se fixer sur la pointe d'un paratonnerre et éclatent enfin avec un bruit formidable, en produisant tous les effets de la foudre.

Un correspondant du journal anglais la *Nature*, du 2 juin 1881, décrit ainsi un éclair globulaire qu'il a observé :

« J'étais debout à une fenêtre du second étage de l'hôtel de Bragançe, qui est près du fleuve, le domine complètement, et d'où on peut apercevoir une grande étendue du cours du Tage. Je vis un éclair, suivi immédiatement d'une détonation, et la queue de l'éclair donna naissance à deux balles de feu qui descendirent vers le fleuve, séparément, mais à une petite distance l'une de l'autre. Mais lorsque chacune d'elles arriva près de la surface de l'eau, et la toucha, on entendit se succéder rapidement deux explosions, qui auraient pu annoncer mon dernier jour. »

Le graveur Solokoff, qui assistait Richmann dans les expériences qui furent mortelles à celui-ci, raconta que plusieurs étincelles de forme ordinaire avaient été tirées du conducteur, et que celle qui atteignit le professeur se détacha spontanément et avait une forme sphérique. On est donc certain que ces éclairs se lient d'une manière continue aux autres ; mais, dans l'état actuel de la science, on ne peut donner encore une explication absolument satisfaisante de leur formation et de leur origine.

Cependant, depuis quelques années, dans une série de travaux communiqués à l'Académie des sciences, un physicien distingué, M. Gaston Planté a fait connaître de nombreux phénomènes produits par les courants électriques de haute tension, et a signalé les analogies qu'ils présentent avec plusieurs phénomènes atmosphériques et cosmiques inexplicables jusqu'ici. Nous citerons, au fur et à mesure que nous parlerons de ces phénomènes, les expériences de M. Gaston Planté.

Voici d'abord ce qui regarde les *éclairs globulaires*.

Si, dans un *voltamètre*, appareil dont nous parlerons plus loin, une des *électrodes* est approchée du liquide, tandis que l'*électrode* négative y est plongée préalablement, au moment où a lieu la décharge des puissantes *batteries secondaires* qu'emploie M. Planté, le liquide forme une

boule lumineuse. Il se produit à l'extrémité du pôle positif un globe lumineux, accompagné d'un bruissement particulier et animé d'un rapide mouvement giratoire. Le globule se dissipe sans bruit, ou avec production d'une bruyante étincelle à l'autre pôle, suivant que les électrodes plongent plus ou moins dans le liquide.

M. Planté rapproche ces phénomènes de ceux de la *foudre globulaire*, dans lesquels on retrouve également la forme sphérique, le bruissement, le mouvement giratoire, et, suivant les circonstances, la disparition des globes fulminants avec explosion ou sans bruit. Il pense qu'un effet analogue doit se produire dans les grands orages, quand l'électricité atmosphérique se trouve en quantité exceptionnelle, de manière à constituer par ses décharges continues une sorte de flux électrique, et de plus, quand l'atmosphère est traversée par une pluie abondante facilitant la formation de sphéroïdes de vapeur d'eau électrisés. Ces vues, ajoute M. de Parville, paraissent d'autant plus se rapprocher de la vérité que, par exemple, tout le long du Puy-de-Dôme, par pluie d'orage, on voit souvent courir autour de la montagne de semblables globes de feu. On dirait des balles élastiques bondissant de rochers en rochers. Ces conditions de production se sont trouvées réalisées pendant le violent orage qui a éclaté sur Paris le 24 juillet 1876. La foudre est tombée, sous forme globulaire, trois fois presque au même point, sur le théâtre Beaumarchais, dans la cour et dans le jardin de la maison du numéro 28 de la rue des Tournelles, connue dans le quartier sous le nom de l'hôtel de Ninon de Lenclos. Il est vraisemblable que le phénomène se produit plus souvent qu'on ne le pense, mais qu'il échappe à l'attention d'observateurs non prévenus. Tout porte donc à croire, avec M. Planté, que le tonnerre en boule ne serait que de la matière pondérable puissamment chargée d'électricité, une véritable bombe, générée d'abord par l'électricité atmosphérique et rendant brusquement le travail emmagasiné, quand elle rencontre des conditions favorables à la détente de la force électrique accumulée.

Un autre orage d'une grande intensité, survenu le 18 août de la même année, rapporte encore M. de Parville, a présenté également des effets de foudre globulaire, et a fourni à M. Planté l'occasion d'observer un genre d'éclair qu'il a désigné sous le nom d'*éclair en chapelet* (fig. à la page 105), et qui est de nature à jeter un nouveau jour sur les productions de cette forme particulière de la décharge électrique.

Entre les brillants éclairs qui ont accompagné cet orage, l'un d'eux, vu des hauteurs de Meudon, a paru s'élaner de la nue vers le sol, dans la direction de Vaugirard, en décrivant une courbe semblable à un S



allongé, et il est resté visible pendant un instant appréciable, en formant un chapelet de grains brillants disséminés le long d'un filet lumineux très étroit. Cette formation de grains lumineux, alternant avec des traits de



Les *strufertarii* (page 100).

feu, doit être une conséquence de l'écoulement du flux électrique au travers d'un milieu pondérable. Ce genre d'éclair montre la transition de la forme ordinaire de la foudre en traits sinueux ou rectilignes à la forme globulaire ; car il est facile de concevoir que, si la condensation électrique

sur quelques points du trajet de l'éclair est plus considérable, les grains puissent acquérir un certain volume et donner naissance à des globes restant quelque temps visibles. Ainsi, d'après M. G. Planté, les *globes fulminants* peuvent être considérés comme dérivant d'un *éclair en chapelet*, et si l'on ne voit pas, sur le point même où ils apparaissent, le trait de foudre d'où ils sont détachés, c'est qu'on ne peut saisir de près tout l'ensemble du phénomène, comme lorsqu'on est placé à une grande distance. A l'appui de cette opinion, on peut ajouter que l'orage du 18 août 1876, pendant lequel ce genre d'éclairs a été observé, a donné lieu, en d'autres endroits, à la chute de globes fulminants.

L'avenir nous renseignera sur la valeur de cette théorie. Les recherches de M. Planté auront, en tout cas, considérablement éclairci un problème difficile.

**BRUIT DU TONNERRE.** — Le *tonnerre* est le bruit de la détonation violente qui succède à l'éclair pendant un orage. Quoique le bruit du tonnerre et la lumière de l'éclair soient deux faits simultanés, on observe un intervalle de quelques secondes entre les deux phénomènes, parce que le son ne parcourt que 333 mètres par seconde (*Acoustique*, page 754), tandis que la lumière arrive dans un espace de temps inappréciable de la nue à l'œil de l'observateur. En conséquence, lorsqu'on entend le bruit du tonnerre cinq ou dix secondes après avoir vu l'éclair, c'est que le nuage orageux est éloigné de cinq ou dix fois 333 mètres. Il existe un moyen pratique assez commode de calculer très approximativement la distance du nuage sans avoir recours à une montre à secondes. On sait que le pouls, à l'état de santé, bat 60 à 63 pulsations par minute; c'est-à-dire que chaque pulsation est séparée de la pulsation qui la suit par un intervalle d'une seconde environ. En comptant le nombre des pulsations qui ont lieu entre l'éclair et le coup de tonnerre, et en multipliant ce nombre par 333, on obtient en mètres la distance qui sépare l'observateur du nuage.

Le bruit du tonnerre résulte de la commotion que la décharge électrique a excitée dans le nuage et dans l'air, commotion que l'on comprend aisément après l'expérience du *thermomètre de Kinnorsley* (*Électricité*, page 61). Quand l'on est dans les environs de l'endroit où brille l'éclair, le bruit du tonnerre est sec et de courte durée; un peu plus loin, on entend une série de bruits se succédant rapidement; plus loin encore, c'est un bruit faible d'abord, mais grandissant aussitôt et se prolongeant avec une intensité inégale. Un grand nombre d'hypothèses ont été faites pour rendre compte du roulement du tonnerre, mais aucune n'est absolument satisfaisante : les uns lui ont donné pour cause la réflexion du son sur la terre et sur les

nuages; d'autres considèrent l'éclair, non comme une seule étincelle électrique, mais comme une série d'étincelles, dont chacune produit en éclatant une détonation particulière, et qui, naissant en des points diversement éloignés et dans des zones de densités inégales, non seulement apportent à l'oreille de l'observateur des détonations partielles, mais encore des sons d'une intensité différente. D'autres enfin expliquent ce phénomène par les zigzags mêmes de l'éclair, en admettant qu'il y a un maximum de compression de l'air à chaque angle saillant, ce qui cause l'intensité inégale du son.

**EFFETS DE LA Foudre.** — Les effets de la foudre sont indentiques avec ceux que nous produisons à l'aide des batteries électriques; ils n'en diffèrent que par leur intensité beaucoup plus grande. On peut donc constater des effets mécaniques, physiques, chimiques et physiologiques, de même nature que ceux produits dans les cabinets de physique. Nous allons décrire les principaux de ces effets.

*Effets mécaniques, de transport, etc.* — La foudre suit toujours dans sa marche les corps bons conducteurs, brise les corps mauvais conducteurs, pour reprendre sa route à travers les premiers; c'est ainsi qu'elle projette en l'air des pièces métalliques scellées dans les murs, et ces effets se manifestent surtout à l'entrée et à la sortie des métaux; elle transporte au loin ou projette des matières pondérables, dans un grand état de ténuité, composées de fer, de soufre, de charbon, etc. On a remarqué (1) que ces dépôts sont d'autant plus marqués que l'électricité éprouve plus de difficulté à traverser les corps, et qu'à mesure qu'elle dépose de la matière, elle en prend de nouvelle dans le corps qu'elle traverse. On a observé, sur des pierres détachées par l'effet de la foudre, une couche de sulfure de fer d'un demi-millimètre d'épaisseur et même des cristaux de ce composé, lesquels, d'après leur position, paraissent avoir été formés dans le trajet de la foudre à travers le métal. On a reconnu l'existence de l'oxyde de fer sur les arbres foudroyés, et du fer métallique sur diverses roches. Il semblerait résulter de là que le fer existe dans les nuages orageux, et qu'il est enlevé aux rochers situés à la surface de la terre, principalement aux cimes des montagnes.

Les effets mécaniques opérés par la foudre sur le bois sont remarquables; non seulement elle le brise, mais elle le divise en lattes excessivement minces; il ne serait pas superflu peut-être de déterminer les principaux modes de lésion que la foudre peut laisser sur les arbres, qui

(1) Becquerel, *Traité d'électricité*.

sont frappés bien plus souvent encore qu'on le croit. Dans le voisinage des lignes télégraphiques, les sillons commencent à peu près au niveau des fils, tantôt un peu plus haut, tantôt un peu plus bas. Quand la décharge a été assez violente pour que les fils soient rompus, il est rare que cette cicatrice ne soit pas remarquée. Quelquefois les arbres sont décortiqués à partir du point où ils ont été touchés. Il peut arriver que la décortication soit partielle ou totale jusqu'aux racines. Cet effet n'a été observé que lorsque l'arbre est imprégné d'humidité; car c'est la vapeur produite qui fait craquer l'enveloppe. Quelquefois l'arbre est éclaté, c'est alors la moelle qui a fourni l'eau nécessaire à la vaporisation. Cette vaporisation peut se produire le long des racines; aussi, dans certains cas, le sol a-t-il été soulevé et bouleversé. Bien des fois, on trouve dans le sol la trace laissée par le passage de l'étincelle. Quelquefois aussi la foudre ne fait qu'enlever les mousses et les lichens qui couvrent le tronc, et plus particulièrement le côté situé du côté du nord. C'est encore l'humidité accumulée sous ces végétaux parasites qui, réduite en vapeurs, les lance au loin. La foudre creuse souvent des sillons qui peuvent pénétrer jusqu'au cœur du bois. Le fluide vient, dans ce cas, chercher la sève qui s'y trouve, et peut ne pas produire d'autres accidents. Dans certains cas, le sillon reste sur l'écorce et semble fait de haut en bas avec un rabot. Mais, la plupart du temps, les sillons superficiels sont en hélice. Ils forment une spirale qui parcourt toute la longueur de l'arbre, souvent sans le carboniser. Il arrive aussi que les spires, commencées sur un arbre, se continuent sur l'arbre voisin. On peut encore trouver des arbres *forés*, c'est-à-dire dont la partie centrale a disparu, et d'autres qui ont été *roulés*, c'est-à-dire changés en cylindres intérieurs l'un à l'autre, et pouvant se développer comme des tubes de télescope. Ces phénomènes tiennent encore à l'humidité qui se trouve accumulée dans la moelle ou dans l'espace intercalaire des couches successives du bois.

Lorsque la foudre frappe un arbre, du temps des Romains, on le considérait comme impur, jusqu'à ce qu'il fût exorcisé par des prêtres spéciaux nommés *strufertarii* (*fig.* à la page 97). Il est à regretter que cette pratique n'ait disparu que pour faire place à une indifférence trop complète; car, sans attacher aucune idée religieuse à cette pratique, il est évident que cette visite offrirait aujourd'hui un certain intérêt, et qu'avec les connaissances actuelles, des *strufertarii* laïques découvriraient infailliblement des faits physiques de la plus haute utilité.

*Effets calorifiques.* — La foudre casse, brise, enflamme et fond les corps qui sont mauvais conducteurs, combustibles, métalliques ou fusibles; citons, entre mille exemples, le coup de foudre des plus violents,

qui a éclaté à Genève, le 5 mai 1880, pendant un des nombreux orages qui ont été particuliers à la région méditerranéenne, et dont M. Colladon a relevé les traces. Les fils conducteurs des horloges voisines de l'endroit atteint, ont été brûlés, et les horloges se sont arrêtées, de sorte que l'heure exacte du phénomène s'est trouvée enregistrée, pour ainsi dire, d'une façon automatique. Un observatoire a été visité par le météore. Le conducteur métallique de l'horloge de cet établissement et celui du paratonnerre étaient séparés par un matelas de papier qui a été perforé. De chaque côté on a vu des parcelles de limaille enlevées au conducteur et projetées sur ce papier. Les effets ordinaires ont été constatés. Souvent, le fil métallique n'éprouve pas une fusion complète, mais il subit des incurvations, des torsions, des zigzags, quelquefois même des raccourcissements. D'autres fois, les fils métalliques sont rompus mécaniquement par le choc des corps pesants projetés dans le voisinage. D'autres fois encore, la rupture est combinée avec une fusion. Le nombre des morceaux peut être très considérable; comme rien ne le limite, il y a des cas où le corps fulguré peut être réduit en poussière.

On sait encore que la foudre, en traversant les corps et comprimant l'air, dégage assez de chaleur pour enflammer rapidement les substances ténues, telles que la paille, le foin, le coton ou les liquides alcooliques. Le 11 juin 1880, en Amérique, au sud de Titusville, non loin de la petite rivière d'Oil-Creek, la foudre alluma un incendie dans une usine où se purifie l'huile de pétrole. La perte est évaluée à plus de 200,000 barils et à plus de 5 millions de francs. Un grand nombre de dangereuses blessures ont été reçues. Les journaux américains racontaient ainsi ce sinistre :

« Une terrible explosion s'est produite aussitôt : le toit du réservoir a été pulvérisé; le sol a été ébranlé comme par un tremblement de terre, et une colonne d'huile enflammée, lancée à des centaines de pieds de haut, est retombée comme un torrent le long de la colline, et a embrasé sur son passage plusieurs autres réservoirs. Les divers courants d'huile flambante se sont bientôt réunis, formant un véritable fleuve de feu qui a continué sa route vers Titusville. Quand il s'est précipité dans la rivière d'Oil-Creek, ses eaux sont devenues une masse de flammes sur un espace de plusieurs centaines de yards; le pont de fer a été détruit en un clin d'œil; la rivière a été desséchée en plusieurs endroits, et la chaleur a fait éclater jusqu'aux cailloux de son lit. »

Les bulles et couches vitreuses, observées sur les sommets des hautes montagnes, sont aussi rapportées à des effets électriques; car ces enduits sont semblables à ceux que l'on remarque sur les briques et autres substances fusibles non conductrices frappées par la foudre.

Lorsque la foudre tombe sur un point quelconque du sol, elle suit toujours les corps meilleurs conducteurs qui se présentent à elle pour se rendre dans l'intérieur. Cependant il y a de nombreux exemples démontrant que la foudre, qui frappe la terre n'est pas obligée d'y pénétrer, si elle n'y est point attirée par quelque secrète affinité, et qu'elle peut la parcourir en zigzag de manière à faire un trajet fort grand. Le journal anglais, le *Times*, rapporte, à propos des orages qui ont éclaté à Cork en février 1880, qu'un coup de foudre a frappé une ferme, tué quelques-uns des habitants et des animaux qui s'y trouvaient, et qu'à la suite de l'explosion on a trouvé un sillon en zigzag qui avait traversé un pré d'un hectare de superficie.

Si, pénétrant dans l'intérieur de la terre, la foudre est obligée de traverser des masses plus ou moins considérables de sable ou de matières capables d'être fondues à une température élevée, il se forme alors, dans la direction de la décharge, des tubes vitrifiés, appelés *tubes fulminaires*, *fulgurites* ou *astrappalites*, d'une profondeur de 2 à 10 mètres. La substance du sol est entrée en fusion comme entre celle des poteries. Il s'en rencontre beaucoup en Silésie, dans le Cumberland, dans le désert du Sahara, etc. On les reproduit en petit en faisant passer la décharge d'une très forte batterie à travers du verre pilé en poudre.

*Effets magnétiques.* — Quand la foudre traverse des barres de fer, elle y produit des effets magnétiques semblables à ceux que l'on obtient avec l'électricité, et dont nous parlerons ci-après en traitant de l'*électromagnétisme*. Les orages altèrent l'aimantation des aiguilles des boussoles, dérangent la marche des chronomètres, etc., et quelquefois donnent la propriété magnétique à des clous, des chevilles et autres objets en fer.

*Effets chimiques.* — Dans les eaux pluviales qui se déversent en temps d'orage, on retrouve des combinaisons formées par l'oxygène avec l'azote, d'où a résulté de l'acide nitrique se combinant avec la chaux, l'ammoniaque, etc., qui se trouvent dans l'atmosphère. C'est de plus à l'action de l'électricité, même à faible tension, que l'on doit attribuer la production de l'*ozone* : lorsque la foudre éclate, l'odeur sulfureuse qui se manifeste est sans doute due à la production de l'*ozone*. C'est aussi, sous l'influence de la foudre, que le lait aigrit et que les viandes se corrompent.

*Effets physiologiques.* — Suivant l'intensité de la foudre, les hommes et les animaux sont tués ou seulement contusionnés ou paralysés. Ils peuvent souvent être préservés de ses atteintes par un vêtement de soie ou d'une étoffe non conductrice. La foudre détermine des lésions, particulièrement dans les organes du système vasculaire (*vaisseaux sanguins*), par suite desquelles il y a épanchement du sang et d'autres

liquides qui occasionne instantanément la mort ; à raison de ces désordres, la putréfaction se manifeste très promptement dans les cadavres.

Nous emprunterons, en terminant, au recueil de M. Figuiier le récit des curieux effets de la foudre, constatés pendant les orages de l'année 1880 :

« Pendant le violent orage qui éclata le 22 avril, la foudre frappa un bateau pêcheur qui se trouvait dans la Manche, au nord-est de Gravelines. Après avoir brisé le grand mât, le tonnerre pénétra jusque dans l'intérieur du bateau, où le fluide électrique suivit tout le fer qui se trouva sur son passage. Le patron, adossé contre le mât, aperçut une boule de feu qui vint aussitôt le renverser violemment sur le pont. Les hommes faisant partie de l'équipage se trouvèrent étourdis pour un instant ; plusieurs d'entre eux tombèrent évanouis. Pendant plusieurs heures, ils furent tous atteints d'une surdité telle qu'ils ne s'entendaient plus les uns les autres.

» Le mercredi 5 mai, un orage d'une grande intensité se produisit à Genève et à Fribourg. Les montagnes de la Gruyère furent rapidement couvertes de grêlons. La tempête, descendant sur Fribourg, la foudre tomba sur le temple protestant, sur la scierie de Pérolles, et sur un ouvrier dont la main droite fut paralysée. Tout le plateau était en quelque sorte incandescent. Dans les ateliers de la fonderie de Fribourg, le fer entassé dans les magasins dégageait continuellement des étincelles électriques, avec un bruit comparable à celui d'une capsule de fusil qui éclate. Près de Thoune, la foudre tomba sur un cultivateur et sa femme qui travaillaient en plein champ, avec leurs deux enfants. L'homme et la femme furent tués sur le coup, les enfants furent saufs.

» Le 17 juin, dans l'après-midi, un orage violent se développait sur les cimes qui séparent Montreux de Fribourg. A peu de distance de Clarens, plusieurs personnes travaillaient dans les vignes ; une petite fille ramassait des cerises au pied d'un magnifique cerisier ; sa mère l'ayant rappelée, elle se trouvait à trente pas de l'arbre, lorsque celui-ci est frappé par la foudre. L'enfant fut comme enveloppée de feu, mais n'éprouva aucun mal. Un homme revenait du travail, il devait passer sous le cerisier ; mais il s'arrête un instant pour allumer sa pipe, la foudre tombe à vingt pas, il entend une détonation, comme un coup de pistolet tiré derrière son dos, et reçoit sur la tête un choc pareil à celui d'une baguette de fer. Les personnes qui se trouvaient dans les vignes voisines sont restées longtemps immobiles de frayeur avant de prendre la fuite.

» En France, le 20 juillet, un orage terrible a ravagé de nombreuses communes dans les départements de Maine-et-Loire, d'Indre-et-Loire, de la Vienne, de la Loire-Inférieure. A Saint-Aubin-des-Châteaux (Loire-Inférieure), la foudre est tombée sur une étable et a communiqué le feu à la toiture. Deux hommes se trouvaient debout, causant ensemble dans l'embrasure de la porte : l'un est foudroyé et tombe mort, l'autre est renversé inanimé sur le sol. La foudre a produit sur celui-ci un effet étrange : à partir du milieu du sommet de la tête jusque dans le cou, elle

a tracé une raie d'environ deux centimètres de largeur, parfaitement régulière, les cheveux sont complètement brûlés et laissent la peau à nu. Le fluide a suivi le dos, occasionné plusieurs brûlures à l'épaule et disparu sans causer le moindre dommage aux vêtements.

» La *Lancet*, de Londres, a rendu compte des effets produits quelques jours après par l'électricité sur le corps d'un homme frappé de la foudre. La victime, berger du comté de Leicester, gardait son troupeau dans les champs, lorsque l'orage éclata, et, comme bien des gens s'obstinent à le faire, il chercha un refuge sous un arbre. Peu de temps après, il sentit une commotion au-dessus de l'épaule gauche, et, perdant tout à coup l'usage de ses jambes, il tomba. Lorsqu'on le transporta à son domicile, il avait encore toute sa connaissance, mais il se plaignait de douleurs dans le dos et dans les jambes. L'examen auquel se livra le médecin appelé pour lui donner des soins lui fit découvrir un assez bizarre effet du coup de foudre. Depuis l'épaule gauche en bas, occupant tout le dos, apparaissait, admirablement reproduite en saillie sur la peau et dans une teinte écarlate brillante, une tige d'arbuste, avec de nombreuses branches délicatement tracées comme avec une pointe d'aiguille. Le tronc du végétal avait à peu près trois quarts de pouce ou neuf lignes de largeur, et l'aspect général était celui d'un pied de fougère à six ou huit branches. Le tout était fort bien reproduit et comme imprimé sur le dos du patient. Ses vêtements ne portaient à cet endroit aucune trace du passage du fluide. Cette impression n'eut pas de durée. Au bout de trois jours, elle commença à s'effacer, les branches extrêmes d'abord, et le reste ensuite. »

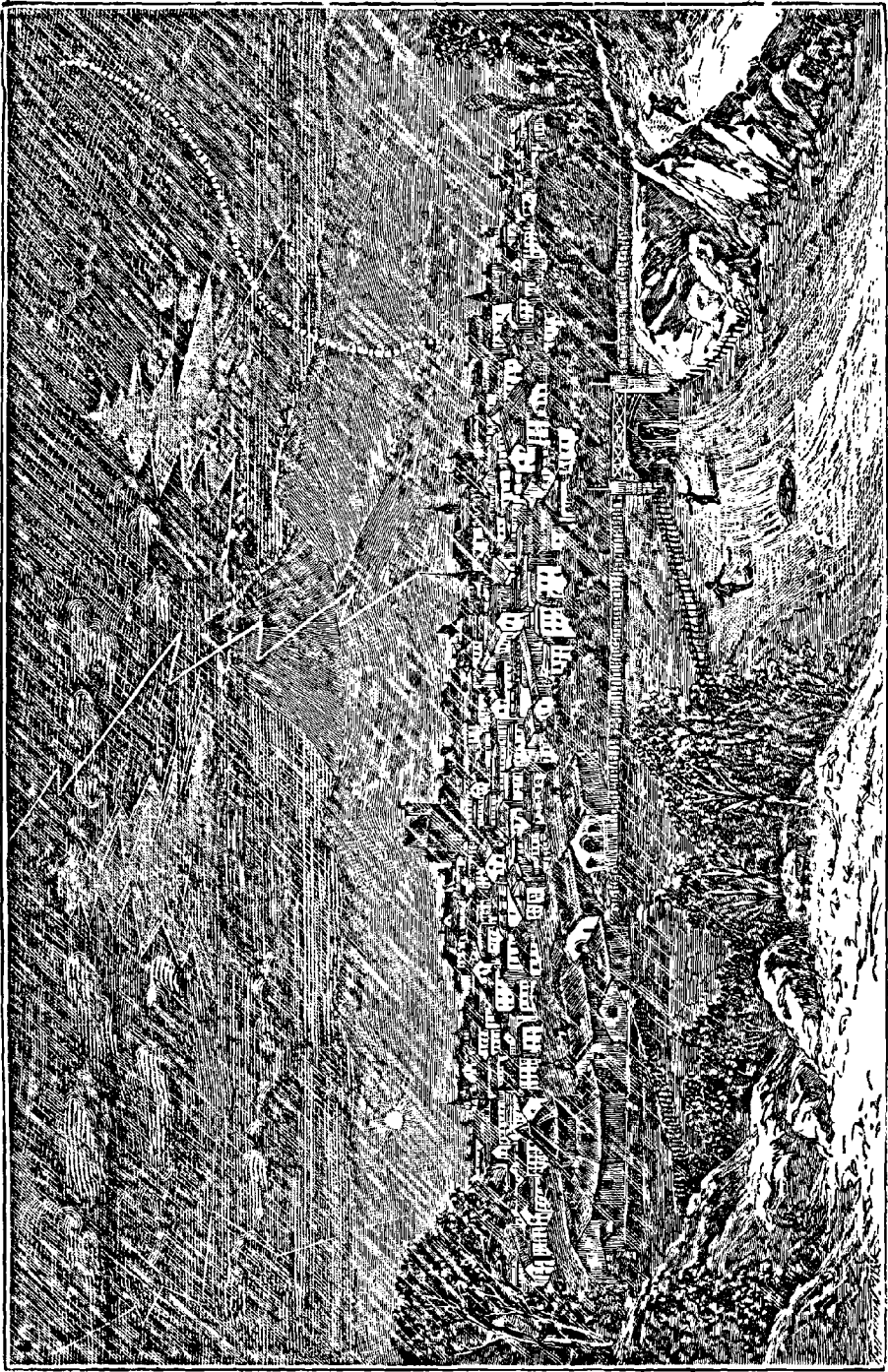
**STATISTIQUE DES FOUDROYÉS.** — D'après les relevés statistiques de M. le docteur Boudin, de 1835 à 1869, la foudre a fait environ 3,000 victimes, soit 90 par an; et si l'on y ajoute les blessés, on arrive à 10,000 personnes, soit 300 par an. De 1854 à 1869, le nombre des tués raides s'élève à 1,630, dont 1,160 hommes et 470 femmes, ce qui donne 108 pour moyenne annuelle.

En supputant le nombre des foudroyés par mois, on trouve en moyenne, sur 108 personnes tuées : en janvier, 0; février, 0; mars, 5; avril, 6; mai, 9; juin, 24; juillet, 14; août, 21; septembre, 14; octobre, 15; novembre et décembre, 0. On voit que les quatre mois d'hiver ne présentent aucune victime.

D'après les renseignements recueillis, on compte, en général, sur 100 foudroyés, 71 hommes et seulement 29 femmes, ce qui s'explique par la raison que les femmes sont plus souvent à leur maison que dehors. Les animaux sont aussi beaucoup plus maltraités que l'espèce humaine, probablement parce qu'ils se trouvent réunis en plus grand nombre.

Les tristes exemples des personnes foudroyées qu'on déplore chaque année se rapportent d'ailleurs, pour la plupart, à des imprudents. Si la foudre doit tomber, ce sera de préférence sur un arbre qui forme un point





Diverses formes des éclairs.



élevé où l'électricité du sol doit s'accumuler pour se rapprocher le plus possible de celle du nuage qui l'attire, et pourtant c'est sous les arbres que volontiers les ignorants vont chercher des abris. Dans certains villages, on a encore l'habitude de sonner les cloches pendant l'orage, pensant, par la vertu de la cloche, éloigner la nue et éviter la grêle. Si ce n'était là qu'un préjugé, il n'y aurait pas grand inconvénient à laisser les gens de la campagne se donner cette petite satisfaction, de même que de brûler des petits cierges et d'arroser d'eau bénite la maison ; mais il y a danger pour les sonneurs, car les clochers, étant élevés, sont plus exposés à être foudroyés que les autres édifices.

**CHOC EN RETOUR.** — L'homme et les animaux peuvent éprouver une commotion violente, et souvent mortelle, sans être frappés par la foudre, et à une distance même assez grande du lieu où l'éclair se produit. Cette commotion porte le nom de *choc en retour*. Pour la définir, il suffira d'expliquer la manière dont elle se manifeste généralement.

Supposons qu'un nuage orageux s'étende au-dessus d'un espace de terrain assez considérable, ayant, par exemple, 1 kilomètre en longueur : tout ce qui sera au-dessous de ce nuage, champs, maisons, arbres, êtres vivants, tout sera soumis à l'action du fluide électrique et se *chargera par influence* (page 30) de l'électricité contraire à celle du nuage. Les deux électricités contraires, qui se trouvent ainsi en présence, tendront dès lors à se réunir, à se combiner. Or, dans ce cas, il pourra se faire que cette réunion s'opère à l'une des extrémités du nuage, et, instantanément, tous les corps qui étaient électrisés, aussi loin que s'étendait l'influence du nuage orageux, rentrent dans leur état naturel, et si brusquement, que les êtres animés en ressentent une commotion qui, dans certains cas, peut avoir une grande violence et même déterminer la mort. L'énergie de la secousse est, en effet, en rapport avec la charge du nuage. Bien entendu, le choc en retour ne produit ni combustion, ni plaies, ni fractures, en un mot, aucune trace du fluide électrique, au lieu que le foudroiement direct présente ces caractères.

**PARATONNERRES.** — Depuis un temps immémorial, les Chinois, paraît-il, connaissent les paratonnerres. Les flèches aiguës qui couronnent toujours les tours nombreuses de ce pays, où chaque ville a la sienne, et les chaînes qui accompagnent la flèche et qui vont rejoindre les angles saillants de la tour, sont de vrais conducteurs du fluide électrique, dont l'expérience peut avoir fait reconnaître l'efficacité à ce peuple plus observateur que théoricien (*fig.* à la page 113). Il n'entre point de substances

métalliques dans la construction des tours des Chinois, pas plus que dans leurs maisons et leurs palais. L'appareil des chaînes offre donc une sorte d'enveloppe conductrice qui préserve la tour de l'introduction de l'électricité. Ces tours d'ailleurs ne sont jamais, en effet, frappées de la foudre : la fameuse tour de porcelaine de Nankin a quinze siècles d'existence.

Personne n'ignore que c'est Franklin à qui l'on doit le *paratonnerre* tel que nous le connaissons. Ses expériences pour démontrer l'identité de la foudre et de l'électricité lui suggérèrent naturellement l'idée de placer sur le sommet des édifices des barres de fer pointues, afin de soutirer des nuages l'électricité qui pourrait foudroyer ces édifices et de la diriger vers le réservoir commun, le sol, au moyen de conducteurs métalliques. Il plaça le premier qu'il fit construire, en 1760, sur la maison d'un marchand de Philadelphie. A peine installé, ce paratonnerre fut frappé par la foudre, sans causer aucun dommage à la maison qu'il surmontait, ce qui démontrait son efficacité. Cependant l'invention ne fut d'abord accueillie qu'avec une grande réserve, même par les corps savants. En Angleterre, par haine contre Franklin, l'un des citoyens qui avaient le plus concouru à faire proclamer l'indépendance des États-Unis, on repoussa sa découverte. Il en fut de même dans toute l'Europe. L'opposition aux paratonnerres était formidable de la part de tous les dévots, qui appelaient cet appareil la *verge hérétique*, parce qu'elle s'opposait aux manifestations de la colère de Dieu.

Quoique le rituel catholique conserve encore, de nos jours, des prières pour protéger de la foudre, quelques rares curés ont fait placer des paratonnerres sur les églises.

C'est en 1778 seulement qu'un gouvernement reconnut pour la première fois, d'une façon officielle, l'efficacité du paratonnerre. Ce gouvernement éclairé, libéral, fut celui de la République de Venise. La ville qui adopta avec le plus de zèle les principes nouveaux du grand Franklin fut Hambourg, alors libre et cité impériale. Peut-être était-ce un acte d'opposition contre le roi de Prusse, le trop célèbre Frédéric II, ennemi déclaré des paratonnerres. Le plus actif et le plus heureux propagateur des paratonnerres fut l'abbé Toaldo, professeur de physique à l'Académie de Padoue, l'auteur véritable du décret de la République de Venise. Cet homme illustre comprenait que les paratonnerres pouvaient servir d'instrument à l'étude des phénomènes atmosphériques.

Poussé par les mêmes sentiments, B. de Saussure introduisit les paratonnerres à Genève.

Après le roi de Prusse, Frédéric II, l'adversaire le plus étrange de Franklin fut l'abbé Nollet ; et, comme il était considéré comme un oracle

en matière d'électricité, il fit repousser l'adoption du paratonnerre jusqu'en 1782, ayant déclaré l'appareil dangereux pour la sûreté publique. Ce fut Guyton de Morveau qui fit élever, cette année-là, à Dijon, le premier paratonnerre de France.

Ce n'était point comme théologien que l'abbé Nollet s'opposait à l'introduction de la barre de fer ; c'était par amour-propre qu'il combattait l'invention d'un confrère ; il se donnait beaucoup de mouvement pour faire croire qu'il avait inventé tout ce dont on parlait. Cette rage d'avoir tout trouvé lui procura une déconvenue terriblement embarrassante.

L'abbé Nollet ne pouvait s'imaginer qu'un marchand de chiffons, garçon imprimeur, un peu apothicaire, vivant dans le pays des Algonquins, eût fait d'aussi brillantes découvertes. Aussi vint-il jusqu'à s'imaginer que Franklin n'existait pas, que c'était un personnage imaginaire inventé par ses ennemis pour le tourner en ridicule, et il publia une brochure où il les accusait d'imposture ; mais l'irascible et soupçonneux académicien ne tarda pas à se repentir d'une supposition aussi impertinente, car il s'attira une réponse foudroyante de l'Américain, qui justifia la théorie qu'il avait imaginée, en même temps qu'il démontrait victorieusement sa propre existence. Pendant quelque temps, l'abbé Nollet fut la risée de la cour et de la ville.

Un autre débat très vif accompagna la naissance des paratonnerres ; ce fut la forme à donner à ces appareils. Les tiges de fer pointues, préconisées par Franklin, avaient trouvé un adversaire décidé dans Wilson. Il reprochait à ces paratonnerres d'appeler le fluide électrique, au lieu de le détourner ; c'est pourquoi il leur donnait le nom d'instruments *offensifs*, tandis qu'ils devraient être des instruments *défensifs*. Un coup de foudre ayant fait sauter la grande poudrière de Brescia (Italie), et occasionné, dans cette cité populeuse, des désastres inouïs, un grand effroi s'empara de tous les gouvernements. L'administration de l'artillerie britannique s'adressa à Wilson, afin de déterminer la meilleure forme à donner au paratonnerre, pour que l'on mit hors de l'atteinte des catastrophes de cette nature toutes les places de guerre. Wilson proposait de remplacer les pointes des tiges par des boules et d'appliquer ces boules contre les murs depuis le faite de l'édifice jusqu'au sol. Beccaria, Franklin persistaient à défendre les paratonnerres en pointe. Le comité chargé de décider la question se composait, outre ces deux adversaires, de Cavendish, de Wathson, du bibliothécaire de la Société royale, et de Delaval, chargé de prononcer une sorte d'arbitrage scientifique au nom de la science. Malgré l'influence de la cour, la majorité du comité donna raison à Franklin, et l'affaire paraissait terminée, lorsque, le 15 mai 1777,

le bureau de la poudrière de Purfleet (Angleterre) fut frappé d'un coup de foudre qui fit quelques dégâts insignifiants. Cet édifice, situé sur une hauteur, avait été muni d'un paratonnerre à longue tige pointue. La guerre se ralluma. Wilson fit des expériences pour montrer l'exactitude de sa théorie et parvint à décider le roi George III à faire remplacer tous les paratonnerres à pointes du palais Saint-James par des paratonnerres à boules. Mais son triomphe fut de courte durée. Nairne, puis Ingenhousz démontrèrent que l'accident de Purfleet était dû à l'insuffisance d'une tige pointue de 10 pieds de hauteur seulement, et qu'il fallait multiplier les paratonnerres suivant l'étendue des édifices à garantir; et une commission de la Société royale de Londres, se déclarant encore en faveur des paratonnerres à tiges pointues, mit fin à cette querelle.

Il est certain toutefois que la question des paratonnerres est encore aujourd'hui assez mal élucidée. Depuis le rapport de Franklin, en date du 24 avril 1784, on est resté à peu près dans les mêmes errements. Aussi le public, les propriétaires surtout, se sont demandé bien souvent, en face d'accidents imprévus, si les paratonnerres étaient réellement efficaces, et même s'ils n'étaient pas dangereux. On peut répondre avec certitude qu'en effet les paratonnerres sont dangereux quand ils ne sont pas efficaces. Bien établis, ils éconduisent la foudre; mal construits, ils l'amènent dans la maison. Il vaut évidemment mieux supprimer les paratonnerres partout où l'on ne s'assujettit pas à prendre les précautions indispensables pour s'assurer de leur bon fonctionnement. L'appareil a, en effet, pour fonction d'aller chercher la foudre et de s'en débarrasser en la conduisant en dehors; s'il est mal établi, il va tout aussi exactement la chercher, mais il l'amène jusqu'à votre lit.

Cette dernière opinion cependant, partagée par un grand nombre d'hommes instruits, a été combattue par Franklin, et plus tard par M. Snow Harris. Le célèbre savant anglais a imaginé une expérience pour démontrer que le paratonnerre n'attire pas la foudre, tout en préservant du danger l'édifice sur lequel il est placé, mais au contraire la repousse.

Une plaque métallique, munie d'une pointe verticale, supporte une bouteille de Leyde chargée. La tige centrale de la bouteille se termine par une petite plate-forme sur laquelle repose, à l'aide d'une pointe, un levier horizontal qui peut ainsi tourner en restant dans un plan horizontal, ou s'incliner sur sa pointe. L'un des bras du levier sert de point d'attache à trois fils métalliques qui soutiennent un châssis métallique enveloppé de filaments de coton, et figurant un nuage électrisé positivement comme l'intérieur de la bouteille. Les filaments de coton se dressent, et le nuage, attiré par la plate-forme négative, car elle est en

contact avec la garniture extérieure, s'abaisse en faisant incliner le levier. En donnant à celui-ci un mouvement de rotation autour de sa pointe, on amène le nuage à passer sur la pointe fixée à la plaque métallique, et qui représente le paratonnerre. On voit alors le nuage se relever, et le levier reprend la position horizontale qu'il avait avant l'électrisation de la bouteille. On voit donc que les nuages orageux, attirés par le sol, se relèvent quand ils passent au-dessus des édifices protégés.

En 1823, l'Académie des sciences chargea Gay-Lussac de faire un travail sur les paratonnerres, et, dès lors, les connaissances qui ont rapport à ce sujet sont devenues populaires ; mais, depuis ce temps-là, de grands changements sont survenus, d'une part dans la science de l'électricité, d'autre part dans l'art des constructions, et l'on pourrait croire que les enseignements donnés à cette époque sont aujourd'hui trop arriérés, qu'il faut les faire passer dans le domaine de l'histoire, et les recommencer sur de nouvelles bases. Mais les sciences ne procèdent pas ainsi : elles aiment le progrès ; chaque jour elles en donnent des preuves et cependant il est rare qu'elles aient à démolir ; les agents naturels restent fidèles à leurs lois : l'action de l'électricité reste aujourd'hui ce qu'elle fut toujours, mais nous la connaissons un peu mieux ; les faits observés de notre temps sont venus s'ajouter aux faits antérieurs, sans leur porter la moindre atteinte. En 1823, la découverte de l'électro-magnétisme n'avait pas trois ans de date ; on était loin de prévoir les grands résultats dont elle devait si rapidement enrichir la science ; cependant, malgré ses progrès considérables, inespérés, l'instruction sur les paratonnerres n'a peut-être guère besoin d'être réformée, du moins dans ses principes les plus essentiels. Pour ce qui tient à la nature des constructions, c'est un élément nouveau dont il faut tenir compte ; en effet, dans un grand nombre de cas, les métaux remplacent aujourd'hui la pierre et le bois ; nos édifices deviennent en quelque sorte des montagnes métalliques, sur lesquelles les nuages orageux ont infiniment plus de prise.

Ces constructions ont rendu la surveillance des paratonnerres indispensable. La dernière instruction de l'Académie des sciences signale avec raison la nécessité de relier le conducteur avec les pièces de la charpente ; mais elle n'est sans doute pas encore assez explicite, car les accidents sont encore bien nombreux. L'établissement d'un paratonnerre nécessite des précautions minutieuses dont on n'a certainement pas tenu assez compte jusqu'ici. L'électricité passe par le chemin le plus commode. Après un orage, si la pluie qui ruisselle rend une toiture, une gouttière, une masse de fer, un tuyau de vidange aussi conducteurs que la tige métallique du paratonnerre, qui peut être accidentellement mal reliée à la nappe d'eau

souterraine, la foudre passera aussi bien par ce chemin d'aventure que par celui qui lui avait été préparé; d'où les accidents dont on pourrait citer plus d'un exemple. Le problème de la protection efficace de nos maisons est plus complexe qu'on ne le pense, et l'on ne saurait trop, dit M. de Parville, y prendre garde.

Armons nos cheminées d'une barre de fer, d'un tuyau même; relierons le tuyau aux gouttières par des lames de zinc, et il n'en faudra pas davantage pour éconduire l'ennemi. En effet, même avec un paratonnerre, le danger réside dans ce fait, bien facile à saisir, que le conducteur est quelquefois insuffisant pour laisser échapper assez vite l'électricité; le débit de ce canal artificiel est trop faible, l'électricité déborde, pénètre dans la maison, saute sur les traverses métalliques qu'elle rencontre, de là sur les poutres, même sur les casseroles de la cuisine, etc., jusqu'à ce qu'elle ait pu s'échapper par ces voies multiples. Au contraire, en prenant la toiture elle-même pour conducteur principal, le péril s'atténue considérablement. L'électricité statique ne s'écoule que par la surface et point par toute la masse du conducteur, de sorte qu'un tuyau creux, mais de grand diamètre, est, en somme, préférable à une tige pleine ou à un câble de petit diamètre. La foudre trouve un large chemin libre en suivant le tuyau métallique de la cheminée; elle peut s'écouler par les nombreux sillons métalliques qui garnissent le toit; elle arrive à la gouttière et au ruisseau. La maison a été foudroyée, mais à la surface, et les habitants sont sauvés. Le contenu peut être quelque peu endommagé, mais le contenant est sauf.

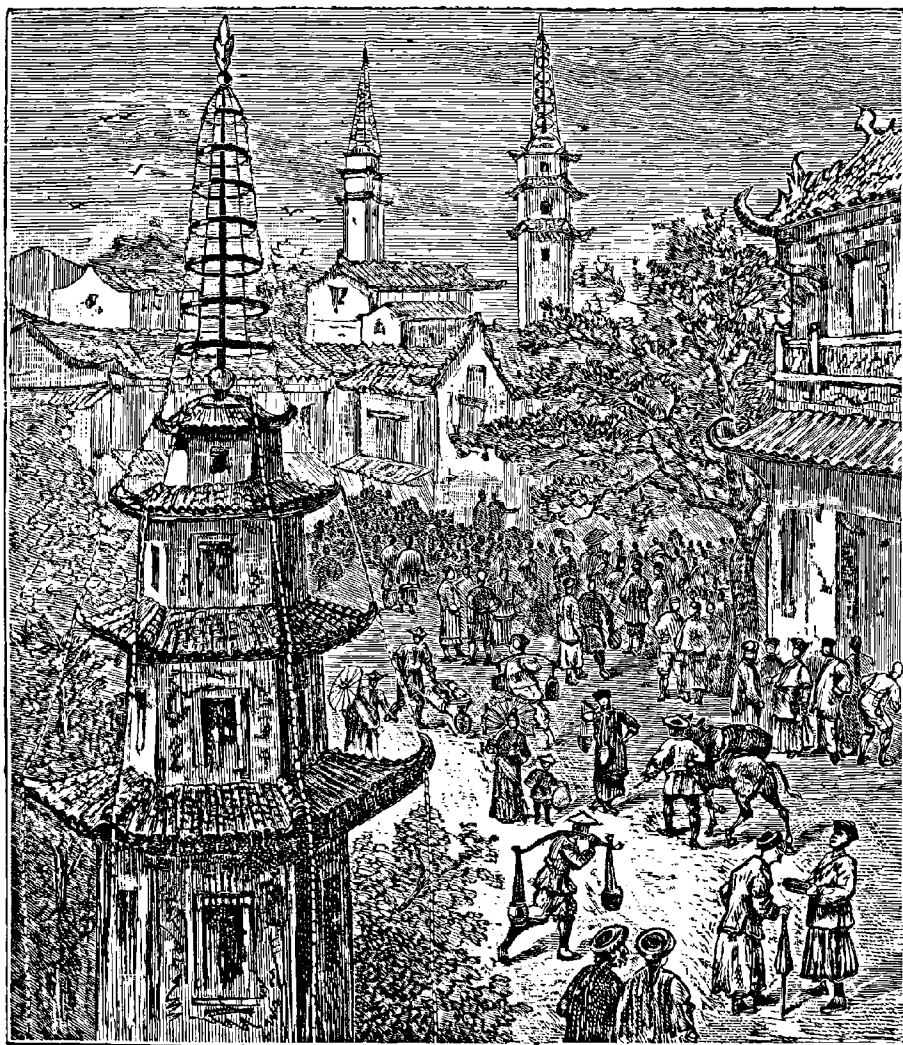
M. Melsens, reprenant une idée exprimée par Gay-Lussac dans l'instruction académique de 1823, vient de modifier profondément le système de construction des paratonnerres. On s'attache ordinairement à donner aux conducteurs qui relient les tiges de paratonnerre au sol une section d'au moins 225 millimètres; la foudre fond sans peine, en effet, des centaines de mètres de fil de fer, et il n'y a pas d'exemple qu'elle ait échauffé même au rouge sombre une barre d'un pareil diamètre. On s'imagine ainsi ménager, dans tous les cas, un écoulement certain à l'électricité. Gay-Lussac avait cependant dit, et très explicitement :

« Par économie, on pourra se servir d'un simple fil métallique, » pourvu qu'arrivé à la surface du sol, on le réunisse à une barre de 10 à 12 millimètres carrés, qui s'enfonce dans l'eau. Le fil, à la vérité, sera sûrement dispersé par la foudre; mais il lui aura tracé sa direction jusque dans le sol et l'aura empêché de se porter sur les corps environnants. »

Partant de là, M. Melsens, pour l'établissement du nouveau para-



tonnerre de l'hôtel de ville de Bruxelles (*fig.* à la page 121), supprime l'ancien gros conducteur et le remplace par toute une série de fils qui enveloppent de toutes parts le bâtiment à protéger. L'édifice est enfermé



Depuis un temps immémorial, les Chinois connaissent les paratonnerres (page 107).

dans une sorte de filet métallique; aussi l'électricité a-t-elle toutes les facilités possibles pour s'écouler. En outre, au lieu d'une seule pointe, M. Melsens en distribue un peu partout sur l'édifice, de manière à constituer une immense aigrette. Il résulte de cette disposition que l'électri-

cité, ayant au delà du nécessaire pour s'écouler, suit la voie qui lui a été créée sans dévier de sa direction et laisse intact l'intérieur de l'édifice. M. Melsens a eu soin également de multiplier les points de dérivation avec le sol. Ainsi, à l'hôtel de ville de Bruxelles, il fait communiquer son réseau protecteur avec un puits, avec le réservoir d'eau potable et avec des tuyaux de gaz. Les conducteurs aériens se réunissent dans une

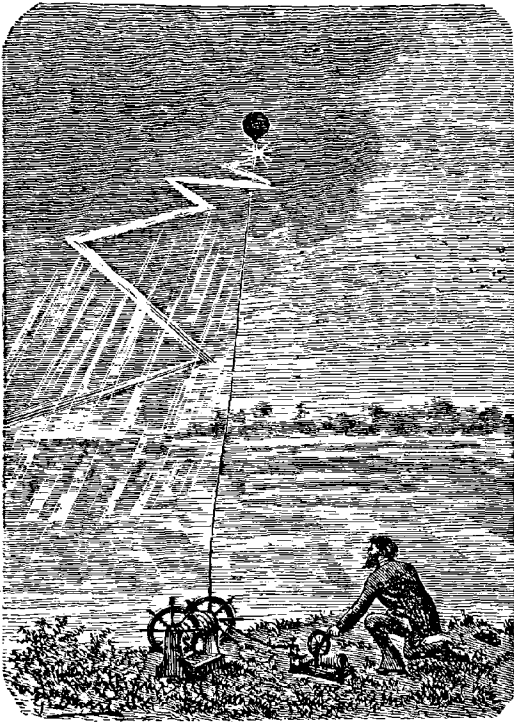


Fig. 45. — BALLON-TORPILLE.

cavité avec les conducteurs souterrains; ils sont soudés ensemble à l'aide d'un bain de zinc. Les fils souterrains présentent une section triple des conducteurs aériens. On peut, en fondant le zinc, vérifier séparément la conductibilité des deux groupes de conducteurs. Des expériences très précises ont montré à M. Melsens que tous les fils se partagent la décharge électrique, même lorsque, au lieu de faire jaillir l'étincelle sur les fils réunis, on foudroie un seul fil; l'intensité de la décharge n'est pas plus grande pour ce fil que pour les autres; l'électricité se distribue instantanément à tous les conducteurs. Il est donc à penser que le nou-

veau dispositif, s'il est rationnellement établi, protégera efficacement les édifices contre les fulgurations.

Cependant une revue scientifique autorisée, *l'Électricité*, appelle ce paratonnerre « un monument des insanités que l'exagération des principes scientifiques peut conduire à commettre, » et se rit du saint Michel qui sert de girouette au monument.

L'invention des paratonnerres a remis en question le problème d'aller chercher la foudre dans les nuages pour modifier l'état électrique de l'atmosphère, et conséquemment soit empêcher la formation de la grêle, soit détourner un orage, soit provoquer artificiellement des averses.

Dans sa *Notice sur la foudre*, Arago décrit sommairement un procédé

qui lui avait été suggéré par l'aéronaute Dupuis-Delcourt, et que M. W. de Fonvielle reprend, en le perfectionnant, dans son livre intéressant : *Éclairs et tonnerres*. Ce moyen consiste à établir des ballons captifs pourvus de pointes de fer, rattachées au sol par des fils de cuivre et mises en communication avec le réservoir commun. Évidemment l'établissement de bouées aériennes assez solides pour braver les plus terribles orages n'est point au-dessous des ressources de la science contemporaine.

D'un autre côté, un journal américain, le *Scientific American*, donnait dernièrement un dessin (fig. 45) représentant un inventeur qui envoie dans les nuages une torpille, emportée par un ballon, et à laquelle il met le feu au moyen d'une bobine de Ruhmkorff, dans le but de donner aux nuages une commotion si énergique qu'ils se résolvent en eau. Ce projet, proposé par le général Rugles, est basé sur une théorie juste, bien que son application paraisse difficile. Les explosions provoquées dans la région des nuages, dans un air raréfié, n'auraient pas la même énergie qu'à la surface du sol, et, en outre, comment maintenir un ballon captif à ces hauteurs par un grand vent? Cependant des expériences doivent être tentées.

**INSTRUCTIONS SUR LA CONSTRUCTION DES PARATONNERRES.** — Nous empruntons à ce même recueil, l'*Électricité*, quelques renseignements sur la construction des paratonnerres; quoiqu'ils soient parfois un peu en désaccord avec les instructions officielles, ils sont tout au moins plus précis. A ce titre, il nous a paru utile de les consigner ici.

« Quoi que l'on puisse dire à cet égard, il faut faire varier le diamètre des parties métalliques qui constituent un paratonnerre suivant la longueur de la tige. Voici une progression que l'expérience indique comme satisfaisante :

Jusqu'à 30 mètres.	Poids du mètre courant, si la tige est en fer,	1,200 gr.;	en cuivre,	250 gr.
De 30 à 40 —	—	—	—	—
— 40 à 50 —	—	1,520 —	—	280 —
— 50 à 60 —	—	1,580 —	—	330 —
— 60 à 70 —	—	2,280 —	—	420 —
— 70 à 80 —	—	2,660 —	—	490 —
— 80 à 90 —	—	3,040 —	—	560 —
— 90 et au delà.	—	3,420 —	—	630 —

» On peut considérer ces poids comme suffisants pour des longueurs quelconques dans lesquelles on ne peut indiquer de règle précise. Ces chiffres doivent être considérés comme indiquant des poids suffisants dans des circonstances ordinaires; mais il serait imprudent de s'en contenter dans le cas où l'on aurait à protéger des poudrières, des dépôts de pétrole, etc. Dans ce cas, il est préférable d'employer toujours du cuivre de 600 grammes. Pour des constructions impor-

tantes, du cuivre de 500 grammes suffirait ; si les maisons sont petites, on pourra se contenter de cuivre de 250 grammes. Bien entendu, il y a dans toutes ces déterminations un arbitraire assez grand dont on ne pourra se tirer sans de nombreuses observations sur les coups de foudre observés dans les bâtiments pourvus de paratonnerres ; car, chaque fois qu'un phénomène de ce genre se produit, on peut admettre qu'un vice quelconque a empêché le paratonnerre de fonctionner.

» Il est bon de rattacher les tuyaux d'eau et de gaz aux conducteurs plongés dans le sol, mais cela ne doit pas dispenser d'avoir recours à des décharges spéciales. Cependant il ne faut jamais faire cette opération sans chercher à se rendre compte de la manière dont ces tuyaux sont entourés. Il faut faire attention qu'on ne mette pas les plaques dans des citernes fermées, et qu'on ait en bonne communication une nappe aquifère qui ne tarisse dans aucune saison. Mais, dans ce cas, on peut admettre que des plaques terminales en cuivre de 2 mètres carrés de surface sont complètement suffisantes pour les maisons les plus considérables. Pour les petites maisons, il n'est jamais prudent de descendre au-dessous d'un quart de mètre carré. Lorsqu'il s'agit de protéger des édifices d'un volume exceptionnel, une attention particulière doit être donnée aux communications souterraines, mais on ne peut rédiger de règles générales. Il faut surtout s'assurer que les tuyaux de gaz qu'on prend comme conducteurs sont métalliques dans toute leur étendue, et que les plaques qui les composent ne sont pas séparées par des couches de ciment.

» On ne peut donner de règles précises pour la construction de la pointe, qui doit être construite en métal difficilement oxydable. Une des meilleures est un cône ayant 0<sup>m</sup>,02 de hauteur et 0<sup>m</sup>,01 de diamètre. Il est absurde de penser que le platine soit le seul métal susceptible de convenir.

» Le diamètre du cercle de protection est deux fois plus grand que la hauteur de la pointe. Tout l'édifice doit être contenu dans l'intérieur d'un cône vertical dont le sommet soit celui de la pointe du paratonnerre et qui soit engendré par un triangle rectangle d'environ 63° ; mais il serait encore absurde de croire que le même angle conviendrait à tous les édifices. Dans le cas des églises ou de ceux qui ne sont pas de forme compacte, il faut l'abaisser à 45°. Il faut aussi éviter avec autant de soin les points de rehaussement dans la construction de la tige souterraine que dans celle de la tige aérienne. On doit réunir soigneusement au système des paratonnerres toutes les masses métalliques qui ont un poids ou un volume considérable. Il est plus prudent de multiplier les tiges en diminuant leur élévation, que de chercher à en diminuer le nombre en les choisissant plus élevées. Mais il ne faut qu'aucune partie de l'édifice ne déborde sans que son sommet soit pourvu d'une pointe rattachée au système général de protection, même dans le cas où il ne s'agirait que d'un simple mât de pavillon.

» L'emploi des pointes isolantes est une absurdité ; il en est de même de ces pointes fantaisistes ayant la prétention d'aller chercher la foudre dans toutes les directions. Quand il est impossible d'aller rejoindre une masse aquifère, on termine les conducteurs par des plaques ayant une surface trois fois plus grande que celle qu'on leur donnerait si on pouvait les immerger dans l'eau. Dans ce cas, on

les enveloppe dans un bon lit mélangé avec du soufre de coke qui augmente dans une proportion considérable les contacts avec la terre. Si l'on emploie du fer pour les contacts souterrains, il ne faut jamais oublier de le galvaniser. Les parties métalliques d'un volume faible, comme des crampons dans une muraille, n'ont pas besoin d'être rattachées au système général; mais, s'il y en a un grand nombre dans la même partie de l'édifice, il devient urgent de les traiter comme une masse considérable, et de les rejoindre spécialement avec des conducteurs.

» Il faut s'assurer périodiquement, avant la saison orageuse, que le système de paratonnerre est en bon état. Il ne faut jamais oublier que les effets de l'électricité des orages peuvent être de deux espèces, directs ou indirects, et que ces derniers peuvent avoir toute la force des premiers. Il ne faut donc pas laisser isolé du système de paratonnerre un fil tel que celui d'une sonnerie électrique, si sa direction est parallèle à celle de la partie voisine de la tige, et si la distance est assez faible pour qu'on suppose qu'il puisse y avoir danger. A moins de circonstances bien particulières, deux ou trois mètres d'écartement suffisent.

» Les orages venant généralement du sud-ouest, c'est de ce côté que les moyens de protection doivent être plus efficaces; c'est du côté opposé qu'il convient de placer les compteurs à gaz, etc. »

A ces recommandations générales, le recueil que nous citons joint des instructions relatives à la pose des paratonnerres, lorsqu'elle présente des obstacles spéciaux tenant à des dispositions exceptionnelles. Il nous semble inutile d'entrer dans ces détails.

Il existe, d'ailleurs, des instructions officielles relatives à la pose des paratonnerres, instructions formulées en 1867 et en 1868 par une commission spéciale, présidée par M. Pouillet, approuvées par le Conseil municipal et le Conseil général de la Seine, en 1876, et qui ont force de loi. Ces instructions établissent le contrôle annuel des paratonnerres, défendent d'isoler les tiges, suppriment l'usage des pointes multiples, prescrivent des précautions fort sages pour assurer la conductibilité métallique depuis la pointe jusqu'à la nappe aquifère, et disposent que toutes les masses métalliques un peu considérables entrant dans la construction des édifices, tuyaux de décharge des eaux pluviales, conduites d'eau et de gaz, pièces métalliques de la charpente doivent être rattachées au système des conducteurs.

**ÉLECTRICITÉ ORDINAIRE DE L'ATMOSPHÈRE.** — Ce ne sont pas seulement les nuages orageux qui sont chargés d'électricité, l'air en renferme toujours, et dans toutes les saisons. Ce fut Lemonnier, dans ses observations faites en 1752, à Saint-Germain-en-Laye, puis Mazéas, en 1753, à Maintenon, puis Kinnerley, Henley et Islington, en Angleterre,

et surtout Beccaria, en Italie, qui le démontrèrent irréfutablement.

Dès 1753, Beccaria (1) avait établi sur le toit de l'église de Saint-Jean-de-Dieu, à Turin, une barre de fer, maintenue en l'air par des arc-boutants formés de substances isolantes. A une petite distance de l'extrémité inférieure de la tige ainsi disposée commençait le conducteur, qui se terminait dans l'intérieur de la terre. A l'extrémité supérieure se trouvait une pointe que l'on pouvait manœuvrer avec des cordons de soie et qu'il était possible de tourner à volonté vers le ciel ou vers la terre. Lorsque le temps n'était pas orageux, on voyait souvent passer des étincelles quand on tournait la pointe vers le ciel; mais tout effet cessait de se produire lorsqu'on la plaçait de manière qu'elle fût dirigée vers la terre. En temps d'orage, on avait toujours des étincelles, quelle que fût la position de la pointe; mais lorsqu'on la dressait vers le ciel, elles étaient beaucoup plus vives que lorsqu'on l'abattait.



Fig. 46.

ÉLECTROSCOPE  
DE SAUSSURE.

Un peu plus tard, Beccaria fit des observations analogues sur le palais Valentino, également situé à Turin, et il se mit à compter combien d'étincelles passaient dans un temps déterminé. En temps d'orage, le nombre des étincelles était si grand que l'on voyait une lueur unique et qu'on entendait une espèce de roulement continu.

Le paratonnerre interrompu de Beccaria a été récemment installé à l'observatoire de Greenwich.

Mais ce fut surtout B. de Saussure qui jeta, en quelque sorte, les bases de cette branche de la physique. Il imagina un électroscope analogue à ceux dont nous avons parlé (page 21), mais disposé d'une manière particulière. Il se compose (fig. 46) de deux fils fins de métal terminés chacun par une petite balle de sureau, et adaptés à une tige métallique fixée à la partie supérieure d'une cloche de verre. Les deux petits pendules se trouvent

(1) BECCARIA (Jean-Baptiste), savant italien qu'il ne faut pas confondre avec le marquis de Beccaria, le célèbre philosophe économiste (1716-1781), était membre de la congrégation des Clercs réguliers consacrés à l'enseignement. Il fut successivement professeur du duc de Chablais et du prince Victor-Amédée de Carignan. Arago raconte qu'un jour, officiant à la messe, au lieu du *Dominus vobiscum* qu'il devait chanter, il se mit à crier, tant il était absorbé par ses pensées scientifiques : *L'esperienza è fatta* (l'expérience est finie), ce qui provoqua son interdiction. Le résultat de ses observations a été publié en 1753 sous le titre : *Dell' Electricismo naturale ed artificiale* (Turin, in-4°).

ainsi placés dans l'intérieur de la cloche. La tige est elle-même surmontée d'un conducteur, terminé en pointe, composé de trois parties pouvant s'ajuster les unes dans les autres. Ce conducteur est destiné à recueillir de l'électricité au-dessus de la tête de l'observateur. Pour préserver l'électromètre de la pluie ou de la neige, on visse à la partie supérieure de la cloche un petit chapeau en laiton laminé fort mince, de forme conique et d'un décimètre de diamètre. Le conducteur s'ajuste également à vis sur ce chapiteau. Une échelle divisée est appliquée sur l'une des faces de la cage de verre, afin d'apprécier les angles d'écart des deux pendules. Une table donnant les écartements ou les déviations angulaires correspondant à des charges électriques déterminées fut dressée par le savant physicien, pour les instruments dont il se servit, au moyen d'observations comparatives.

Volta substitua aux fils métalliques deux petites pailles longues d'environ 0<sup>m</sup>,05 et de 0<sup>m</sup>,006 de large, suspendues à deux petits anneaux très mobiles adaptés à la tige de l'électromètre et qui sont contiguës à l'état de repos. Ces petites pailles, quand elles sont sèches, sont beaucoup plus légères que les fils de métal de Saussure, et offrent, en outre, à égalité de poids, beaucoup plus de surface, avantage précieux.

Peltier construisit aussi un électromètre très exact, et toujours comparable. Cet appareil se compose (*fig. 47*) d'une tige de cuivre AB, terminée à sa partie supérieure par une boule creuse du même métal C, de 0<sup>m</sup>,1 de diamètre, et à sa partie inférieure par une boule beaucoup plus petite B, et fixée, par l'intermédiaire de cette dernière, à une tige de cuivre qui descend dans une cage de verre, dont elle est isolée au moyen d'un tampon de gomme laque; cette tige se bifurque en formant une espèce d'anneau DD, au centre duquel se trouve une pointe *m*, destinée à recevoir une aiguille très mobile *ab*. L'aiguille *ab* est maintenue constamment dans le *méridien magnétique*, à l'aide d'une aiguille aimantée beaucoup plus petite *cd*, faisant système avec elle et attachée au-dessus

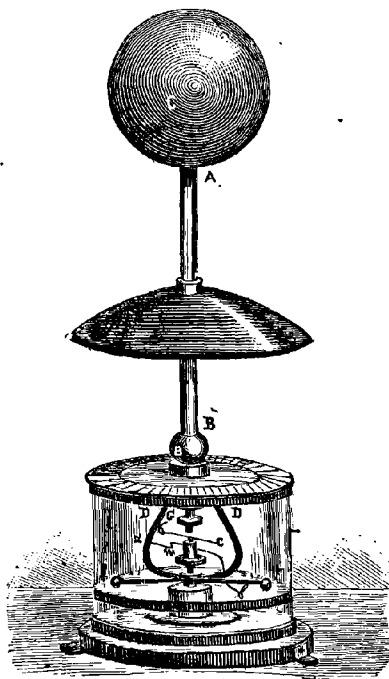


Fig. 47.

ÉLECTROMÈTRE DE PELTIER.

de la chape. Indépendamment de cette aiguille, une autre aiguille EF, également en cuivre, mais plus forte, est fixée solidement à la tige, qui descend dans un tube de verre, rempli de gomme laque et encastré dans une tablette de bois ; toute la partie métallique se trouve ainsi isolée, de sorte que la perte d'électricité doit être très faible. L'instrument est posé sur une tablette à trois pieds ou vis, à l'aide desquelles on la met horizontale. La boule B, en tournant autour du tube AB, fait descendre ou monter la partie G de la tige centrale. Quand on veut se servir de l'appareil, on élève cette partie G ; le système des deux aiguilles *cd*, *ab*, peut alors se mouvoir librement sur la pointe de la tige *m*. Quand l'instrument doit être placé au repos, on abaisse G, et le mouvement des aiguilles se trouve entravé.

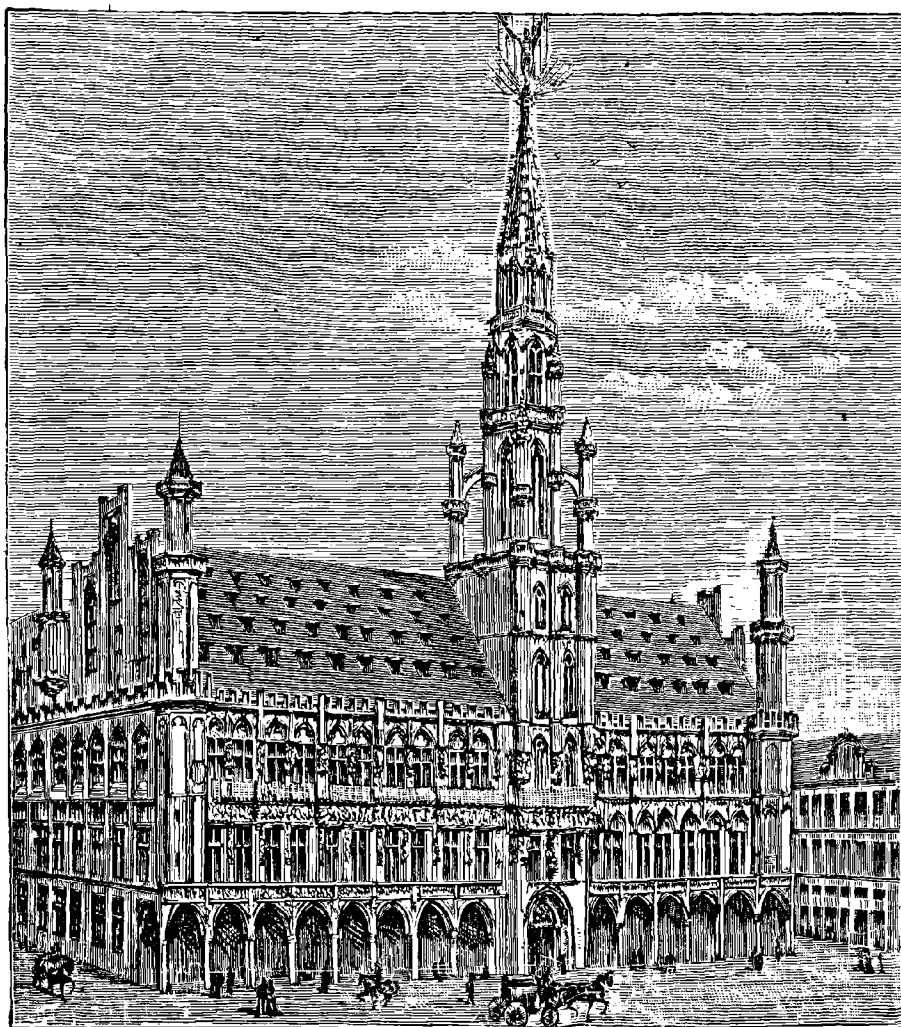
Lorsqu'on veut opérer, on oriente l'instrument de telle sorte que l'aiguille fixe EF soit mise dans le méridien magnétique ; l'aiguille mobile *ab*, qui se meut avec l'aiguille aimantée, vient se placer parallèlement à la première. La boule C se trouve-t-elle au-dessous d'un corps électrisé positivement ou négativement, il y a action par influence : dans le premier cas, l'électricité négative, provenant de la décomposition de l'électricité naturelle, est dissimulée à la partie supérieure de la boule, et l'électricité positive est refoulée dans la partie inférieure de l'instrument, et fait dévier l'aiguille mobile *ab* d'un certain nombre de degrés, mesurés au moyen de deux cercles divisés, dont l'un est collé sur la tablette, et l'autre sur le disque supérieur de la cage en verre. Cet appareil accuse, dans cette hypothèse, l'action d'influence exercée par le corps électrisé chargé positivement ; mais on peut charger négativement l'aiguille en touchant le bouton avec le doigt et retirant le corps électrisé. En opérant avec un corps électrisé négativement placé à distance, on charge par influence l'appareil d'électricité positive.

De nombreuses expériences, exécutées avec l'un ou l'autre de ces instruments, il résulte que l'air est généralement électrisé, plus ou moins, soit positivement, soit négativement. Cela peut arriver, même à un très haut degré, avec un ciel serein et clair. M. Figuiet rapporte les faits suivants qui le constatent.

« Un lieutenant du génie, étant en marche de Blidah vers Alger, vit, pendant un coup de siroco, chaque bouffée de vent faire jaillir des étincelles de la frange de ses épaulettes. D'autre part, des officiers se promenant tête nue sur la terrasse du fort Bab-Azoum, à Alger, chacun, en regardant son voisin, remarqua avec étonnement de petites aigrettes lumineuses aux extrémités de ses cheveux qui étaient tout hérissés. Quand les officiers levaient les mains, des aigrettes se formaient au



bout de leurs doigts. En rappelant ces faits, M. L. Amat dit que le corps humain, comme celui des animaux, n'a pas le même état électrique que l'atmosphère et que d'autres corps environnants. De plus, il faut distinguer, sous le rapport de la



Système de paratonnerres à l'Hôtel de ville de Bruxelles (page 114).

conductibilité électrique, entre les animaux et la matière organique, comme la soie, les cheveux, les poils, les ongles, la corne, etc. Ces substances, presque toujours sèches, donnent des signes d'électricité quand on les frotte, tandis que la matière vivante, le *protoplasma*, rendu demi-fluide par son eau d'imbibition, n'en

peut fournir. Un chat rasé, dont on frotte la peau dénuée de poils, ne donne plus d'étincelles.

» M. L.-Amat, qui habite dans la région située au delà du 35° degré de latitude, a constaté des faits analogues aux précédents, mais plus concluants encore en faveur de l'intensité d'action de l'électricité atmosphérique. Il lui est souvent arrivé, sans s'isoler du sol, de faire jaillir de larges étincelles en passant un peigne de poche à travers ses cheveux ou sa barbe, presque toujours secs. Les conditions les plus favorables à la production de ces effets étaient un temps sec et chaud, le retour d'une longue course dans les plaines arides ; le moment le plus propice était le soir de sept à neuf heures. Dès que les poils étaient un peu humides, ou le temps légèrement couvert, ils ne produisaient pas d'étincelles ni de crépitations.

» Les animaux, en particulier les chevaux, présentent, à un plus haut degré que l'homme, le pouvoir de manifester des phénomènes électriques. Les membres de la commission scientifique du Mexique ont fait la remarque que, sur les hauts plateaux de l'Amérique du centre, les poils, ainsi que les crins des chevaux, dégagent des étincelles sur le passage de la brosse ou de l'étrille. Dans le sud de l'Algérie, pendant les chaudes et sèches journées d'été, on voit, sur les chevaux arabes, de longs crins diverger du centre de la queue, à la manière des filaments d'un balai qui seraient déviés en éventail. Pour peu que l'on caresse de la main la queue d'un de ces chevaux, on entend une série de petites crépitations dues au pétilllement des étincelles, imperceptibles pendant le jour, mais évidentes à la nuit close. L'électricité dégagée par la queue des chevaux est positive. Après une petite pluie ou pour peu que le sol soit humide, la tension électrique n'est pas aussi considérable. Dans les écuries, elle est moins sensible qu'au grand air.

» Il résulte des observations de M. L. Amat que, dans les contrées tropicales, les phénomènes électriques de la couche d'air avoisinant le sol sont plus accentués que dans les régions tempérées. »

Un Anglais, M. Crosse, de Bromfield, a grandement contribué à faire connaître l'état électrique de l'atmosphère. Son appareil se compose de plus de 1,500 mètres de fil métallique isolé, mettant en communication des paratonnerres élevés sur des mâts de 30 mètres de hauteur. Il résulte de ses expériences que l'électricité atmosphérique a une variation journalière périodique, comme la mer, et qu'elle va en augmentant et en décroissant deux fois en vingt-quatre heures. Généralement l'électricité atmosphérique est positive, surtout quand le temps est beau ; mais, pendant le passage de certains nuages, l'appareil donne souvent des signes d'électricité négative. On possède d'ailleurs de nombreuses observations, qui, comme celles de M. Crosse, arrivent aux résultats suivants :

1. L'électricité atmosphérique est toujours positive ; elle augmente à partir du lever du soleil ; diminue vers midi ; augmente de nouveau vers

le coucher du soleil et décroît alors jusqu'à la nuit, pendant laquelle elle recommence à croître.

2. L'état électrique de l'appareil est influencé par le brouillard, la pluie, la grêle, le grésil et la neige. Il est négatif quand ces météores commencent, et passe fréquemment au positif, avec des changements continuels, toutes les trois ou quatre minutes.

3. Les nuages, quand ils approchent, influencent l'appareil de la même façon et produisent une rapide succession d'étincelles dans le conducteur isolé, de telle sorte qu'il passe dans la boule un courant d'électricité qu'il est prudent de faire écouler dans le sol. Des effets aussi puissants accompagnent fréquemment le passage d'un brouillard ou d'une forte averse.

#### INFLUENCE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE SUR LA VÉGÉTATION.—

Au milieu du siècle dernier, quelques physiciens distingués entreprirent, dans des pays différents, des expériences relatives à l'accroissement des végétaux sous l'action de l'électricité. L'abbé Nollet, en France, Jallabert, à Genève, un peu plus tard, Duhamel du Monceau, s'appuyant sur les observations de Nollet et de Lemonnier, émirent l'opinion que l'électricité atmosphérique exerce une action favorable sur le développement des plantes. Nunoberg, de Stuttgart, expérimenta sur les oignons, et affirma que tous ceux qui avaient été électrisés se développaient plus rapidement que ceux venus dans des conditions ordinaires. En 1783, l'abbé Bertholon publia de nouvelles recherches sur l'action de l'électricité de l'atmosphère sur les plantes, et chercha les moyens pratiques de l'appliquer à l'agriculture; il inventa même un électro-végétomètre destiné à soutirer l'électricité de l'atmosphère et à la répandre sur les substances végétales. Ces travaux, malgré leur nombre, ne furent pas décisifs et ils tombèrent bientôt dans l'oubli. Les recherches à ce sujet ont été reprises, il y a quelques années, par M. Graudeau, qui fit des expériences comparatives à Nancy, sur des végétaux placés à l'air libre, et d'autres placés sous des cages métalliques destinées à les soustraire à l'action de l'électricité atmosphérique. Il avait pu tirer de ses expériences des conclusions qui semblaient définitives; mais répétées, à la même époque, par M. Naudin, à Antibes, c'est-à-dire dans un climat tout à fait différent, des expériences analogues ont donné des résultats absolument contradictoires.

Cependant on vient de faire récemment, près de Palerme, de nouvelles expériences relativement à la végétation de la vigne. Seize pieds ont été soumis à l'action d'un courant électrique à l'aide d'un fil de cuivre inséré par une pointe de platine dans l'extrémité de la branche à fruits,

tandis qu'un autre fil reliait l'origine de la branche avec le sol. L'expérience a duré d'avril à septembre. L'accroissement de la végétation fut nettement mis en évidence : le bois des branches mises en expérience contenait moins de matières minérales et de potasse que celui des autres pieds, tandis que le contraire eut lieu pour les feuilles dans lesquelles la potasse était surtout sous forme de bitartrate; le raisin recueilli sur ces branches fournissait plus de moût et contenait plus de glucose et moins d'acide.

M. Werner Siemens, le célèbre électricien, vient d'envisager l'action de l'électricité d'une autre manière, rapporte le journal l'*Électricité*, et il a exposé, le jeudi 5 mars 1880, à la Société royale d'horticulture de Londres, le résultat d'observations faites à un point de vue auquel personne n'avait encore songé, quoiqu'il fût fort important. En effet, il a eu l'idée d'examiner l'action que l'électricité peut exercer comme source de lumière, et il est arrivé à des résultats miraculeux. Le mode d'expérimentation est bien simple; il consiste à soumettre des plantes à l'action d'un éclairage électrique remplaçant d'une façon absolue la lumière du soleil. L'expérience a constaté que la lumière électrique suffit amplement pour provoquer les actes de la végétation qui ont le plus besoin de la lumière du soleil, comme la production de matières colorant les plantes en vert, ou l'épanouissement des fleurs. Non seulement le célèbre électricien a pu présenter à ses auditeurs des plantes qui avaient végété loin de la lumière du soleil et qui présentaient l'aspect de plantes ordinaires, mais il lui a été possible de forcer une tulipe à s'épanouir devant ses auditeurs émerveillés. Il est vrai que déjà quelques résultats partiels analogues avaient été obtenus à l'aide de la lumière Drummond, placée à distance convenable, et les ouvrages de physiologie végétale en font mention; mais c'est la première fois qu'on a osé émettre l'idée de suppléer artificiellement au défaut de la lumière aussi radicalement qu'au manque de chaleur.

M. Werner Siemens a exécuté une expérience plus curieuse encore en soumettant des plantes successivement à l'action de la lumière électrique et de la lumière solaire, de sorte qu'elles vivent dans un jour perpétuel. Ces plantes, dont le sommeil a été supprimé et la végétation ininterrompue, ont eu un développement merveilleusement rapide. Il semble indubitable que désormais la lumière électrique devra être combinée avec la chaleur et les engrais pour faire rendre à la culture forcée des résultats prodigieux.

Dans un autre ordre d'idées, M. Berthelot a cherché quelle pouvait être l'influence des effluves électriques pour fixer l'azote atmosphérique sur les matières organiques. Les résultats n'ont pas été jusqu'ici complè-

tement concluants; il y a là des expériences à tenter à nouveau. Et cependant quel immense arsenal de forces utiles à l'agriculture que cet océan aérien qui enveloppe le globe! La vie est limitée, sur la terre, par la quantité de matières susceptibles d'être organisées que le sol possède. Les végétaux ont notamment besoin, pour se développer, de grandes quantités de matières azotées qui ne sont distribuées dans la terre, les eaux et l'air, qu'avec parcimonie, les autres principes utiles étant suffisamment répandus dans la nature. Le jour où l'électricité aura pris l'azote à l'air pour le donner à la plante, elle aura résolu le problème de la multiplication indéfinie des êtres vivants; on ne pourra plus craindre que notre planète soit réduite, dans les âges futurs, à l'état de squelette impuissant à nourrir ses habitants. La solution est-elle impossible? Il est interdit de le dire. En effet, Cavendish a réussi, en 1784, par une expérience célèbre, à produire de l'acide nitrique par l'action de l'étincelle électrique traversant l'air confiné enrichi d'oxygène. La foudre agit de même: M. J.-A. Barral a pu démontrer, par de nombreuses analyses, la permanence du nitrate d'ammoniaque dans les eaux pluviales, présence précisément due à l'action des éclairs ou du tonnerre sur l'oxygène, l'azote et la vapeur d'eau de l'atmosphère, ainsi que M. Boussingault en a émis l'opinion dès 1839. Mais quand on songe aux faibles quantités de nitrate d'ammoniaque produites par les immenses éclairs sillonnant les couches profondes des espaces aériens, on est effrayé de la difficulté du problème qui consisterait à imiter la nature pour fabriquer électriquement du nitrate d'ammoniaque. Néanmoins, il ne faut plus aujourd'hui douter du pouvoir de la science.

**ORIGINE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.** — Les hypothèses relatives à la production de l'électricité atmosphérique sont nombreuses: le frottement des couches d'air contre le sol et entre elles, les phénomènes chimiques, l'évaporation de l'eau des mers, la distribution de la chaleur dans l'atmosphère et dans la terre, et l'inégale température des couches terrestres depuis la surface du globe jusqu'à la limite de l'atmosphère et même depuis le centre de la terre jusqu'aux dernières couches gazeuses, tout cela contribue sans doute à la production de l'électricité, mais dans un sens et une mesure qui ne sont point encore bien déterminés par l'expérience.

**GRÊLE.** — Outre la foudre, quelques météores, la *grêle*, le *verglas*, les *trombes*, ont évidemment une origine électrique.

La *grêle* est un amas de petits globules de glace, qui, ordinairement

au printemps et dans l'été, au moment le plus chaud de la journée et par des pluies d'orage, tombent de l'atmosphère. Ces petits globules, appelés *grêlons*, sont formés d'un noyau neigeux, entouré de couches concentriques de glace qui se sont formées successivement. Ces grêlons, dont la grosseur est généralement celle d'une noisette, ont quelquefois un volume beaucoup plus gros et l'on en a vu pesant de 200 à 300 grammes, et même davantage. Les nuages qui les portent sont peu élevés, d'une couleur grise ou roussâtre et répandent une grande obscurité; on entend dans leur intérieur un bruissement caractéristique que l'on peut comparer à celui d'un sac de noix qu'on agite.

Pour expliquer la formation des grêlons et comment des corps d'un poids aussi considérable se soutiennent dans l'air, Volta avait recours à une hypothèse, dont l'expérience de la *grêle électrique* (*Électricité*, p. 67) donne une idée. Il admettait que les grêlons, placés entre deux couches de nuages électrisés l'un positivement, l'autre négativement, vont d'un nuage à l'autre alternativement, et qu'ainsi les particules de glacé, d'abord très petites, se chargent successivement, pendant ce trajet, de couches de plus en plus épaisses de glace jusqu'à ce que, devenues trop lourdes, elles finissent par tomber sous forme de grêlons.

Cette théorie, soutenue et développée par Peltier, qui explique pourquoi les grêlons sont formés de couches concentriques et présentent quelquefois au centre des particules solides, fut longtemps admise; mais elle ne soutient pas un examen sérieux; car, dès que les grêlons ont pénétré dans le nuage inférieur, il n'y a pas de raison pour qu'ils s'élèvent de nouveau, puisqu'ils sont soumis à des forces répulsives dans tous les sens. Aussi de nombreuses études sont-elles dirigées aujourd'hui pour donner une théorie satisfaisante.

On est porté à admettre, d'après les idées de M. Faye, présentées dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* et dans de nombreuses communications à l'Académie des sciences, que tous les orages sont dus à ce que l'on appelle un *mouvement tournant*, un *mouvement giratoire*; ce serait à ce mouvement lui-même qu'il faudrait attribuer la suspension des grêlons dans l'atmosphère, et le bruit que l'on entend avant leur chute serait dû aux chocs qui résultent de leurs mouvements.

De l'expérience de M. G. Planté, que nous avons décrite (*Électricité*, page 95), ressort une explication plausible de la formation des grêlons. Si, au lieu de rencontrer une couche profonde de liquide, le courant ne rencontre qu'une surface humide, telles que les parois mêmes ou le fond incliné du vase contenant le liquide, les effets calorifiques prédominent, des sillons lumineux irréguliers se développent, et l'eau est rapidement

transformée en vapeur. N'est-il pas naturel de penser, dit M. de Parville, que des effets analogues doivent se produire au sein des nuages orageux traversés par de violentes décharges électriques? Suivant la densité plus ou moins grande de ces conducteurs humides, suivant la *quantité* du flux électrique en feu, les effets mécaniques ou calorifiques de l'électricité peuvent prédominer; l'eau est *pulvérisée* ou *réduite en vapeur*. Quand ces phénomènes se produisent dans les régions froides de l'atmosphère, les globules aqueux et la vapeur peuvent être congelés instantanément, et l'on conçoit ainsi, d'une manière nouvelle, le mode de formation de la grêle.

M. Colladon, savant physicien de Genève, depuis longtemps préoccupé des théories de M. Faye, théories par lesquelles on explique également les trombes, s'est livré à de nombreuses observations qui l'ont conduit à formuler une théorie nouvelle de la formation de la grêle, qui compte de nombreux partisans. Il admet, rapporte M. Figuiet, que les causes de la grêle peuvent et doivent même être multiples, et que, dans plusieurs cas, les idées de M. Faye peuvent donner une explication assez plausible de ces grands orages de grêle, en quelque sorte exceptionnels, qui cheminent en ligne droite avec une vitesse de 15 ou 20 lieues par heure. Mais, en même temps, on ne peut se dissimuler que les démonstrations expérimentales font défaut à cette théorie. Celle proposée par M. Colladon pour expliquer la formation des grêlons est essentiellement basée sur ce que l'on a désigné quelquefois sous le nom de *vent de pluie* ou *vent de grêle*; mais sa nouveauté repose sur la manière dont il conçoit que l'équilibre se rétablit à chaque instant par de nouveaux appels d'air, indispensables pour combler les dépressions qui résultent de ces vents verticaux descendants.

Les pluies d'orage et les colonnes de grêle produisent, par l'effet même de leur chute, un vent vertical, dû à l'entraînement de l'air de haut en bas par la vitesse, d'abord accélérée, puis uniforme, qu'acquièrent les gouttes de pluie, ou les grêlons, comme on le constate aussi près des cascades, et comme on le voit dans les appareils soufflants appelés *trompes*. Ce vent vertical, qui chemine du nuage jusqu'au sol, laisse nécessairement derrière lui une forte dépression qui *doit se manifester, DANS LE NUAGE MÊME, aux points où s'engendre la pluie ou la grêle, et produire en ces points une aspiration ou un appel permanent d'air pendant toute la durée de l'orage*. M. Colladon fait observer avec raison que la vitesse de chute de la pluie ou de la grêle est d'abord accélérée à son origine, et qu'elle devient uniforme au bout de peu de secondes par suite de la résistance de l'air. L'aspiration se produit essentiellement pendant que la vitesse s'accélère.

Cette théorie semble s'adapter très bien au grand nombre des cas où la grêle est générale ou partielle, à ceux en particulier où elle se reproduit plusieurs fois à courts intervalles. Elle explique les agitations violentes et désordonnées de l'air près du sol, le renouvellement incessant de l'électricité dans les nuages qui surmontent les chutes de grêle, l'existence de gros grêlons en été et leur extrême rareté en hiver. Le vent d'orage vertical se trouve être en même temps la cause et l'effet de ces deux résultats connexes, qui se proportionnent en quelque sorte l'un à l'autre, et on peut comprendre la longue durée de quelques cas de grêle sans mouvement de translation rapide. Ainsi que M. Colladon l'a énoncé dans les notes adressées en 1878 et 1879 à l'Académie des Sciences, certaines nuées orageuses, lors même qu'elles paraissent former un tout dense et continu, sont, en réalité, des centres ou des groupes partiels formés d'éléments bien distincts, et isolés les uns des autres quant à leur état électrique. Cette disposition singulière et le nombre prodigieux d'éclairs qui peuvent se succéder dans un même groupe de nuages, pendant quelques heures, sans que leur tension soit épuisée, ne se comprennent qu'en admettant que les parties supérieures de ces nuages reçoivent un flux constant d'air sec et froid, fortement électrisé et pouvant être mélangé d'aiguilles de glace ou de gouttes à l'état de surfusion (*Chaleur*, p. 538). Cet air est évidemment appelé par la forte dépression que produit dans ce groupe, vers ses parties centrales ou inférieures, le départ des gouttes de pluie ou des grêlons qui vont rejoindre le sol. Ce flux d'air supérieur, en traversant les nuées orageuses, tend à les diviser en plusieurs parties, isolées électriquement les unes des autres. C'est ainsi que ce groupe de nuages ne constitue plus un conducteur unique, mais un grand nombre de conducteurs où se manifestent des séries de décharges réciproques. Dès que l'on admet ce fait, qui paraît indubitable, que *la dépression de l'air doit être la plus forte très près des points qui donnent naissance aux gouttes de pluie et aux grêlons*, on doit admettre, comme conséquence nécessaire, que les couches d'air appelées pour remplir ce vide partiel sont celles qui se trouvent les plus voisines, et, par conséquent, celles qui sont placées immédiatement au-dessus du groupe orageux. En effet, leur plus grande distance doit rarement dépasser quelques centaines de mètres, tandis que les colonnes de grêle ont parfois, dans le sens horizontal, une longueur et une largeur de plusieurs kilomètres; un appel d'air latéral serait, dans ce cas, plus difficile.

**VERGLAS.** — Nous n'avons point parlé du *verglas*, en traitant de la neige et du grésil (*Chaleur*, p. 635), quoique généralement on explique



ce phénomène par la congélation de l'eau de la pluie sur les corps *plus froids* placés à la surface de la terre; car il est évident aujourd'hui que cette explication n'est plus suffisante. En effet, dans de nombreux cas



Cyclone de Nouméa (page 131).

observés, et notamment dans le verglas de janvier 1879, à Paris, on a pu remarquer une croûte épaisse se formant progressivement sur les parapluies, sur les vêtements des personnes qui sortaient d'appartements chauffés. Pour expliquer le phénomène, il faut admettre que les gouttes

d'eau étaient à l'état de *surfusion*, c'est-à-dire liquides, bien qu'à une température très inférieure à zéro. La rencontre des corps solides devait produire la solidification de l'eau à l'état de surfusion, au moment où elle se répandait en couche mince à la surface de ces corps.

M. Colladon donne l'explication du verglas de janvier en le rattachant à la théorie précédente sur la formation de la grêle. La congélation de la pluie, les 22 et 23 janvier 1879, peut s'expliquer, selon lui, par la formation rapide de volumineux grêlons au sein de l'atmosphère refroidie. Comme nous l'avons dit ci-dessus, les nuages orageux sont composés de parties les unes positives, les autres négatives, séparées par de petits espaces isolants, et comme la hauteur de ces groupes de cumulus est ordinairement de quelques kilomètres, on peut admettre que les grains de grêle, pendant leur chute, sont alternativement ballottés d'une partie de nuage à une autre par une série de zigzags, pendant lesquels leur volume tend à s'accroître par la rencontre alternative, soit de gouttes d'eau glacée à l'état de surfusion, soit des parties neigeuses formées de petits cristaux de glace. Ce sont ces dernières, pense M. Colladon, qui, tombant à la surface de la terre, dans des circonstances assez rares, produisent le verglas.

La théorie de M. Colladon pourra être diversement accueillie, ajoute M. Figuiet, mais elle prouve que le phénomène du verglas ne peut plus s'expliquer par la théorie qui a cours dans la science, et que cette théorie réclame impérieusement de nouvelles recherches.

**TROMBES.** — Les trombes sont des colonnes de vapeur plus ou moins contournées et inclinées qui vont des nues à la terre ou à la mer et qui sont animées d'un mouvement giratoire rapide, ainsi que d'un mouvement de translation. La plupart du temps elles ont la forme d'un cône, dont la base est le plus souvent dirigée vers les nuages, le sommet vers la terre; mais quelquefois le cône est dans une position inverse. Ces amas de vapeurs font entendre un bruit semblable à celui d'une charrette courant sur un chemin rocailleux. Les éclairs et les globes de feu que lancent souvent les trombes, le bruit du tonnerre qui les accompagne, montrent que l'électricité n'est pas étrangère à la cause de ces redoutables météores.

On distingue deux espèces de trombes : les unes *terrestres*, les autres *marines*. On les appelle *cyclones* ou *tornados* dans l'océan Indien et *typhons* dans les mers de Chine.

L'observation des *trombes terrestres* est beaucoup plus difficile que celle des trombes marines, parce que, quand ces trombes éclatent, l'air est

rempli de poussières ; généralement elles tourbillonnent en sens inverse des aiguilles d'une montre, et les corps légers semblent attirés par les nuages, car ils s'élèvent tellement haut qu'ils disparaissent.

Nous citerons quelques exemples récents de l'un et de l'autre de ces météores effroyables, qui d'ailleurs sévissent plus souvent dans le nouveau monde que dans l'ancien.

Le 24 janvier 1880, un terrible cyclone a sévi dans la Nouvelle-Calédonie, à Nouméa (fig. à la page 129). Il commença par agiter les vagues de l'Océan et à secouer furieusement les navires en rade. Il passa ensuite sur le rivage. Jusqu'à 2 h. 30 de l'après-midi la tempête alla croissant, atteignant les dernières limites de la furie. Les toits des maisons, qu'ils fussent en tôle ou en tuiles, volaient au loin, menaçant, dans leur parcours violent, la vie des personnes qui, affolées, cherchaient des abris. Tous les bâtiments publics ont été détruits ou ont plus ou moins souffert... L'aspect de la ville est navrant... La mer était déchaînée par la tempête, qui déjouait la sécurité pourtant exceptionnelle de la baie de la Moselle et de nos deux rades, si merveilleusement abritées. Les habitants, anxieux, semblaient oublier leur propre ruine pour suivre du regard les bâtiments qui soutenaient une lutte impossible contre la tempête. Le *Gladiateur*, cotre du pilotage, sombra l'un des premiers, entraînant avec lui deux matelots-pilotes, trois matelots indigènes et un enfant. Le *Dumbea* coulait aussi avec trois matelots de l'État qui n'ont pas reparu. Le cotre le *Bouraké* disparaissait à son tour avec deux hommes de son équipage. Les goélettes l'*Étoile du matin*, le *Nouméa* et l'*Espérance*, et les cotres *Agnorina* et la *Planète* disparaissaient aussi ou allaient à la côte sans qu'il fût humainement possible de leur porter secours.

Le 11 avril 1878, une trombe épouvantable a ravagé Canton et ses faubourgs ; plusieurs villages ont été absolument détruits et plus de dix mille personnes ont perdu la vie dans ce sinistre.

La même année, le 13 mai, une trombe s'est abattue dans le département de la Vienne, par la vallée de la Charente, puis par celle de la Bouleuse, et a causé d'épouvantables désastres, sur le chemin qu'elle parcourait avec une vitesse de 44 mètres par seconde, ce qui correspond à la pression énorme de 220 kilogrammes par mètre carré. Le 24 mai, une seconde trombe désolait deux communes situées entre Strasbourg et Bischwiller, celles de Gambshheim et d'Offendorf.

C'est au lieu dit *Bruckmatt*, rapporte le *Journal d'Alsace*, que la trombe a surtout exercé sa fureur (fig. à la page 137) ; toute cette partie du village a l'air d'avoir été détruite par un bombardement ou par l'explosion d'une poudrière. Les maisons sont éventrées, effondrées ; tous les toits ont été jetés à terre. Mais, ce qui est indescriptible, c'est l'aspect des jardins bouleversés de fond en comble. Les

plus gros arbres ont été déracinés, retournés, transportés quelquefois à une distance considérable ; les branches ont été hachées, comme par de la mitraille ou comme par une forte grêle. Tel verger forme aujourd'hui un fourré épais d'arbres entrelacés, que l'on n'est pas parvenu à débayer plusieurs jours après le désastre. Dans certains endroits, les effets de l'action circulaire de la trombe sont très visibles : dans un jardin, tous les arbres couchés à terre convergent vers un centre, les têtes se touchent et les racines sont à la circonférence; le tourbillon a en quelque sorte dessiné là sa figure. En sortant d'Offendorf, la trombe s'est dirigée vers le Rhin ; elle a détruit encore sur son passage quatre-vingt-six arbres fruitiers, situés sur un terrain communal, le long d'une route, sans toucher à des saules placés à côté, mais en contre-bas. Elle a encore arraché un gros peuplier sur la ligne extérieure, l'a emporté par-dessus un bras d'eau et l'a fiché dans un banc de gravier, au bord même du Rhin. La trombe a dû se perdre alors au milieu du fleuve, car on n'a signalé aucune trace de son passage dans le grand-duché de Bade. Un batelier a affirmé avoir vu la trombe atteignant le fleuve et le traversant; au milieu du passage, il vit, dit-il, l'eau s'élever en l'air puis retomber avec fracas: tout avait disparu.

Citons encore les trombes qui ont parcouru le Missouri (États-Unis d'Amérique) le 21 avril 1880. La première, la trombe de Marshfield, était l'avant-coureur d'une trombe de dimensions plus considérables qui a ravagé la vallée de Firley-Creek. Cette dernière a laissé derrière elle un sillon de désastres comparable à celui qui a traversé la France de part en part en 1783, et que l'Académie d'alors a fait étudier. Suivie pendant une longueur de 450 kilomètres, cette bande de terre ravagée avait une largeur moyenne qui ne dépassait pas 300 mètres, quoiqu'elle en eût plus de 1,000 en certains endroits. La trombe de Marshfield n'a étendu ses ravages que sur une longueur de 110 kilomètres, mais sa largeur moyenne fut de 500 mètres environ. Elle a été accompagnée de la production d'une troisième trombe de dimensions moindres qui a passé au nord-est de Jefferson-City. Elle paraît être sortie d'un tourbillon de poussière qui n'a produit aucun phénomène destructeur et qui tournait en sens inverse des aiguilles d'une montre. Mais tout le long de la route qu'elle a suivie, les arbres arrachés par un mouvement spécial étaient jetés à terre dans cette même direction. Aussi, quoiqu'on n'ait point entendu un seul coup de foudre, faut-il regarder l'origine électrique de ce météore comme incontestable. La trombe elle-même doit être considérée comme un mode de décharge, employé par l'électricité et d'une façon très violente. En effet, la surface ravagée possède une étendue à peu près égale à celle de Paris; une ville qui se trouvait sur son passage (Marshfield) a été entièrement détruite, et près de soixante personnes y perdirent la vie. Tout le long de la route de

cette trombe, on a pu apercevoir un nuage de forme circulaire, blanc au milieu et noir sur les bords, d'où sortait le tube. Quelques observateurs ont pu regarder dans l'intérieur de ce tube ; ils prétendent que la couleur était plus claire que celle de l'extérieur, comme si sa surface était le siège d'une sorte de phosphorescence. Quant à la matière de la nuée elle était

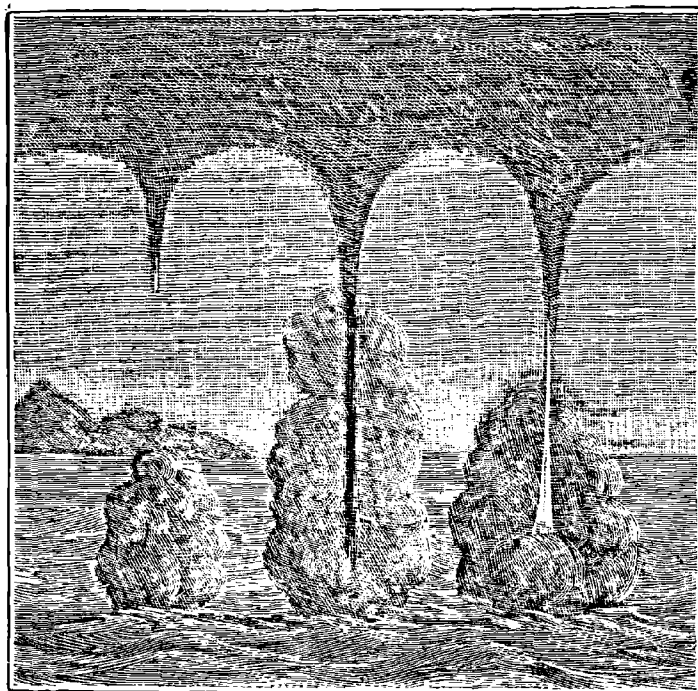


Fig. 43. — THÉORIE DES TROMBES.

animée d'un mouvement convulsif, comme si elle montait et descendait constamment en obéissant à des attractions d'une intensité variable à chaque instant.

On pourrait hésiter à reconnaître, dans ces immenses phénomènes, l'analogie du vent qui sort des pointes du tourniquet (*Électricité*, page 67). Mais n'y a-t-il pas une différence aussi formidable entre l'étincelle électrique qui se montre dans les machines ou dans les bouteilles de Leyde et dans les grands éclairs?

Cependant il importe de dire quelques mots des diverses hypothèses qu'on a données pour expliquer le mode de formation de ces météores, et dont les principales peuvent être groupées en quatre séries :

La première série comprend les vents intérieurs dans les nues qui les entraînent en s'échappant et forment ainsi la trombe (auteurs : le Père

Touchard, l'abbé Richard, Hartoocker, Duhamel, Page, etc.); la seconde série les ferait venir des feux souterrains ou des éruptions (Lémery, Buffon); la troisième les attribuerait à de grandes perturbations dans l'air ou à la rencontre des vents contraires qui se résolvent en tourbillons (Suard, Andocque, Franklin, Parkins, Lamarck, Volney, CErsted, etc.); la quatrième enfin reconnaîtrait pour cause principale des trombes l'électricité (Beccaria, Wilkinson, Brisson, Lacépède, Th. Yonne, Garin, Inglis, Le Prédour, de Tessian et Peltier (1).

La première et la deuxième explication étant abandonnées, il n'y a pas lieu de s'y arrêter. Relativement aux deux autres, il est impossible de se rendre un compte bien exact du phénomène par une des hypothèses admise à l'exclusion de l'autre. Il faut faire ici de l'éclectisme, et se ranger à l'opinion de M. Becquerel qui, ne trouvant pas dans l'influence électrique une explication suffisante, pense qu'il faut laisser aux vents ou tourbillons une part active dans la production de ce phénomène.

Dans cette théorie, le tourbillon joue le principal rôle, et pourtant il n'est lui-même que l'effet d'une cause première qui a aggloméré les nuages orageux. Or, il est impossible maintenant de ne pas reconnaître que l'agglomération de pareils nuages ne soit le résultat de l'influence électrique. De plus, il est très probable que les résistances, que les couches latérales de l'atmosphère opposent au tourbillon, résultent d'un jeu électrique entre ces couches et le tourbillon lui-même. De même, l'allongement du nuage du côté de la mer, entraîné par le tourbillon, est inexplicable si l'on ne fait intervenir l'électricité. En raison des éléments qui sont mis en jeu et de la rapidité avec laquelle le mouvement d'allongement s'opère, l'attraction seule ne semble pas suffisante pour l'expliquer. Il y a donc évidemment l'intervention d'une force plus active, et cette force ne saurait être autre que le fluide électrique. Par l'électricité s'explique facilement le mouvement de la colonne descendante, ainsi que le point culminant qui se forme à la surface de la mer, allant à la rencontre de la colonne nébuleuse, par l'effet de deux fluides électriques qui s'attirent et qui cherchent à se combiner.

En effet, il faut remarquer que, dans un orage, chaque goutte de pluie qui tombe sur le sol emporte une partie de l'électricité du nuage. Il y a donc ainsi, sur une grande étendue, et par une infinité de points, une sorte d'écoulement de fluide électrique, qui contribue graduellement

(1)-PELTIER (Jean-Charles-Athanase), physicien français (1785-1845), s'occupa tout particulièrement de météorologie. Il a publié des *Observations sur les causes qui concourent à la formation des trombes* (Paris, 1840), l'ouvrage le plus compétent sur ces météores. Il a fait beaucoup pour la science de l'électricité. Aussi modeste que savant, Peltier ne fut rien, pas même académicien.

à diminuer et à éteindre finalement les phénomènes orageux. Or, si l'on imagine qu'une portion de la masse des nuages, sous l'action du mouvement tournant, forme une sorte de cône dont la pointe s'approche à une petite distance du sol, c'est par cette voie, relativement très limitée, et, pour ainsi dire, unique, que s'écoulera l'électricité; sur la pointe s'accumuleront des quantités énormes de fluide, et c'est là, bien plus que dans le tourbillon lui-même, qu'il faut chercher l'explication des redoutables phénomènes qu'elle produit. Lorsqu'en effet la pointe atteint la surface de la terre, rien ne résiste à son passage, les arbres sont déracinés, les maisons renversées, les navires soulevés au-dessus des flots et rejetés avec une violence extraordinaire. C'est du reste exclusivement par la voie de la trombe que l'électricité s'écoule; ainsi le tonnerre cesse de gronder ailleurs; on entend seulement un grondement continu dans le sein de la colonne, qui s'éclaire d'ailleurs sur son sommet de lueurs électriques. Une température très élevée paraît régner à la partie supérieure de la trombe, et elle occasionne un dessèchement très rapide. Peltier a reproduit en petit ce phénomène en disposant au-dessus d'une masse liquide un globe constamment électrisé par l'action d'une machine électrique et muni de tiges, les unes pointues, les autres arrondies; il a pu constater une évaporation trois fois plus rapide que dans les conditions ordinaires.

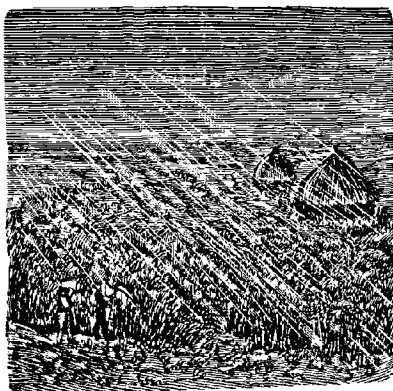
**FEUX SAINT-ELME.** — L'électricité atmosphérique produit encore le phénomène connu sous ce nom et qui se manifeste par une aigrette lumineuse apparaissant, en temps d'orage, à l'extrémité des corps terminés en pointe. Les anciens avaient observé ce phénomène : Pline rapporte « qu'il a souvent vu, la nuit, pendant les factions des sentinelles devant les retranchements, briller à la pointe des javelots des lueurs à la forme étoilée... »

Les navigateurs espagnols donnèrent à ces feux le nom de *feux Saint-Elme* parce qu'ils les attribuaient au corps de ce saint. Dans le récit du second voyage de Christophe Colomb, on trouve que « pendant la nuit du samedi (octobre 1493), saint Elme apparut sur les mâts de perroquet avec sept flambeaux allumés. » Les Italiens les attribuent à saint Pierre et à saint Nicolas, et les Portugais les nomment *Corpos santos*, corps saints.

Ce phénomène, que l'on reproduit en plaçant des corps terminés en pointe sur les conducteurs d'une machine électrique, se présente assez fréquemment, surtout en mer, au sommet des mâts et des vergues. Ces aigrettes sont dépourvues de chaleur et, si, un homme monte à

l'endroit où elles brillent et y place la main, c'est de ses ongles qu'il voit jaillir les flammes.

Le *Telegraphic Journal* du 5 janvier 1880 raconte l'illumination de toute une forêt de pins par une décharge silencieuse provenant des feux Saint-Elme ; il ajoute qu'un phénomène analogue s'est produit à la même époque sur la montagne du Gross-Glokner (Tyrol), où des touristes furent appelés à y jouer leur partie : « Nous étions, disent ceux-ci, revêtus d'un vêtement de feu, et le tonnerre roulait avec un bruit assourdissant répété par tous les échos de tous les rochers, pendant qu'une bourrasque de vent envoyait ses sifflements à travers les fissures des rochers. » Le 11 juin 1880, un orage considérable ayant éclaté au-dessus de Hambourg et des environs, M. Pogson, consul d'Angleterre, eut occasion d'observer le *feu Saint-Elme* au-dessus du clocher d'une église, pendant plus d'une heure. Comme M. Pogson était à une distance de plus de 1,000 mètres, il lui fut impossible de dire si cette apparition était ou non accompagnée du sifflement aigu, qui se produit souvent en même temps que les décharges d'électricité provenant d'une machine électrique, mais il a eu le loisir d'observer très exactement toutes les phases du phénomène, qui était intermittent. Le nombre des apparitions ayant été d'une vingtaine pendant la durée de l'orage, ces apparitions étaient bien courtes ; mais elles étaient cependant assez longues pour qu'il fût possible d'étudier la forme de la lueur. Quelquefois cette dernière était simple ; d'autres fois elle était double. La teinte était toujours d'un rouge violacé ; les lueurs paraissaient presque sphériques et d'un diamètre variant de 1 à 2 mètres ; elles semblaient ne point reposer sur le toit, mais voltiger au-dessus à une certaine distance.

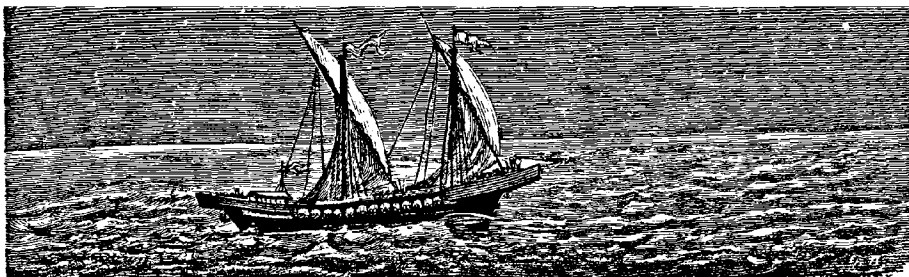






Une trombe en Alsace (page 132).





# LIVRE VI

## MAGNÉTISME

---

### CHAPITRE PREMIER

#### DES AIMANTS

**DES AIMANTS.** — Le *magnétisme* est la partie de la physique qui traite des *aimants*, de leur propriété d'attirer le fer et de la cause des phénomènes qu'ils présentent. Nous avons dit (*Introduction*, page 17), tout ce que les anciens savaient relativement aux *aimants*, et combien les propriétés de ce corps, qu'ils appelaient *pierre de Lydie* ou *pierre magnésienne*, avait excité l'imagination de leurs philosophes. Les savants du moyen âge n'augmentèrent pas les connaissances théoriques que leur avaient léguées les anciens ; aux erreurs et aux superstitions recueillies par Pline, ils ajoutèrent seulement de nouvelles erreurs et de nouvelles superstitions ; ce n'est guère qu'au xvi<sup>e</sup> siècle que Porta expose, dans sa *Magie naturelle* (Naples, 1589), la plupart des phénomènes magnétiques ; et en 1660 que Guillaume Gilbert découvre des faits nouveaux, les réduit en corps de doctrine et pose les bases de la science du *magnétisme*.

Le nom français d'*aimant*, rapporte M. Radau, vient d'un malentendu assez étrange dont il faut chercher l'origine chez Pline. Cet auteur confond plus d'une fois l'aimant (*magnes*) avec le diamant (*adamas*) ; il prête à l'*adamas* une puissance supérieure à celle du *magnes* pour attirer le fer. Au moyen âge, le mot *adamas*, sans cesser d'être le nom du dia-

mant, désigne aussi l'aimant, ou du moins un prétendu diamant magnétique. Puis l'on commença à employer le mot *diamas* pour distinguer la pierre fine de l'oxyde de fer magnétique, pour lequel la langue romane adopte le mot d'*aymant*, considéré peut-être comme une traduction du mot *adamas*, dont on avait perdu l'étymologie grecque.

L'*aimant naturel* ou *pierre d'aimant* est un minerai de fer, désigné par les minéralogistes sous le nom de *fer oxydulé*. C'est un oxyde salin formé par la combinaison de 31 pour 100 de protoxyde et de 69 pour 100 de peroxyde. Il se présente sous la forme de cristaux octaédriques noirs, doués de l'éclat métallique, et donnant une poudre noire, ou en masses compactes, d'un gris d'acier, sans éclat métallique; mais, dans tous les cas, il est pourvu de propriétés magnétiques très prononcées. Il appartient exclusivement aux terrains granitiques, dans lesquels il forme des bancs puissants, des montagnes entières qu'on exploite avec grand avantage près de Rosslag, en Suède, en Norvège, dans le mont Taberg, en Laponie, en Piémont, en Hongrie, dans les monts Ourals, dans les monts Altaï, en Amérique, dans le mont Pumachauche, au Chili, à Bône en Algérie, etc. En France, il est fort rare, et il n'y en a aucune mine. C'est le minerai de fer le plus riche, et qui fournit le fer le plus pur; il en renferme 71 pour 100.

Les *aimants artificiels* sont, en général, des barres d'acier trempé, qui, n'ayant pas naturellement les propriétés des aimants naturels, peuvent les acquérir, soit par le frottement avec un aimant naturel, soit par des procédés que nous décrirons ci-après. Ils ont, sur les aimants naturels, l'avantage d'être généralement plus puissants et d'un emploi plus commode.

**PROPRIÉTÉS CONSTITUTIVES DES AIMANTS.** — Le pouvoir attractif des aimants se manifeste à travers tous les corps et à toutes les distances; il décroît quand augmente la distance et varie avec la température. De plus, il faut remarquer que l'effet est plus sensible aux extrémités qui ont reçu, pour cette raison, le nom de *pôles*; la partie médiane, où l'attraction est nulle, est la *ligne neutre*.

Le pouvoir attractif se démontre en roulant dans de la limaille de fer un aimant, taillé, pour plus de commodité, en forme de barreau. Lorsqu'on le retire (*fig. 49*), on constate d'abord qu'une multitude de parcelles du métal se sont attachées à sa surface, et forment des espèces de houppes aux deux extrémités, aux *pôles*, tandis qu'il n'y en a point dans la *ligne neutre*. D'ailleurs, tout le monde sait qu'en approchant un aimant d'un tas d'aiguilles ou de clous, on les voit se précipiter

sur l'aimant et y adhérer aussitôt. Si l'on suspend horizontalement à un fil une aiguille, de façon qu'elle puisse se mouvoir librement, il suffit d'en approcher un aimant pour la faire pirouetter autour de son centre. Réciproquement, un morceau de fer aimanté est attiré par un morceau d'acier. On applique cette réciprocité dans ce jeu : petits poissons de fer, renfermant un aimant, cygnes de verre, que l'on fait mouvoir en leur présentant un bâtonnet de fer.

L'attraction magnétique n'est point interceptée, ni même affaiblie, par l'interposition d'un corps quelconque. Musschenbroek enferma des aimants dans des enveloppes de plomb, de cuivre, de verre, de porcelaine, et mesura l'intensité de traction exercée à travers les enveloppes sur un cylindre de fer; il trouva qu'elle était la même que celle qu'il avait observée quand les aimants étaient à découvert.

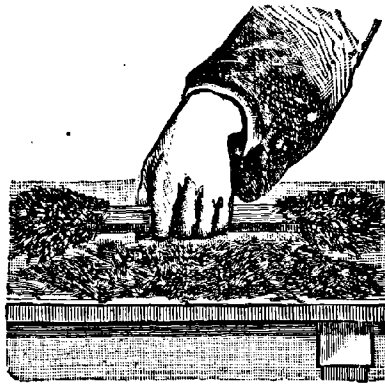


Fig. 40.

ATTRACTION DE L'AIMANT.

**APPLICATIONS DES AIMANTS.** — Cette propriété de la force magnétique de traverser les corps solides a donné lieu à quelques applications. M. Radau cite des horloges où l'aiguille était remplacée par une balle d'acier roulant sur un cadre de clinquant, derrière lequel tournait un barreau aimanté mené par l'horloge. L'*indicateur magnétique* de M. Lethuillier-Pinel est une petite aiguille d'acier qui indique le niveau d'une chaudière à vapeur en suivant le mouvement vertical d'un aimant invisible, porté sur un flotteur qui monte et descend à l'intérieur d'un tube fixé à la paroi de la chaudière. Scoresby a proposé d'appliquer cette pénétration de la force magnétique à l'évaluation de l'épaisseur d'un mur ou d'une cloison qui sépare deux galeries souterraines, en observant la déviation d'une aiguille aimantée produite par un aimant placé du côté opposé du mur. Les essais qu'il fit lui-même de sa méthode donnèrent d'assez bons résultats. On pourrait ainsi parfois éviter de graves accidents comme celui que raconte Scoresby. Lorsqu'on creusa le tunnel de Liverpool, qui a deux kilomètres de longueur, les travaux furent commencés sur plusieurs points à la fois, à l'aide de puits poussés à une certaine profondeur. Au moment où deux galeries allaient se rencontrer, l'ingénieur, qui savait qu'il n'y avait plus qu'une faible épaisseur de roche à traverser, convint avec les ouvriers de la galerie opposée, d'un signal qui annoncerait l'explosion de

la dernière mine; mais l'homme chargé de mettre le feu à la mèche, persuadé qu'on n'était pas encore si près que le disait l'ingénieur, négligea de donner le signal convenu; l'ingénieur et son aide furent dangereusement blessés par les éclats du mur qui s'écroula, ils eurent le visage noirci par la poudre et perdirent chacun un œil.

Parmi les applications simples des aimants, on peut encore citer l'usage qu'on en fait dans les manufactures d'aiguilles pour attirer les poussières d'acier qui pénètrent dans l'œil, et dans certaines mines du Canada pour séparer les parcelles de fer du minerai pulvérisé.

Nous devons signaler aussi l'invention d'un appareil mécanique, basé sur les propriétés des aimants, qui a valu à son inventeur une médaille d'argent à l'Exposition de 1878, et qui est certainement appelé à un succès de plus en plus grand.

Dans tous les ateliers de construction mécanique, les ouvriers tourneurs, raboteurs, mortaiseurs et ajusteurs passent, dans leurs travaux, du fer au cuivre, du cuivre à l'acier, suivant les exigences du travail et des commandes qui leur sont confiées. Quelques précautions qu'ils prennent, sous peine de perdre un temps précieux, ils ne peuvent s'opposer à un certain mélange entre les riblons, la limaille, les détritrus qui résultent de leur travail multiple. Séparer les métaux de la terre, de la poussière, surtout dans ce qui passe sous les pieds, est une opération encore facile. Mais ce qui est important, c'est de débarrasser le cuivre, qui a une valeur réelle, du fer ou de l'acier dont le prix est infime.

On fait ordinairement ce tri à la main, à l'aide de gros aimants, et le manœuvre, courbé toute une journée sur son mélange, compense à peine par le résultat de son opération la rémunération que vaut réellement son travail. De plus, par l'aspiration, il introduit dans son organisme assez de poussière de cuivre pour compromettre sa santé.

Faute du tri à la main, on peut avoir recours aux laveurs de cendres; mais là autre inconvénient: le laveur de cendres est un commerçant qui ne donnera jamais un prix, même approximatif de la matière livrée. Ainsi on donne 6 francs pour les 100 kilogrammes, pour l'épuration de la limaille de cuivre par des hommes qui, après cinq ou six années de travail, tout en prenant la précaution de boire souvent du lait, ont la poitrine usée.

Il y avait donc un problème à résoudre. M. Charles Vavin a imaginé une machine, appelée *trieur magnéto-mécanique*, qui remplit parfaitement le but. Le principe sur lequel repose cette machine est l'attraction du fer par l'aimant ou par le fer aimanté. La limaille, les riblons, gros ou petits, arrivent sur un tambour garni de pièces aimantées et s'y attachent,

pendant que les parcelles de cuivre glissent et vont se réunir dans un réservoir *ad hoc*.

La machine se compose (*fig. 50*) de deux cylindres superposés A et B tournant dans le même sens et sur lesquels la matière à trier vient s'éparpiller. Ce qui n'est pas trié par l'un l'est nécessairement par l'autre. La surface de ces cylindres est formée de bandes en fer doux *cc*, séparées par d'autres bandes en cuivre *oo*. Chaque lame de fer est en contact avec une série d'aimants enchevêtrés *aa*. Ces aimants ont la forme ordinaire des aimants, et leurs branches s'appuient sur une bande et l'autre sur la bande voisine pour intercaler les pôles. C et D sont des brosses tournant en sens contraire des cylindres et venant faire tomber la limaille y adhérant. La matière à séparer se place dans la trémie E, d'où elle tombe sur un plan incliné F, doué d'un mouvement oscillatoire la-

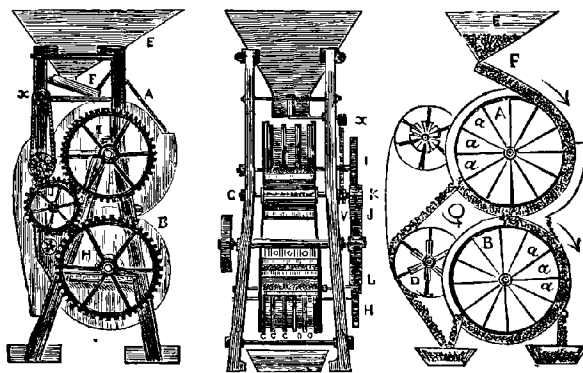


Fig. 50. — TRIEUR MAGNÉTO-MÉCANIQUE.

téral qui l'oblige à s'éparpiller uniformément sur les bandes. La matière épurée tombe à droite, tandis que le fer et le minerai tombent à gauche. G est une poulie recevant la commande d'un moteur. Elle peut être remplacée par une simple manivelle mue à bras. J est une roue qui commande les roues I faisant mouvoir les cylindres ; J fait encore mouvoir les brosses par les pignons K et L. Sur le même arbre que K est une poulie calée V sur laquelle s'enroule la corde *xV*, venant s'enrouler sur la poulie *x* et commandant le mouvement oscillatoire du plan incliné F.

Cette machine, déjà adoptée par la plupart des grands établissements de l'État et de l'industrie privée, peut marcher à la main ou à la vapeur ; elle ne mesure guère que 0<sup>m</sup>,70 à 0<sup>m</sup>,80 sur 0<sup>m</sup>,30 à 0<sup>m</sup>,40 comme base et environ 1<sup>m</sup>,60 de hauteur. Son poids ne dépasse pas 450 kilogrammes.

**POLES ET LIGNE NEUTRE. — SPECTRE MAGNÉTIQUE. — POINTS CONSÉQUENTS. — AIGUILLE AIMANTÉE.** — Nous avons remarqué que, lorsqu'on plonge un aimant dans de la limaille de fer, par exemple, l'effet d'attraction est plus sensible aux extrémités, que l'on désigne sous le nom de

pôles, tandis que la partie médiane où l'effet est nul est appelée *ligne neutre*. Quelle que soit la forme donnée à l'aimant, ces particularités se rencontrent. Une expérience, connue sous le nom de *spectre magnétique*, rend très sensible cette constitution des aimants. Que sur un aimant on place une feuille de carton mince, puis qu'à l'aide d'un tamis on projette doucement de la limaille de fer sur le carton, on voit cette limaille s'accumuler au-dessus des pôles PP' de l'aimant (*fig. 51*), et dessiner des courbes particulières à l'ensemble desquelles on a donné le nom de *spectre* ou *fantôme magnétique*.

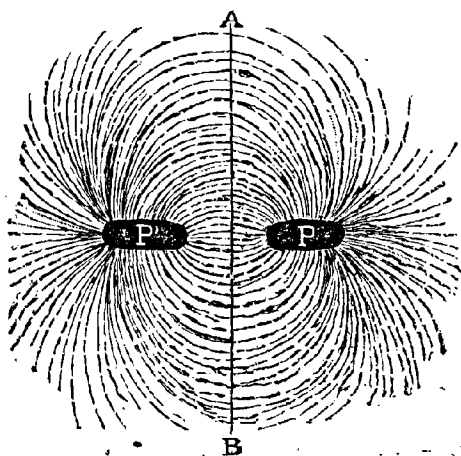


Fig. 51. — SPECTRE MAGNÉTIQUE.

Sur la ligne médiane AB, on ne constate aucune attraction. On obtient ces figures dans toute leur beauté en employant un verre mince, qui favorise l'action de l'aimant, et en imprimant au verre quelques chocs légers qui déterminent des vibrations propres à soustraire momentanément la limaille à l'action de la pesanteur. Les rayons formant ainsi le *fantôme* diffèrent entre eux par leur direction, leur forme et leur dimension. Ceux qui naissent aux pôles sont généralement recti-

lignes et parallèles à l'axe du prisme magnétique; ceux qui prennent naissance dans l'espace qui existe entre les deux pôles forment des courbes, qui réunissent les faisceaux des pôles et des parties intermédiaires et symétriques qui se correspondent. Il est impossible de méconnaître dans ces courbes les effets de l'attraction mutuelle des molécules, qui se neutralisent dès qu'elles se sont réunies en s'inclinant vers le centre, où elles s'accumulent, se mélangent et reprennent enfin la direction rectiligne, signe de l'amortissement de la puissance opposée.

Il arrive parfois, en raison de certains accidents d'aimantation, ou de défaut dans la trempe de l'acier, qu'il se forme, entre les pôles d'un barreau ou d'une aiguille aimantée, des pôles intermédiaires. On a donné à ces pôles le nom de *points conséquents*. Tous les pôles d'un aimant qui en contient plusieurs sont séparés par des lignes neutres; deux pôles consécutifs sont toujours de noms contraires, de sorte que si un barreau possède un nombre impair de pôles, ses deux extrémités sont de même nature.

L'approche d'un second aimant, en modifiant le *spectre magnétique*,



révèle encore la propriété la plus importante des aimants, celle en vertu de laquelle les deux extrémités tournent autour de leur centre commun et se dirigent vers les pôles magnétiques du monde.



ARAGO

(Statue érigée à Perpignan, sculptée par Mazzié).

Cette seconde propriété des aimants donne lieu aux expériences de l'*aiguille aimantée*.

Une *aiguille aimantée* n'est autre chose qu'un barreau aimanté dont la forme peut être quelconque. Cependant presque toujours on lui donne

celle d'une mince lame d'acier taillée en losange allongé (*fig. 52*); cette lame porte en son milieu un petit godet ou *chape*, par laquelle elle peut être suspendue sur un pivot; ou bien elle est suspendue horizontalement par son centre dans un étrier de papier ou de cuivre attaché à un fil de soie suffisamment fort. Si la *chape* est placée de façon que l'aiguille soit horizontale, on remarque que celle-ci n'est point en équilibre dans une position quelconque; elle se fixe dans une position déterminée à laquelle elle revient constamment. Dans cette position, l'une de ses extrémités se tourne à *peu près* vers le nord, et conséquemment l'autre extrémité à *peu*

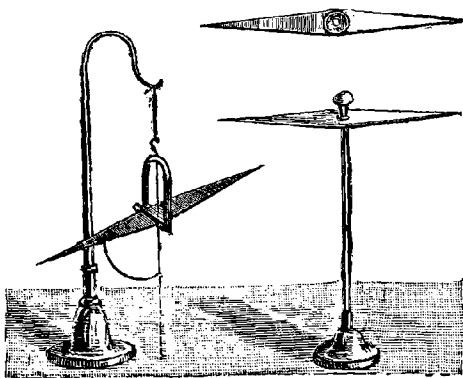


Fig. 52. — AIGUILLES AIMANTÉES.

*près* vers le sud. Or, d'après les lois des attractions et des répulsions magnétiques que nous énonçons ci-après, le pôle qui se dirige vers le pôle nord de la terre n'est pas de même nature que ce dernier. On a alors donné le nom de *pôle austral* à l'extrémité de l'aiguille tournée vers le nord et qui est en réalité le *pôle nord* de l'aimant et le nom de *pôle boréal* à l'extrémité qui regarde le sud et qui est le *pôle sud*. C'est sur cette

importante propriété qu'est fondée la boussole (*Magnétisme*, page 154).

Ordinairement, les aiguilles de boussole, primitivement trempées avec assez de force, sont recuites jusqu'à ce qu'elles aient pris une teinte bleue très prononcée.

Cette teinte est conservée sur la moitié de l'aiguille *pôle nord*; on l'enlève sur la moitié *pôle sud*, qui reprend la teinte habituelle de l'acier.

**LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES.** — Les deux pôles d'un aimant exercent une influence absolument identique sur un morceau de fer; mais il n'en est plus ainsi des actions mutuelles qui s'exercent entre les deux pôles de deux aimants. En effet, si au même pôle d'une aiguille magnétique mobile on présente successivement les deux pôles d'un barreau aimanté qu'on tient à la main, on observe que le pôle nord de l'aiguille est attiré par le pôle sud du barreau et repoussé par le pôle nord, et réciproquement.

On le démontre également en prenant un barreau aimanté CD (*fig. 53*) que l'on fixe horizontalement et au pôle D duquel on suspend une petite

tige de fer P; on fait glisser sur cet aimant un second aimant semblable AB, de façon que le pôle opposé B vienne se fixer sur le pôle D; aussitôt la tige en fer P tombe. Ainsi chaque pôle séparé porterait le morceau de fer; réunis ils n'ont plus aucune action sur lui.

Cette loi s'énonce ainsi : *Les pôles de noms contraires s'attirent, et ceux de même nom se repoussent.*

Les attractions et répulsions magnétiques diminuent rapidement à mesure que la distance augmente, et varient selon la quantité d'aimantation possédée par les aimants. Ce fut Helsham qui, le premier, chercha à mesurer la force attractive des aimants. Hauksbee, Martin, le docteur Brook Taylor, Leseur (1), Jacquier (2), s'y appliquèrent successivement, en observant les déviations d'une aiguille aimantée produites par un aimant approché à des distances variables; mais les résultats obtenus étaient vains. Musschenbroeck ne fut pas plus heureux; en 1760 seulement, Tobie Mayer (3) démontra les véritables lois des attractions magnétiques, et Lambert (4), en 1765, en établit la théorie mathématique. Mais il était réservé à Coulomb de démontrer ces lois irréfutablement.

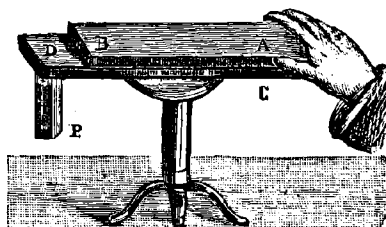


Fig. 53. — LOIS DES ATTRACTIONS  
ET DES RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES.

Pour cela, il se servait de sa *balance de torsion* (*Électricité*, page 19), à laquelle il faisait les changements suivants : le fil de suspension

(1) LESEUR (Thomas), savant français (1703-1770), religieux de l'ordre des minimes, professa les mathématiques au collège de la Sapience, à Rome. Il a publié, en collaboration avec le P. Jacquier, un *Commentaire sur le Livre des principes de Newton* et des *Éléments de calcul intégral*.

(2) JACQUIER (François), savant mathématicien, de l'ordre des minimes (1711-1788), né à Vitry-le-François. Il fut professeur de physique et de mathématiques à Rome. Il était membre de la plupart des Sociétés savantes de l'Europe.

(3) MAYER (Tobie), astronome allemand (1723-1762), « universellement considéré, dit Delambre, comme l'un des plus grands astronomes, non seulement du XVIII<sup>e</sup> siècle, mais de tous les temps et de tous les pays, » professa les mathématiques à l'université de Göttingue. Il imagina des instruments utiles, et ses calculs lui valurent le grand prix décerné par le Bureau des longitudes de Londres.

(4) LAMBERT (Jean-Henri), né à Mulhouse, qui appartenait alors à la Suisse (1728-1777), était fils d'un pauvre tailleur. Ayant étudié presque seul, il acquit des connaissances très étendues et fut successivement précepteur du comte de Salis, professeur à l'académie de Munich, puis à Berlin, où il fut membre de l'Académie. Il a publié d'innombrables travaux sur une foule de sujets, même sur l'éloquence et la poésie. Il fut l'ami de Kant, avec lequel il entretenait correspondance. Lambert a touché à toutes les parties de la science et a laissé dans chacune d'elles des découvertes importantes; mais ses éminentes qualités scientifiques étaient obscurcies par son manque de style et par une vanité sans égale : « Que savez-vous? lui demandait un jour Frédéric II. — Tout. — Comment l'avez-vous appris? — De moi-même. — Vous êtes donc un autre Pascal? — Oui. »

(fig. 54) porte à son extrémité inférieure une pince qui saisit un étrier formé avec une lame de cuivre très légère. Dans cet étrier, on place un petit plan de carton, couvert d'un enduit de cire d'Espagne, sur lequel on imprime l'empreinte du fil ou barreau d'acier qui sert aux expériences, afin de le mettre toujours dans la même position. Sous le milieu de l'étrier, on fixe un plan vertical qui est entièrement submergé dans un vase rempli d'eau, afin d'arrêter promptement, par la résistance qu'il en éprouve, les oscillations de l'aiguille aimantée placée dans l'étrier. La

balance est placée de manière que l'un de ses côtés soit dirigé dans le *méridien magnétique* (page 153).

Avant de chercher les lois des attractions et répulsions, il faut s'assurer si, lorsque la torsion du fil est nulle, l'aiguille aimantée se place naturellement dans le méridien magnétique; à cet effet, on substitue à cette aiguille une autre aiguille de cuivre, de même dimension que l'autre, et qui reste dans le plan du méridien magnétique en vertu de la force de torsion du fil. Cela fait, on place la caisse qui renferme les diverses parties

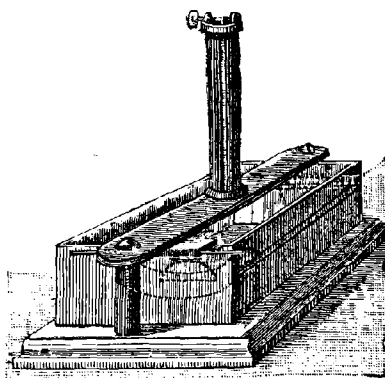


Fig. 54.

EXPÉRIENCE DE COULOMB.

de la balance de façon que la direction du méridien magnétique coïncide avec les divisions zéro et 180 degrés du cercle horizontal.

Coulomb opérait ainsi : Un fil aimanté étant placé dans l'étrier, il tournait le fil de suspension de la balance de manière que, le fil aimanté étant dans la direction du méridien magnétique, le fil de suspension n'éprouvait aucune torsion. Il plaçait ensuite verticalement dans ce même méridien une autre fil aimanté, de même dimension que le premier, en sorte que si les deux fils s'étaient touchés, ils se seraient rencontrés et croisés, à un pouce de leurs extrémités; mais comme ils étaient opposés par les pôles homologues, le fil horizontal fut repoussé de la direction de son méridien, et il ne s'arrêta que lorsque la force de répulsion des pôles opposés fut mise en équilibre par les forces combinées de la torsion et du magnétisme terrestre. En combinant les résultats de ces expériences avec deux faits généraux d'après lesquels, d'une part, les angles de torsion des fils sont proportionnels aux forces employées à les tordre, et de l'autre, la force qui tend à ramener l'aiguille aimantée dans la direction du méridien magnétique, est proportionnelle aux angles d'écartement, Coulomb parvint à établir que l'*action du dyna-*

*même magnétique est en raison directe de l'intensité et en raison inverse du carré des distances.* C'est, comme on le voit, la loi de la gravitation universelle (*Pesanteur*, page 85), que Coulomb démontrait être identique avec la loi de l'action magnétique.

**HYPOTHÈSE DES DEUX FLUIDES MAGNÉTIQUES.** — Pour expliquer les phénomènes du magnétisme, les hypothèses n'ont point manqué. Descartes attribuait la cause du magnétisme à l'existence d'une matière subtile, particulière, passant, sous forme de spirales, du pôle nord au pôle sud, en même temps que le tourbillon du globe terrestre imprimait à l'aimant sa direction.

Suivant Hartsoeker (1), l'aimant est une substance composée d'une infinité de prismes déliés, qui sont rendus parallèles entre eux et à l'axe terrestre par le mouvement diurne de notre planète, et qui laissent perpétuellement échapper, de leur intérieur creux, des effluves magnétiques.

Enfin, depuis que Symmer eut imaginé sa théorie des deux fluides électriques (page 12), on a admis l'hypothèse analogue de *deux fluides magnétiques*, qui ont chacun une répulsion pour leurs propres molécules, et une attraction pour celles de l'autre. Avant l'aimantation, ces deux fluides seraient combinés autour de chaque molécule et se neutraliseraient réciproquement; mais ils peuvent se séparer sous l'influence d'une force plus grande que leur attraction mutuelle, et se mouvoir autour des molécules sans sortir de la sphère d'activité qui leur est assignée autour de chacune d'elles. Les fluides sont ensuite, dans cette théorie, *orientés*, c'est-à-dire que, dans la sphère magnétique qui entoure chaque molécule, le fluide boréal tient constamment une même direction et le fluide austral la direction opposée; d'où proviennent les résultantes contraires dont les points d'application sont les deux pôles. A mesure que cesse l'orientation des fluides, l'équilibre se rétablit autour de chaque molécule, et le résultat final est nul, c'est-à-dire qu'il n'y a ni attraction ni répulsion.

Si l'on prend un barreau aimanté AB (*fig.* 55) dont on a reconnu les deux pôles et la ligne neutre et qu'on le casse au milieu, chaque moitié devient elle-même un aimant complet *ab*, ayant aussi sa ligne neutre et ses deux pôles. Si l'on brise les deux nouveaux aimants, on aura la for-

(1) HARTSOEKER (Nicolas), savant hollandais (1656-1726), élève de Huyghens, habita successivement Paris, où il fréquenta les savants; puis Rotterdam, où il donna des leçons de mathématiques au czar Pierre; Dusseldorf, où il fut professeur de philosophie et de sciences. On lui doit des découvertes sur les animalcules spermatiques et des perfectionnements au microscope et au télescope. D'un caractère querelleur, il attaqua sans ménagement Descartes, Newton, Leibniz.

mation instantanée d'un autre aimant complet, et ainsi de suite. Cette expérience semble appuyer l'hypothèse des deux fluides.

Cette hypothèse d'ailleurs se prête d'une manière sensible à l'explication des phénomènes; c'est pourquoi elle est généralement adoptée, du moins comme méthode de démonstration; nous verrons ci-après, en traitant des courants électriques, que les phénomènes des aimants sont attribués de préférence aujourd'hui à des courants électriques particuliers autour de leurs molécules.

**SUBSTANCES MAGNÉTIQUES ET DIAMAGNÉTIQUES.** — On appelle substances *magnétiques* celles qu'attire l'aimant, telles que le fer, c'est-à-

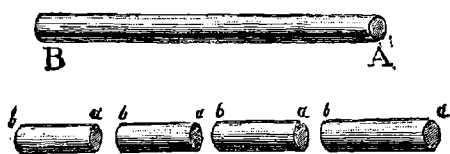


Fig. 55. — RUPTURE D'UN BARREAU AIMANTÉ.

dire qui contiennent les deux fluides à l'état neutre. Les composés ferrugineux sont généralement *magnétiques*; quelques-uns toutefois, comme le persulfure de fer, ne sont pas attirés par l'aimant.

Cependant, dès 1802, Coulomb, reprenant les expériences faites en 1778, par Brugmans, avait observé que les aimants exercent une action sur tous les corps, avec plus ou moins d'énergie, et il le prouvait en faisant osciller des barreaux de différentes substances entre les pôles opposés de forts aimants, et ensuite hors de l'influence de tout aimant, puis en comparant le nombre des oscillations faites dans les deux cas, en des temps égaux. Dans le principe, les phénomènes produits furent attribués à la présence de matières ferrugineuses dans les corps soumis à l'expérience; mais, depuis, Baillif et M. Becquerel père ont démontré que les aimants exerçaient réellement une action sur tous les corps et même sur les gaz. Comme cette action est attractive pour les uns, et répulsive pour les autres, on a nommé substances *magnétiques* celles qu'attire l'aimant, et *diamagnétiques* celles qu'il repousse.

Voici la liste des principaux corps magnétiques ou diamagnétiques :

#### CORPS MAGNÉTIQUES

Fer. — Nickel. — Cobalt. — Platine. — Palladium. — Titane. — Manganèse. — Chrome. — Cérium. — Osmium. — Lanthane. — Molybdène. — Oxyde des métaux magnétiques. — Sels des métaux magnétiques. — Papier. — Porcelaine. — Tourmaline. — Oxygène. — Bioxyde d'azote.

## CORPS DIAMAGNÉTIQUES

Bismuth. — Antimoine. — Zinc. — Étain. — Cadmium. — Mercure. — Plomb. — Argent. — Cuivre. — Or. — Arsenic. — Uranium. — Rhodium. — Iridium. — Tungstène. — Phosphore. — Soufre. — Charbon. — Tellure. — Iode. — Oxydes des métaux diamagnétiques. — Sels des métaux diamagnétiques. — Eau. — Glace. — Alcool. — Éther. — Huiles. — Essences. — Cire. — Bois. — Ivoire. — Cuir. — Lait. — Sang. — Hydrogène. — Presque tous les gaz.

Dès 1847, Faraday avait reconnu que les aimants puissants exercent sur les flammes une action répulsive qu'il attribue à une différence de diamagnétisme entre les gaz. Depuis, M. Ed. Becquerel, qui a exécuté d'importants travaux sur ce point, a vu que, entre tous les gaz, l'oxygène était celui qui avait le plus grand pouvoir magnétique et qu'un mètre cube de ce gaz condensé agit sur une aiguille aimantée comme 5<sup>es</sup>,5 de fer. Une des plus belles expériences de Faraday est celle par laquelle, après bien des essais infructueux, il réussit à réaliser l'aimantation de la lumière. Nous parlerons de cette expérience en traitant ci-après de la *polarisation de la lumière*.

Quelques physiiciens ont considéré le *diamagnétisme* comme une propriété distincte du *magnétisme* ; mais M. Ed. Becquerel réunit ces deux classes de phénomènes par le moyen d'une hypothèse ingénieuse. Il admet qu'il n'y a pas deux genres d'actions entre les corps et les aimants, mais seulement une aimantation par influence, et que la répulsion exercée sur certaines substances dépend de ce que ces substances sont dans un milieu ambiant plus magnétique qu'elles-mêmes.

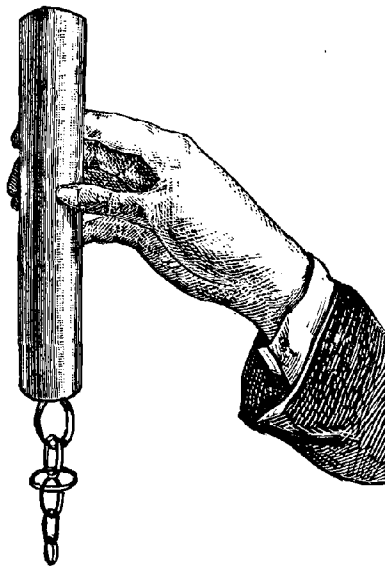


Fig. 56. — CHAÎNE MAGNÉTIQUE.

**AIMANTATION PAR INFLUENCE. — FORCE COERCITIVE.** — Le fluide magnétique neutre que renferment les substances magnétiques peut être décomposé par l'influence d'un aimant, soit au contact, soit à distance.

Pour démontrer l'*aimantation par influence*, on présente (fig. 56)

un morceau de *fer doux*, un anneau par exemple, à l'un des pôles d'un barreau aimanté, soit au pôle boréal. Dès que le contact a lieu, et même à une certaine distance, le fluide magnétique neutre de l'anneau est décomposé, son fluide austral est attiré et son fluide boréal repoussé. Le petit anneau devient alors lui-même un aimant ayant sa ligne neutre et ses deux pôles; il peut, à son tour, en attirer un autre, lequel en attirera un troisième, formant ainsi une *chaîne magnétique*, tant que l'influence du barreau sera assez énergique. Mais cette aimantation, si le fer est bien pur, bien exempt d'aciération, s'il est vraiment du fer doux, ne dure que pendant le temps où s'exerce l'influence du barreau aimanté, car aussitôt que l'on sépare du barreau le premier anneau, les autres se détachent et ne conservent aucune trace de magnétisme.

Si l'on emploie de l'acier au lieu du fer, on obtient un résultat analogue, mais toutefois avec une différence importante. D'une part, l'acier s'aimante moins facilement; il faut, pour obtenir une aimantation, même assez faible, un contact prolongé ou des frictions répétées avec un aimant; mais, d'autre part, l'aimantation persiste après que l'influence du barreau aimanté a cessé. Cette propriété, particulière à l'acier trempé, est désignée sous le nom de *force coercitive*.

En comparant les phénomènes précédents à ceux de l'électricité par influence (page 30), on reconnaît une certaine analogie entre eux, mais avec une différence considérable. En effet, dans le cas des corps électrisés, il y a communication de l'électricité d'un corps à l'autre, quand ceux-ci viennent au contact: dans l'aimantation, au contraire, l'aimant conserve toujours son intensité initiale. Il faut conclure de là que, si les phénomènes magnétiques doivent être attribués, comme les phénomènes électriques, à un fluide, celui-ci ne peut passer d'un corps à un autre.

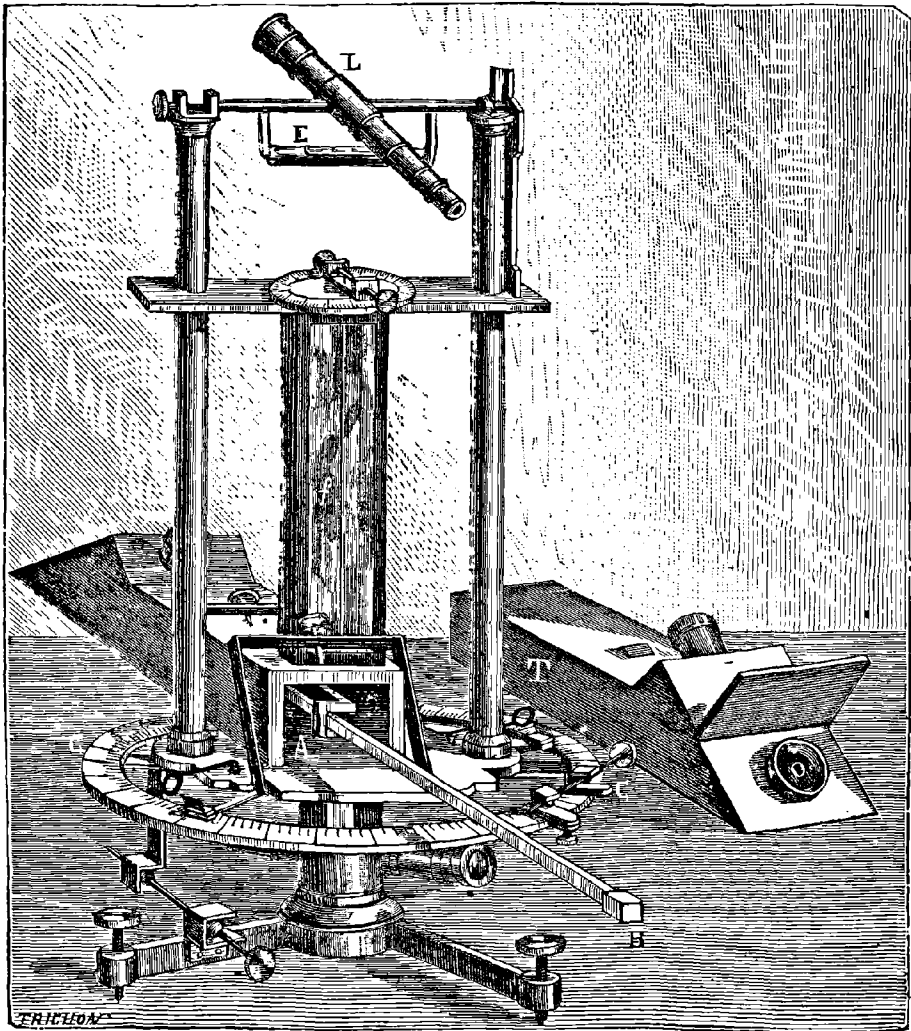
## CHAPITRE II

### MAGNÉTISME TERRESTRE

**ACTION MAGNÉTIQUE DU GLOBE TERRESTRE.** — Si l'on suspend une aiguille aimantée à un fil sans torsion, ou qu'on la monte sur un pivot autour duquel elle puisse tourner librement, nous avons dit (page 146)



qu'une de ses extrémités se dirigeait à *peu près* vers le nord. En effet, le pôle austral de l'aiguille ne se dirige pas exactement en réalité vers ce point; il s'en écarte d'une certaine quantité, variable d'un lieu à l'autre,



Boussole de Gambey (page 155).

et, dans le même lieu, d'une époque à l'autre. Cette différence porte le nom de *déclinaison*; elle peut être *occidentale* ou *orientale*, selon qu'elle est à l'ouest ou à l'est du *méridien magnétique*. A Paris, en ce moment, la déclinaison est occidentale et égale à  $18^{\circ} 58'$  environ (*fig. 57*).

L'on sait que l'on appelle *méridien astronomique* d'un lieu le plan vertical qui passe par ce lieu et par les deux pôles de la terre, et que la *méridienne* est la ligne que forme le contact de ce plan avec la surface de la terre.

De même on nomme *méridien magnétique* d'un lieu le plan vertical qui passe par les deux pôles d'une aiguille aimantée.

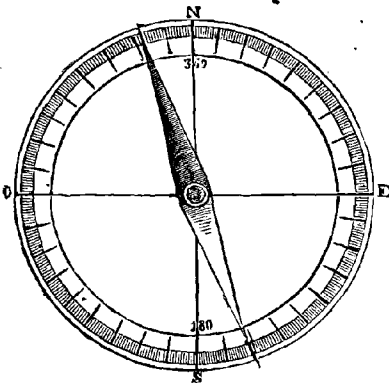


Fig. 57. — DÉCLINAISON.

Cette même aiguille aimantée, après s'être orientée dans le méridien magnétique, ne conserve pas une position horizontale. La portion qui se tourne vers le nord, c'est-à-dire le pôle austral de l'aiguille, s'incline au-dessous de l'horizon et fait avec lui un angle qu'on désigne sous le nom d'*inclinaison*. Cet angle varie comme celui de la *déclinaison*, suivant une proportion déterminée par la latitude; l'inclinaison est actuellement à Paris égale à  $66^\circ$ . On a observé, en effet,

certains points où l'inclinaison était de  $90^\circ$ , et que, partant de là, cette inclinaison allait en diminuant avec la latitude jusque vers l'équateur où elle est nulle, en certains points peu distants de celui-ci. En poursuivant elle reparait dans l'hémisphère austral, mais en sens opposé, c'est-à-dire que le pôle boréal de l'aiguille descend alors au-dessous de l'horizon.

On a appelé *équateur magnétique* la courbe qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle, et *pôles magnétiques* les points où elle est de  $90^\circ$ .

L'action magnétique du globe terrestre se manifeste encore par l'*intensité* avec laquelle l'attraction s'effectue dans les mêmes localités.

Ces trois éléments *déclinaison*, *inclinaison*, *intensité*, sont dits *constante magnétique* d'un lieu.

Pour connaître la *déclinaison*, l'*inclinaison* ou l'*intensité magnétique*, on se sert d'instruments, qui, selon l'usage auxquels ils sont destinés, portent les noms de *boussoles de déclinaison*, *boussoles d'inclinaison*, *boussoles des intensités*.

**BOUSSOLES DE DÉCLINAISON.** — La *boussole de déclinaison* consiste en une boîte de cuivre AB (fig. 58), ayant pour fond un cercle gradué M,

et au centre un pivot d'agate sur lequel repose une aiguille aimantée  $ab$  en forme de *rhombe* (losange allongé), et très légère. De cette boîte s'élèvent deux pieds-droits qui soutiennent un axe horizontal  $X$ , dans lequel est fixée une lunette astronomique  $L$ , mobile dans un plan vertical, et munie de fils réticulaires à son foyer. Un pied  $P$  soutient la boîte  $AB$ , laquelle peut tourner librement dans le sens horizontal, en entraînant la lunette dans son mouvement. Un autre cercle fixe  $QR$ , appelé *cadran azimutal*, sert à compter le nombre de degrés dont a tourné la lunette au moyen d'un vernier  $V$ , fixé à la boîte. Enfin l'inclinaison de la lunette par rapport à l'horizon se mesure avec un vernier  $K$  qui reçoit son mouvement de l'axe  $X$  de la lunette et se meut sur un arc de cercle fixe  $x$ .

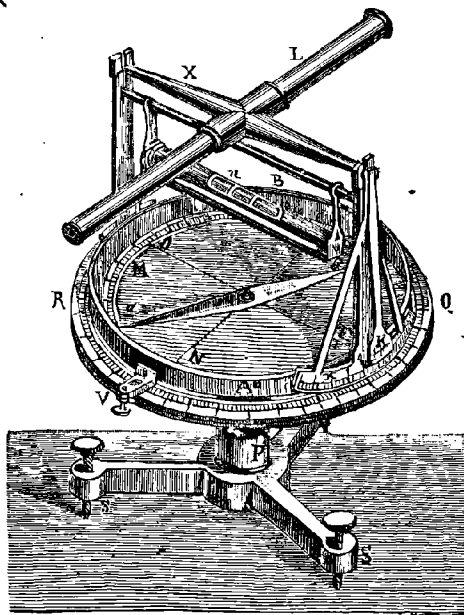


Fig. 58. — BOUSSOLE DE DÉCLINAISON.

Lorsque l'on connaît le méridien astronomique d'un lieu dont on veut déterminer la déclinaison, on dispose d'abord la boussole très horizontalement au moyen des vis  $SS$ , et du niveau  $n$ ; puis l'on fait tourner la boîte  $AB$  jusqu'à ce que la lunette soit dans le plan du méridien astronomique. Lisant ensuite, sur le limbe gradué  $M$ , l'angle formé par l'aiguille aimantée avec le diamètre  $N$ , qui correspond au zéro de la graduation et qui se trouve exactement dans le plan de la lunette, on a la *déclinaison*, qui est *occidentale* ou *orientale* selon que le pôle  $a$  de l'aiguille aimantée est à l'occident ou à l'orient du diamètre  $N$ .

Lorsque l'on ne connaît pas le méridien astronomique du lieu, on peut le déterminer par le moyen de la boussole elle-même, en se servant du cadran azimutal  $QR$ , et de l'arc de cercle  $x$ , en observant avec la lunette un astre déterminé, avant et après le moment de son passage au méridien. On emploie alors la méthode décrite dans tous les traités de cosmographie pour déterminer la méridienne d'un lieu.

Pour obtenir le résultat cherché avec une précision plus rigoureuse encore, on emploie la même méthode d'observation, mais on se sert de la *boussole de déclinaison de Gambey*

Dans cette boussole (*fig.* à la page 153), l'aiguille est remplacée par un barreau aimanté AB, dont les extrémités sont munies de deux anneaux à fils croisés servant de repères. Ce barreau, qu'un étrier supporte en son milieu, est suspendu par un faisceau *f* de fils de soie sans torsion à un treuil mobile : sous l'influence de l'action magnétique du globe terrestre, il va prendre, après quelques oscillations, une direction fixe qui est celle du méridien magnétique dans le lieu et au moment de l'observation. Le cadre soutenant le treuil porte en même temps une lunette L et un niveau E, qui ont la même destination que dans la boussole précédente.

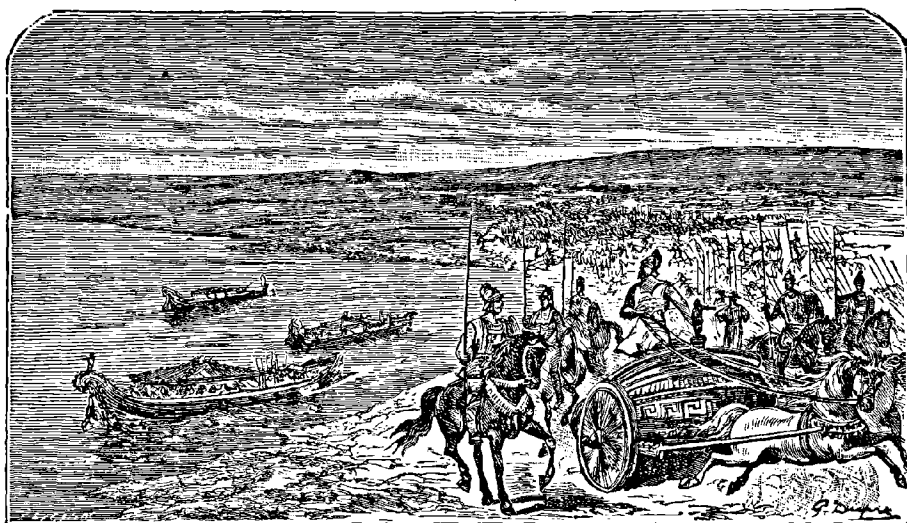


Fig. 59 — BOUSSOLES CHINOISES.

L'empereur Houang-ti étant à la guerre inventa le char indicateur.

Le cadre, qui supporte la boussole et qui supporte aussi le fil de suspension, tourne sur le plan d'un limbe CC, muni de verniers. Pour éviter l'influence des agitations de l'air, le fil de soie est enfermé dans une boîte garnie de glaces, et une autre boîte T renferme le barreau dont on observe les extrémités par les ouvertures OO.

**BOUSSOLE MARINE.** — Une des applications les plus belles et les plus fécondes en résultats, qui aient été faites des propriétés magnétiques, est la *boussole marine*, guide des navigateurs à travers les tempêtes et les écueils des océans.

Plus de mille ans avant Jésus-Christ, avons-nous dit (*Introduction* page 21), les Chinois connaissaient la boussole (*fig.* 59), ou du moins la propriété qu'ont les aiguilles aimantées de diriger constamment leur pointe vers un point. En effet, le missionnaire Duhalde rapporte, d'après

un recueil chinois, que, vers l'an 2600 avant notre ère, l'empereur Houang-ti étant à la guerre, on inventa le *char indicateur* (*ssi-nan*) qui portait une statuette, dont le bras étendu montrait toujours le sud, ce qui permit à l'armée impériale de se diriger et de surprendre l'ennemi pendant un brouillard épais (1). Le peuple chinois, d'abord confiné au nord, poussa successivement ses conquêtes dans les contrées du sud; c'est pourquoi le pôle de l'aiguille aimantée qui se dirige vers ce point cardinal dut fixer de préférence son attention, puisqu'il indiquait la position des pays vers lesquels il cherchait à étendre sa domination.

Des ouvrages chinois qui datent d'une époque très reculée constatent l'existence d'une boussole, qui est faite d'un aimant posé sur un flotteur. Les jonques chinoises pouvaient donc se diriger d'après les indications de l'aiguille aimantée, il y a plus de quatre mille ans.

Les Italiens disputent aux autres nations de l'Europe l'honneur d'avoir les premiers fait connaître la boussole, et ils se fondent principalement sur ce que *boussole* viendrait de l'italien *bossolo*, dérivé de *bosso*, buis, boîte. Mais Klaproth fait, avec plus de raison, venir ce mot de l'arabe *mouassala*, qui signifie à la fois *dard*, *aiguille* ou *boussole*; car il est hors de doute que les Arabes ont eu connaissance de l'aiguille flottante avant les Européens, et qu'ils la leur ont transmise pendant les premières croisades, au XII<sup>e</sup> siècle.

C'est à tort encore que l'on a supposé que le célèbre voyageur vénitien Marco Polo avait introduit cette invention en Europe, car il ne rentra de ses voyages qu'en 1295, et, outre Guyot de Provins dont nous avons cité les vers de 1180, d'autres auteurs avaient parlé de la boussole avant lui, entre autres Jacques de Vitry, qui assista, vers 1204, à la quatrième croisade; Gauthier d'Espinois, chansonnier contemporain de Thiébaud VI, comte de Champagne; Albert le Grand, dans son *Livre des Pierres*; Vincent de Beauvais, dans son *Speculum nature*, et Brunetto Latini, qui, dans son *Trésor*, écrit en langue française vers 1260, raconte que le moine anglais Bacon lui montra à Oxford une aiguille aimantée. La boussole était même assez connue sous le nom de *marinette*, *maguette* et de *calamite* dans la Méditerranée.

Ce fut, comme nous l'avons dit, un pilote de Pasitano, nommé Flavio Gioia qui eut l'idée, en 1303, de donner plus de précision aux indications de l'aiguille aimantée, en la suspendant sur la pointe d'un pivot fixe. C'est sans doute ces perfectionnements qui ont fait regarder Gioia, par quelques auteurs, comme l'inventeur de la boussole.

(1) R. Radau, *Le Magnétisme*.

Un peu plus tard, les Français y ajoutèrent la *rose des vents*, ainsi que le témoigne la fleur de lis qu'on retrouve, marquant le nord, dans les boussoles les plus anciennes.

Aujourd'hui, la *boussole marine*, appelée dans le langage des marins *compas de route*, se compose d'une aiguille aimantée posée en équilibre et très mobile sur un pivot, et enfermée dans une boîte en bois ou en cuivre. Un carton est placé au-dessous de l'aiguille; son centre correspond à la

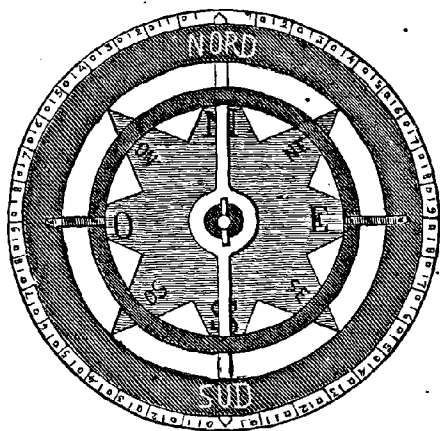


Fig. 60. — BOUSSOLE DUCHEMIN.

fois au milieu de la longueur de l'aiguille et à la verticale du pivot. Ce disque, appelé *rose des vents*, accompagne l'aiguille dans tous ses mouvements et en modère les oscillations; il porte dessinées trente-deux divisions égales, dites *rumb*s ou *aire des vents*. La *cuvette*, c'est-à-dire le cercle de cuivre sur lequel repose le pivot de l'aiguille, lestée par une masse de métal, est, elle, portée par une *suspension à la Cardan*, de manière à rester toujours horizontale, quels que soient les mouvements du navire. Le tout

est installé à demeure, à l'arrière du navire, près du gouvernail, dans une sorte de boîte ou d'armoire appelée *l'habitacle*. A bord des navires de l'État, l'habitacle est divisé en trois parties : celui du milieu renferme une lampe pour les observations de nuit, ceux de droite et de gauche une boussole, de manière à permettre un contrôle permanent (*fig.* à la page 161).

Sur le bord d'avant de la cuvette, on a tracé un trait vertical, dit *cap du compas*, et parfaitement parallèle à l'axe du vaisseau. En examinant la situation de l'aiguille sur le cadran de la boussole par rapport à la boîte, on sait dans quelle direction la proue du navire se dirige. Le timonier doit maintenir le gouvernail de manière que le *cap* réponde toujours au *rumb* qui lui est ordonné.

En 1873, M. Émile Duchemin soumit à l'Académie des sciences et au ministère de la marine une nouvelle boussole, dans laquelle l'aiguille est remplacée par un cercle d'acier trempé (*fig.* 60). En soumettant des barres d'acier à des *electro-aimants*, on obtient, aux points magnétisés directement, une série de pôles, *points conséquents* (page 144). M. Duchemin a été conduit ainsi à produire des aimants circulaires ou des cercles avec deux

pôles magnétiques à l'extrémité de chaque diamètre. Ce cercle aimanté est disposé sur pivot ou suspendu par son centre à un fil : un second cercle aimanté est concentrique au premier, et lui est réuni par une traverse en aluminium ; il augmente la force directrice et la sensibilité de la boussole ; en outre, il contribue à diminuer la durée des oscillations autour de la position d'équilibre. Cette boussole est aujourd'hui réglementaire sur les navires de l'État et adoptée déjà par plusieurs marines étrangères.

**COMPAS DES VARIATIONS.** — La *déclinaison* de l'aiguille aimantée, quoique, paraît-il, marquée sur les cartes marines d'Andrea Bianco (1436), n'était point connue généralement à la fin du xv<sup>e</sup> siècle, car Christophe Colomb fut très surpris lorsqu'il constata, le 13 septembre 1492, que l'aiguille de sa boussole, au lieu de pointer vers l'étoile polaire, s'en écartait vers la gauche d'environ 6 degrés. Il était alors à deux cents

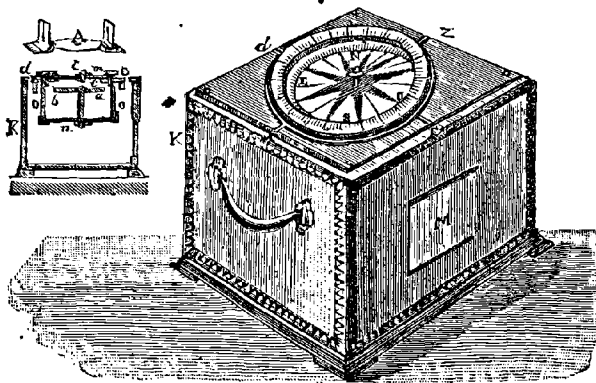


Fig. 61. — COMPAS DES VARIATIONS.

lieues à l'ouest de l'île de Fer. Le lendemain, après avoir toujours navigué dans la même direction, il trouva que la déviation avait encore augmenté. Les matelots en furent effrayés : « Les lois de la nature, disaient-ils, étaient bouleversées ; la boussole allait perdre son pouvoir mystérieux. » Colomb dut rassurer ses hommes en leur disant que l'aiguille tournait autour du pôle comme les astres du firmament.

Georges Hartmann, auteur de divers ouvrages de géométrie et d'astrologie, et qui, après avoir voyagé en Italie, se fixa vers 1518 à Nuremberg, où il fut nommé vicaire de l'église de Saint-Sebald, fut un des premiers qui observa la *déclinaison* et aussi l'*inclinaison*, paraît-il ; mais des déterminations un peu exactes furent faites seulement en 1541 à Paris, et en 1580 à Londres, et ce n'est qu'en 1599 que, d'après les ordres du prince de Nassau, les navigateurs hollandais dressèrent les premières tables un peu précises relatives à la *déclinaison*.

Outre le *compas de route*, il y a donc, à bord des navires, le *compas des variations*, qui a pour objet de déterminer la déclinaison magnétique

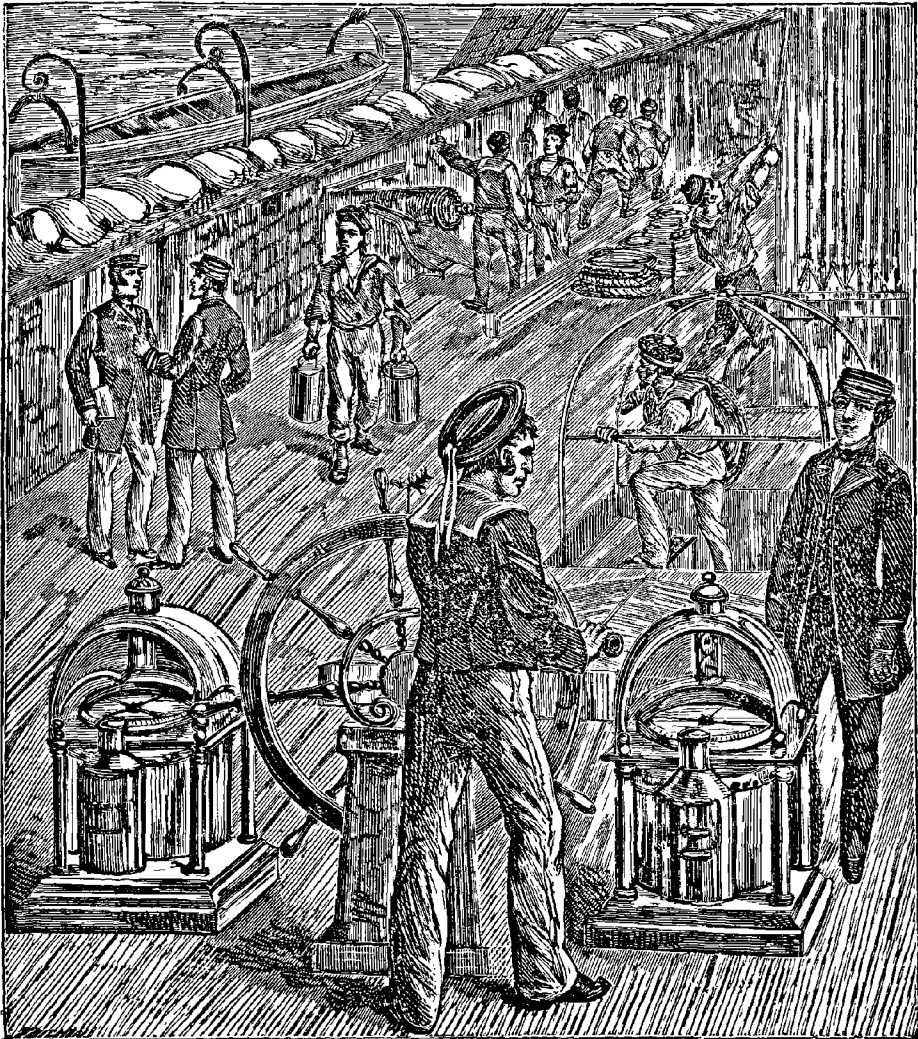
(fig. 61). L'aiguille aimantée  $ab$ , très mobile sur son pivot, est fixée sur la face antérieure d'une feuille de talc  $t$ , sur laquelle est tracée la rose des vents; elle est également maintenue horizontale par une *suspension à la Cardan*, c'est-à-dire soutenue par deux anneaux concentriques mobiles, l'un autour du pivot  $cd$ , appuyé sur la boîte même, et l'autre autour de  $xz$ , perpendiculaire au premier et sur l'anneau fixé au point  $cd$ . Une ouverture  $M$ , en cristal dépoli, sert à éclairer la boussole pendant la nuit au moyen d'une lumière placée hors de la boîte, en face du cristal, et qui projette ses rayons à l'intérieur. Le fond  $n$  de la boîte cylindrique  $O$ , dans laquelle est la boussole, est aussi en cristal et donne passage à la lumière pour éclairer la feuille de talc  $t$ , qui soutient la rose des vents et est transparente. Un autre cristal couvre la boussole et un pied, fixé par son centre, soutient une alidade concentrique  $A$ , à pinnules diamétralement opposées. Deux fils croisés à angle droit sont tendus sur le bord de la boîte qui contient l'aiguille, et l'un d'eux donne la direction des fentes des pinnules et par conséquent celle du plan de visée. L'une des pinnules porte à  $45^\circ$  un miroir où l'observateur voit se refléter l'arc et les divisions correspondantes du limbe, en même temps qu'il voit l'astre au travers des fentes des pinnules et d'un trait du miroir où le tain a été enlevé.

Le *compas des variations* est précieux pour les navigateurs; à bord des navires en fer, par exemple, le *compas de route* est sans cesse soumis à des causes perturbatrices, de telle sorte que le marin, pour assurer sa route, est constamment obligé de se livrer à des vérifications astronomiques. L'aiguille n'a plus de direction absolument fixe; son angle avec le méridien varie non seulement avec la latitude, mais encore pour chaque changement du cap du navire. Les corrections que l'on fait subir à l'instrument deviennent quelquefois insuffisantes, et le *compas de route*, loin de venir en aide au navigateur, peut l'induire en erreur et amener des catastrophes. Les méthodes de correction sont d'ailleurs méticuleuses; en Angleterre surtout, plus d'un capitaine de la marine marchande les laisse de côté et se confie, un peu à tout hasard, à sa bonne étoile. On cite la perte du *Glenarchy*, en 1868, vaisseau tout en fer, chargé de 1,200 tonnes de fer laminé, qui sortit de la Clyde et alla s'échouer dans la baie de Dublin. Les fausses indications du compas avaient trompé le capitaine. On attribue aussi à la même cause la perte du transport à vapeur *la Sèvre*, qui a sombré, le 20 février 1870, en doublant le cap de la Hogue.

Il existe aussi des causes locales de déviation. Ainsi en Europe, rapporte M. de Parville, dans une mer très fréquentée, dans l'Adria-



tique, on a trouvé que l'aiguille aimantée déviait de sa position dans le voisinage de certains rochers d'un angle qui peut atteindre 2 degrés. Il n'en faudrait pas tant pour faire courir à un navire des dangers sé-



L'habitacle sur un navire de guerre (page 159).

rieux. Ce qui se produit dans l'Adriatique doit vraisemblablement se présenter souvent le long des côtes. Ainsi, depuis Corfou jusqu'à Venise, la variation de la boussole est environ de 3 degrés 30 minutes, et des perturbations importantes ont lieu près du mont *Valebit* et près du rocher

*Pomo*. D'après la disposition générale des lignes *isogones* de l'Adriatique (page 171), *Pomo* devrait avoir, à notre époque, une déclinaison d'environ 11 degrés, comme cela existe au surplus à droite et à gauche de sa position ; au lieu de cela, l'aiguille aimantée est tout à coup, dans son voisinage, brusquement repoussée vers l'est d'environ 2 degrés ; la matière volcanique du rocher influe probablement sur l'aiguille.

Bouguer avait remarqué déjà ces influences, dues au voisinage de roches volcaniques, lors de son voyage au Pérou, et tous les voyageurs ont confirmé depuis ces observations ; mais les marins ont été longtemps avant de se douter des erreurs occasionnées par le fer même des vaisseaux. Aujourd'hui que les ancres sont plus fortes, que les chaînes, les canons et un grand nombre d'instruments sont, comme la coque même du navire, en fer ou en acier, les déviations sont plus graves, et peuvent devenir si considérables que le compas de route n'est plus d'aucun usage.

Le moyen, à la fois scientifique et pratique, de correction directe de la déviation de l'aiguille aimantée consiste à observer l'amplitude *ortive* ou *occuse* du soleil, c'est-à-dire l'arc de l'horizon compris entre l'équateur et cet astre quand il se lève ou quand il se couche, et à relever, en même temps, au moyen du *compas des variations*, le point de l'horizon où il se lève ou où il se couche. La différence entre l'amplitude calculée et l'amplitude observée est précisément la variation.

Mais ces observations d'amplitude du soleil ne peuvent avoir quelque exactitude que lorsque la latitude est faible ; car, dans les hautes latitudes, le soleil décrit un cercle très incliné sur l'horizon, et il en résulte de l'incertitude sur l'instant précis où l'astre se lève ou se couche.

Pour arriver au même résultat, on emploie les observations d'*azimut*. On sait que l'*azimut* est l'angle qu'un plan vertical fait avec le plan méridien, et qu'il est mesuré par l'angle de la trace horizontale de ce plan avec la méridienne. On relève directement, à la boussole, la position d'un astre ; on observe, en outre, la hauteur de cet astre ; on en déduit son azimut. La différence entre l'azimut observé et l'azimut calculé donne la variation cherchée. Trois opérateurs observent simultanément l'azimut, la hauteur et l'heure, et peuvent construire des tables de déviation pour les différents caps sous lesquels le navire est susceptible de naviguer. Mais non seulement ces tables, si laborieusement calculées, ne peuvent pas servir pour d'autres navires, mais encore elles deviennent inexactes, et partant, inutiles, dès que le navire change sensiblement de latitude.

On a proposé beaucoup de dispositions plus au moins efficaces pour mettre les navigateurs à l'abri des déviations du compas. M. Arson, in-

génieur en chef de la Compagnie du gaz, à Paris, a combiné un système de compensateurs très curieux ; son appareil a pour effet d'obliger la cause perturbatrice à corriger elle-même les perturbations de l'aiguille.

M. Dubois, professeur d'hydrographie à l'École navale de Brest, a présenté une autre solution de ce problème capital, au moyen d'un appareil basé sur des principes de mécanique ; M. Tilley, ingénieur-opticien anglais, a également construit un instrument dans le but de faciliter les corrections de route. Nous ne pouvons entrer, sur cet objet, dans des détails qui sortent de notre cadre ; il nous suffit de les indiquer.

Nous ne parlerons donc ni des procédés employés pour déterminer les déviations de la boussole en établissant, par des expériences comparées, en rade et à terre, des tables de déviations de la boussole de tel ou tel navire, ni de la plaque d'acier proposée par Barlow, qui, placée dans un certain point du navire, compenserait les autres influences, ni du *loch-boussole* de M. Faye, avec lequel on aurait la direction exacte de l'aiguille en lançant la boussole en mer, hors de l'influence des objets placés à bord du navire, ni du moyen proposé par M. Evans Hopkins pour détruire le magnétisme du bord par une désaimantation artificielle de la coque et des poutres transversales.

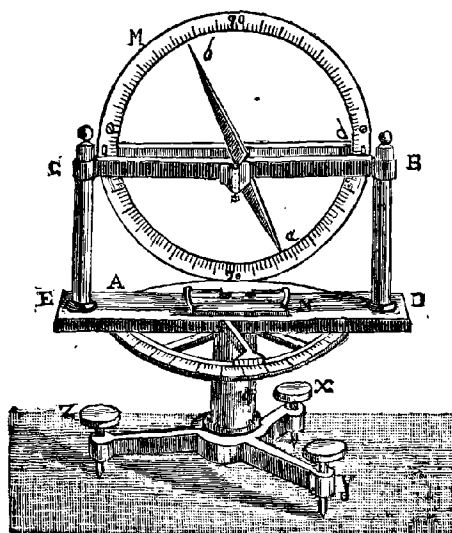


Fig. 62. — BOUSSOLE D'INCLINAISON.

**BOUSSOLE D'INCLINAISON.** Cette boussole (*fig. 62*) se compose d'un cercle vertical *M*, en cuivre, dont le limbe est divisé, et au centre duquel est un axe horizontal qui soutient l'aiguille *ab* par son centre de gravité. Ce cercle et l'axe de l'aiguille sont supportés par un cadre *BCDE*, lequel est mobile sur un cercle horizontal *A* qui soutient le pied de l'appareil. Trois vis calantes, *xyz*, et un niveau à bulle d'air *N* servent à placer le cercle *A* dans le plan de l'horizon. Le cercle vertical *M* doit toujours être tourné dans la direction du méridien magnétique lorsqu'on veut observer l'inclinaison. L'angle *dca*, que forme alors l'aiguille, donne l'inclinaison cherchée.

**BOUSSOLE DES INTENSITÉS.** — Cet appareil (*fig. 63*) se compose d'une boîte cylindrique en bois DD, recouverte d'une glace, au centre de laquelle s'élève un tube de verre B; dans la boîte se trouve l'aiguille aimantée F. A l'extrémité supérieure de ce tube est adapté un petit treuil A, destiné à enrouler le fil de suspension, et qui se compose d'une vis horizontale passant par deux petites traverses verticales. Dans l'intérieur de la boîte est fixé à demeure un arc de cercle en ivoire, ayant une amplitude de 60°, et divisé en degrés. La surface cylindrique est percée de

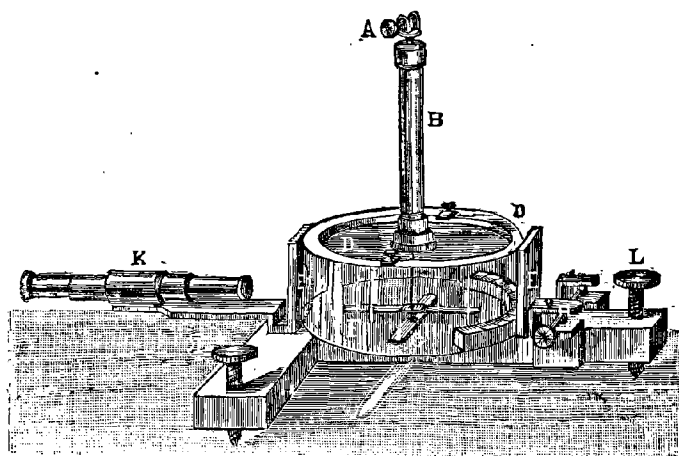


Fig. 63. — BOUSSOLE DES INTENSITÉS.

deux ouvertures EE, diamétralement opposées et correspondantes au 0° de l'arc. Ces deux ouvertures, qui sont fermées par deux plaques de verre, servent à observer les oscillations de l'aiguille au moyen d'un microscope K. Ce microscope glisse dans un cylindre horizontal et peut être rapproché ou éloigné, de manière à le placer au point de vue de l'observateur. A l'extrémité du microscope est une vis de rappel H, destinée à faire coïncider le centre des oscillations avec le point de croisement des fils du microscope. Dans l'intérieur de la boîte se trouve un double levier G, destiné à faire dévier l'aiguille d'un angle donné. Ce levier est muni aux deux extrémités de deux petits cylindres verticaux, au moyen desquels on entraîne l'aiguille. Ce levier se meut au moyen d'un bras I placé au-dessous. L'appareil repose sur un trépied muni de trois vis calantes LLL.

Il n'y a pas de niveau dans cet appareil, parce qu'au moyen des trois vis, on peut déplacer le point de suspension du fil, de sorte que ce point se trouve au centre de l'arc de cercle de suspension. On commence par

desserrer deux petites pinces à vis, situées sur la boîte, lesquelles permettent d'enlever le couvercle et le tube. On attache, à la place de l'aiguille aimantée, au fil de suspension qui porte un petit crochet, une plaque de laiton exactement du poids de l'aiguille, afin de détruire la torsion du fil, puis on remet l'aiguille à la place de la plaque. On se sert ensuite du bras du levier pour dévier l'aiguille d'un nombre donné de degrés. On compte les oscillations à l'œil quand elles sont grandes, ou en l'armant d'une lunette, si l'on craint que la chaleur du corps n'influe, ou bien on emploie le microscope si elles sont petites. Or, lorsqu'une aiguille aimantée, horizontale, est dans sa position naturelle d'équilibre, si on l'en écarte, elle y revient en effectuant une suite d'oscillations dont la durée dépend de la résultante des forces magnétiques terrestres dans le lieu où l'on opère, et du degré de magnétisme de l'aiguille. On se sert du temps employé par cette aiguille pour effectuer une oscillation, quand son magnétisme ne change pas, pour déterminer l'intensité de cette résultante; à cet effet, on fait usage de la formule du pendule (*Pesanteur*, page 114), attendu que l'aiguille qui oscille sous l'influence du magnétisme terrestre se trouve dans les mêmes conditions qu'un pendule oscillant sous l'action de la pesanteur.

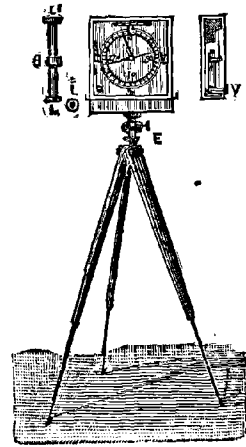


Fig. 64. — BOUSSOLE  
D'ARPEUR.

**APPLICATIONS DIVERSES DES BOUSSOLES.** — Outre son usage dans la navigation, la boussole est employée dans diverses circonstances. Au sein d'une forêt épaisse, on peut retrouver son chemin; au fond des mines, les ouvriers n'ont aucun autre moyen que la boussole pour se diriger à travers leurs galeries dans un sens donné. Les géologues ont des boussoles de poche de la dimension d'une grosse montre, pour reconnaître le gisement des montagnes, des vallées et des collines; les arpenteurs l'utilisent pour déterminer les angles d'un polygone, mais alors elle prend une forme particulière (fig. 64). Une aiguille, mobile sur un pivot, peut parcourir les divisions d'un cercle horizontal. Ce cercle est au fond d'une boîte peu profonde que recouvre un cercle en verre, de telle sorte que le couvercle s'oppose à ce que la chape de l'aiguille puisse quitter complètement le pivot. La boîte est fixée à une planche et supportée par un pied à trois branches au moyen d'un genou à coquille E. Les divisions du cercle gradué sont telles, que la ligne 0° à 180° soit parallèle à l'un des côtés de la

planchette. Parallèlement à cette ligne est fixée, sur le bord de la planchette, une lunette LL', mobile autour de l'axe horizontal H qui est dans le prolongement du diamètre du cercle, lequel passe par la ligne 270° à 90°. Deux niveaux à bulle d'air permettent d'établir le plan de l'appareil horizontalement. Pour mesurer un angle horizontal avec la lunette, on tourne la boîte de façon que la ligne NS coïncide avec la direction de l'aiguille; on tourne ensuite la boîte jusqu'à ce qu'on vise dans la direction de l'un des côtés de l'angle à mesurer; la division du cercle vis-à-vis de laquelle l'aiguille est arrêtée est l'*azimut magnétique* du premier côté de l'angle; on détermine de même l'azimut du second côté. La différence des deux azimuts exprime la valeur de l'angle mesuré.

Pour les reconnaissances militaires, on se sert aussi de petites boussoles, peu exactes, il est vrai, puisqu'à une installation fixe est substituée une observation à la main; mais suffisantes pour le but que l'on se propose.

La Société royale des sciences d'Upsal a publié cette année un intéressant travail de M. l'ingénieur Thalen, relatif à la recherche des mines de fer par des observations magnétiques. On fait usage, en Suède, de la *boussole des mineurs* pour constater l'existence des minerais de fer et pour trouver la place qu'ils occupent. Cette boussole se compose d'une petite aiguille aimantée contenue dans une boîte hermétiquement fermée. L'aiguille se meut librement sur son point d'appui; elle reste dans une position horizontale sous l'action magnétique de la terre seule. Lorsqu'on soupçonne l'existence d'une mine de fer, on observe l'inclinaison de cette aiguille en différents points, et l'on admet que la richesse maximum de minerai magnétique est au-dessous du point où l'aiguille se place verticalement. Mais M. Thalen a montré que ce rapport n'est pas généralement vrai. Ce moyen ne donne d'ailleurs aucune indication sur la profondeur du gisement, ni sur la masse du minerai.

Voici la méthode proposée par M. Thalen pour réaliser ces *desiderata*. On se sert d'une *boussole de déclinaison* et d'un aimant, placé convenablement et invariablement relativement à l'aiguille. L'angle de déviation produit par cet aimant est mesuré en des points rapprochés autant que possible, et régulièrement espacés au-dessus du point où l'on suppose la mine. On détermine ainsi partout la composante horizontale de l'action combinée de la force du magnétisme terrestre et de celle du minerai. Ensuite, sur un plan de terrain métallifère, on trace des lignes d'égale intensité ou *isodynamiques*, disposées en deux séries de courbes fermées, entourant les deux points qui répondent à la plus grande et à la plus pe-

tite déviation. Une ligne non fermée se trouve entre ces deux points : c'est la *ligne neutre*, correspondant aux points où l'influence magnétique du minerai est nulle. La ligne qui joint les deux points de l'angle maximum et du minimum de déviation indique la direction de la *méridienne magnétique* de la mine. La ligne neutre donne généralement la direction de la couche du minerai. Dans le plus grand nombre des cas, l'intersection de ces deux lignes indique le point où se trouve la richesse maximum du minerai.

Enfin, citons encore le parti que l'on pourrait tirer de l'aiguille aimantée pour prédire les tempêtes. Le barreau aimanté, à l'approche d'un mauvais temps, éprouve des oscillations caractéristiques. L'aiguille aimantée est notamment en avance sur le baromètre, quand un cyclone doit aborder nos côtes par son cercle dangereux ; la baisse du baromètre ne peut survenir que vingt-quatre heures à l'avance ; les mouvements de l'aiguille se produisent plus de trente-six heures avant l'arrivée de la bourrasque. A l'observatoire de Montsouris, on a pu ainsi prédire l'arrivée de quelques tempêtes. L'existence de relations plus ou moins directes entre les mouvements de l'aiguille aimantée et les variations du temps a été admise depuis le commencement du siècle, par divers météorologistes. Aux États-Unis, en Angleterre, divers savants, et en France M. Marié-Davy, relèvent soigneusement ces coïncidences ; on pourra certainement bientôt savoir dans quelles limites on doit compter sur la boussole pour la prévision du temps.

**DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME TERRESTRE.** — Quoique les navigateurs hollandais, entre autres, eussent établi, dès 1599, des tables des variations, ce fut, paraît-il, Hillibrand qui, en 1625, observa avec soin à Londres la *déclinaison* de l'aiguille. Un peu plus tard, en 1698, rapporte M. Radau, le célèbre Halley obtint du roi Guillaume III un navire avec lequel il partit pour un grand voyage, afin de déterminer la position géographique des colonies anglaises et de recueillir des observations magnétiques. Au bout de six mois, on le voit revenir ; tout son équipage avait été malade après qu'on eut passé la ligne, et son lieutenant s'était révolté. Halley reprit la mer ; il revint en 1700 avec une riche moisson d'observations. En y ajoutant celles qui lui étaient fournies par d'autres observateurs, il se crut autorisé à établir, comme faits généraux, que dans toute l'Europe la *déclinaison* de l'aiguille est occidentale ; que, sur le littoral de l'Amérique du Nord, près de la Virginie, dans la Nouvelle-Angleterre et le Newfoundland, elle est également occidentale, et qu'elle augmente à mesure qu'on avance vers le nord, si bien que, dans la baie d'Hudson, elle

est de 30°, dans la baie de Baffin, de 57°, mais qu'elle diminue à mesure qu'on avance plus à l'est de ces régions. De ces faits, Halley conclut qu'il existe quelque part, entre l'Europe et les parties septentrionales de l'Amérique, une ligne au delà de laquelle la déclinaison de l'aiguille cesse d'être occidentale et où elle devient orientale. Les observations faites à Sainte-Hélène, au Pérou, au Chili, etc., le confirmèrent dans cette manière de voir, et il parvint à élever, le premier, l'hypothèse que *notre terre est un aimant avec ses pôles et son équateur*. C'est de cette hypothèse que date le *magnétisme terrestre*.

Il eut alors, le premier encore, l'idée féconde de réunir par des lignes les points d'*égale déclinaison*, et il établit ainsi les premières cartes de distribution du magnétisme terrestre. Plus tard, Mountain, et Desdan en 1740, Wilke en 1768, Hansteen (1) en 1819, publièrent de nouvelles cartes semblables rectifiées. Barlow, en 1830, et le capitaine de vaisseau Duperrey, à la même époque, ont donné les plus récentes et les plus exactes.

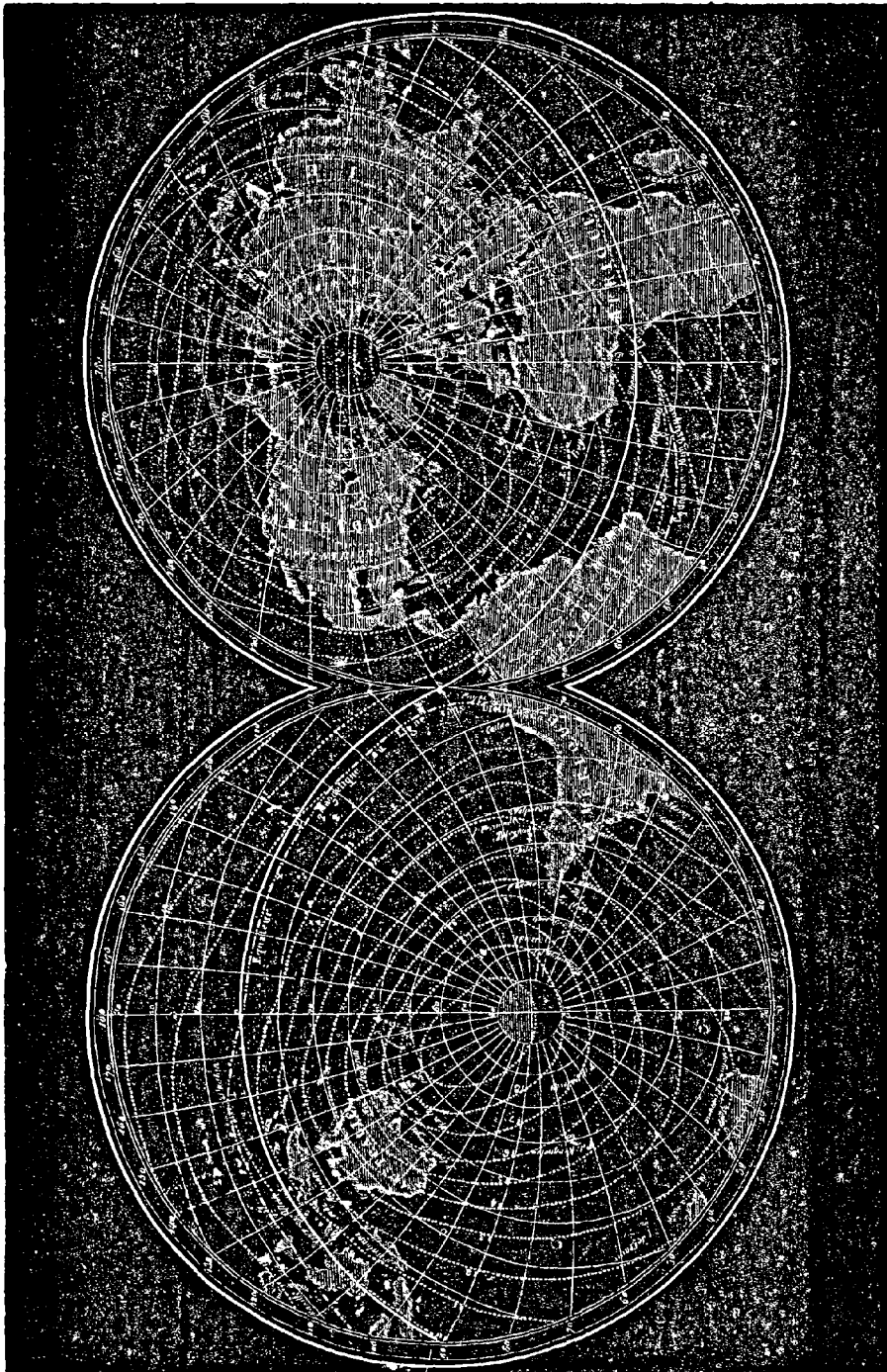
De même que les déclinaisons, les *inclinaisons* observées dans les divers lieux du globe peuvent être représentées d'une manière synoptique par un système de courbes reliant les points où l'inclinaison est la même. Pendant longtemps, on ignora l'inclinaison de l'aiguille aimantée; quand on la voyait s'abaisser plus d'un côté que de l'autre, on l'attribuait à ce que le centre de gravité de l'aiguille était mal déterminé. En 1576, Robert Norman, fabricant d'instruments, dans un des faubourgs de Londres, s'étant avisé de mesurer le poids nécessaire pour rétablir l'horizontalité complète d'une aiguille aimantée, trouva que ce poids n'était pas en rapport avec la différence de longueur des deux branches de l'aiguille, et que, par conséquent, cette inclinaison était provoquée par une autre cause que l'inégalité de poids entre les deux côtés de l'aiguille. Il imagina alors le premier une aiguille verticale pour arriver à déterminer la longitude sur mer, au moyen de la boussole. Noël, Pound, Cunningham, Feuillée, etc, découvrirent ensuite les mouvements de l'aiguille d'inclinaison.

L'élément le plus important du magnétisme terrestre, *l'intensité*, fut connu le dernier.

En examinant, en 1723, les oscillations de son compas d'inclinaison, Graham se demanda si ces oscillations obéissaient à une force constante,

(1) HANSTEEN (Christopher), professeur de physique à Christiania (1774-1873). Pendant un demi-siècle, il occupa sa chaire à l'université de Norvège et étudia spécialement le magnétisme terrestre. En 1819, il fit paraître un grand ouvrage sur cette branche de la science; mais, obligé d'éditer l'ouvrage à ses frais, il ne put le continuer et dut s'en tenir à la publication du premier volume. Ses travaux postérieurs ont paru dans les divers recueils consacrés aux recherches physiques.





Configuration des lignes isodynamiques (page 171).



analogue à la pesanteur dans les oscillations du pendule, et il conclut négativement. Mallet, en 1769, trouvait que le nombre des oscillations était le même à Saint-Pétersbourg, sous  $59^{\circ} 56'$  de latitude septentrionale, et à Ponoï, sous  $67^{\circ} 4'$  de latitude septentrionale.

Il concluait de là que l'intensité était la même dans toutes les zones, et cette opinion erronée se propagea jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Avec des instruments plus parfaits, Paul Lamanon, compagnon, ainsi que Borda, de La Peyrouse, dans son célèbre voyage de circumnavigation, en 1780, réussit à constater les variations de l'intensité magnétique avec la latitude magnétique. Les détails de ces observations, il les envoya, de Macao, à Condorcet, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences ; mais ces détails ont été perdus. Cinq ans après, de Rossel, parti avec l'amiral d'Entrecasteaux à la recherche de La Peyrouse, constata aussi ces variations ; mais ses observations ne furent publiées qu'en 1808, quand de Humboldt eut, de son côté, découvert cette loi pendant son voyage dans les régions équinoxiales de l'Amérique (1798-1803). Sabine, Gay-Lussac, Oltmans, Scoresby, Quetelet (1), Erman, Keepfer, Lamont, Airy, etc., élucidèrent et coordonnèrent tous les éléments trouvés dans ce genre de recherches, et leurs travaux permirent de dresser aussi une carte des points d'égale *intensité magnétique* du globe.

Les courbes tracées sur les cartes pour mettre en évidence la distribution du magnétisme terrestre sont appelées *lignes isodynamiques* ou *isodynames*, *lignes isocliniques* ou *isoclines*, *lignes isogoniques* ou *isogones*.

Les *lignes isodynames* réunissent tous les points où l'*intensité magnétique* est la même (carte à la page 169). Il y a trois points d'intensité maximum : deux dans l'hémisphère boréal ; un près de la baie d'Hudson, l'autre dans le nord de la Sibérie, enfin le troisième dans l'hémisphère austral. Il y a deux points où l'intensité est minimum, l'un entre le Brésil et l'Afrique, l'autre près des îles Mulgraves (Polynésie). Les *lignes isodynames* coupent la France sous un angle de  $28^{\circ}$  environ, en courant de l'est à l'ouest ; l'intensité maximum se trouve dans le Pas-de-Calais, l'intensité minimum vers les Pyrénées-Orientales.

Les *lignes isoclines* passent par les points où les inclinaisons magné-

(1) QUETELET (Lambert-Adolphe-Jacques), savant astronome belge (1796-1874), professeur de mathématiques à Bruxelles en 1819, puis membre de l'Académie des sciences et secrétaire perpétuel, directeur de l'Observatoire de cette ville. Il s'est particulièrement occupé de météorologie et d'électricité. Ses travaux nombreux ont été recueillis dans les *Archives de l'électricité* et dans les *Archives des sciences physiques de Genève*. C'est à lui que la Belgique doit la création de l'université belge et de l'Observatoire. Il prit une part active au mouvement libéral d'idées philosophiques qui devait produire l'émancipation de la Belgique. Il s'est aussi adonné aux sciences sociales et a publié une *Physique sociale* (1866), une *Théorie des probabilités appliquées aux sciences morales et politiques*, etc.

tiques sont égales; la plus remarquable est l'*équateur magnétique*, où l'inclinaison est nulle. Les lieux où l'inclinaison est de  $90^\circ$  sont les *pôles magnétiques* : l'un est dans l'hémisphère boréal, au nord de la baie d'Hudson; l'autre, dans l'hémisphère austral, près des côtes de la Nouvelle-Hollande. Les *lignes isoclines* coupent la France sous un angle de  $22^\circ$ .

Les *lignes isogones* réunissent tous les points où la déclinaison est la même. Parmi elles, deux sont remarquables : ce sont les lignes où la déclinaison est nulle; on peut les regarder comme le prolongement l'une de l'autre; l'une traverse le continent américain de la mer d'Hudson à la Caroline-du-Sud, de l'embouchure des Amazones à Rio-de-Janeiro; l'autre, moins régulière, coupe l'Australie, s'incurve à l'ouest de l'Hindoustan, et remonte par le golfe Persique, la mer Caspienne, l'Oural, jusqu'à la mer Blanche. Deux lignes sans déclinaison partagent le globe en deux parties; celle qui renferme l'Europe et l'Afrique a toutes ses déclinaisons magnétiques occidentales, tandis que dans l'autre elles sont orientales. Il existe en Asie une portion elliptique isolée d'une ligne sans déclinaison, qui enveloppe un espace dans lequel la déclinaison est occidentale. Les *lignes isogones* coupent la France du sud au nord-est.

M. Duperrey emploie un autre système bien plus naturel : c'est celui des *parallèles et des méridiens magnétiques*. Pour construire un méridien, on observe en un lieu l'aiguille de déclinaison, on se transporte dans le prolongement de cette direction, on fait une nouvelle observation et on se transporte dans la nouvelle. La succession de ces directions tracée sur une carte forme une ligne polygonale à laquelle on circonscrit une ligne courbe qui est un méridien magnétique. Toutes les lignes perpendiculaires à la succession des méridiens magnétiques sont des parallèles magnétiques. Les méridiens tracés ainsi se rapprochent beaucoup de grands cercles de la sphère. Les parallèles magnétiques diffèrent peu de petits cercles; l'un d'eux diffère peu de l'équateur magnétique.

**VARIATIONS DES COMPOSANTES DE LA FORCE MAGNÉTIQUE DU GLOBE.**  
**— VARIATIONS RÉGULIÈRES DE LA DÉCLINAISON.** — La déclinaison de l'aiguille aimantée est soumise à des variations séculaires, annuelles, mensuelles et diurnes, qu'on peut considérer comme régulières, et à des variations irrégulières qui se montrent dans certaines circonstances atmosphériques ou terrestres, telles que les aurores boréales et les tremblements de terre.

1° *Variations séculaires.* — Dès 1550, on observa des variations annuelles et séculaires de la déclinaison; mais on pensait que ces changements provenaient seulement de l'imperfection des moyens d'obser-

vation. Ce fut Hellibrand en 1625, puis le P. Tachard en 1683, qui, les premiers, par une suite d'observations longues et continues, démontrèrent que ces variations s'accomplissaient, et même d'une façon très peu uniforme, comme on peut en juger par le tableau suivant des maxima de déclinaison constatés à Paris depuis 1580 :

ANNÉES.	DÉCLINAISONS.	ANNÉES.	DÉCLINAISONS.	ANNÉES.	DÉCLINAISONS.
1580	119,30' Est.	1814	22°,34' (max.)	1828	22°,6'
1618	8°,00'	1816	22°,25'	1829	22°,12'
1666	0°,00'	1817	22°,19'	1832	22°,3'
1678	1°,39' Ouest.	1818	22°,22'	1835	22°,4'
1700	8°,10'	1819	22°,20'	1849	20°,34'
1767	19°,16'	1862	23°,11'	1850	20°,31'
1780	19°,55'	1823	22°,23'	1851	20°,25'
1795	22°,00'	1824	22°,23'	1864	18°,56'
1805	22°,5'	1825	22°,22'	1874	17°,30'
1813	22°,28'	1827	22°,20'	1879	16°,56'

Par une coïncidence bizarre, l'aiguille aimantée était dirigée vers le vrai nord à l'époque où l'Académie des sciences commençait à tenir ses séances, vers 1666, et, à partir de ce moment jusqu'au premier quart du XIX<sup>e</sup> siècle, elle a été constamment en s'éloignant, en se tournant du côté du nord-ouest. A l'époque où Ampère, Biot et Arago faisaient leurs grandes découvertes électro-magnétiques, l'aiguille faisait avec le méridien astronomique de Paris un angle d'environ 22°. Pendant les cinquante et quelques années qui se sont écoulées depuis lors, elle s'est rapprochée d'environ 5°, et elle fait actuellement environ 17° seulement. La vitesse moyenne du rapprochement est estimée à 9" de degré.

M. Marié-Davy a donné, dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* (1) de 1880, des détails intéressants relatifs à la carte magnétique de France. D'après cette carte, les méridiens magnétiques de la France peuvent être considérés comme inclinés d'une quinzaine de degrés sur les méridiens astronomiques, de manière que le pôle nord soit dirigé vers l'ouest.

(1) L'*Annuaire du Bureau des longitudes* est un livre publié chaque année, depuis 1796, par les membres de l'Institut et qui contient un certain nombre d'observations astronomiques et météorologiques extraites de la *Connaissance des temps*, des articles de statistique, des tables où sont consignés les résultats usuels de la physique et des notices sur les faits intéressants de la science accomplis dans l'année. La *Connaissance des temps* est un recueil annuel, publié pour la première fois en 1679 par l'astronome Picard, et, depuis 1795, par le Bureau des longitudes, et donnant, à l'usage des savants, des marins, des ingénieurs, etc., les positions du soleil, de la lune, des planètes, ainsi que des principales étoiles, à certaines époques périodiques, ce qui dispense de faire le calcul des formules exprimant les mouvements des astres.

L'angle des deux méridiens augmente sensiblement à mesure que l'on marche vers l'ouest. En outre, la déclinaison va en augmentant assez régulièrement à mesure que l'on se déplace dans ce sens. Or, au 1<sup>er</sup> janvier 1879, elle était à Brest de 20°, c'est-à-dire ce qu'elle était à Paris en 1854; et, vers les frontières de l'Est, de 15°, ce qu'elle sera dans une cinquantaine d'années à Paris, si le mouvement continue avec la vitesse moyenne qu'elle possède actuellement.

2° *Variations annuelles.* — Ces variations, qui semblent se rattacher à la position du soleil à l'époque des *équinoxes* et des *solstices*, ont été découvertes par Cassini. Il résume ses observations en ces termes :

« A partir du mois d'avril et jusqu'au commencement du mois de juillet, c'est-à-dire pendant tout le temps qui s'écoule entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été, la déclinaison diminue. Après le solstice d'été et jusqu'à l'équinoxe du printemps suivant, l'aiguille reprend son chemin vers l'ouest, de manière qu'en octobre, elle se retrouve, à fort peu de chose près, dans la même direction qu'en mai. En octobre et en mars, le mouvement occidental est plus petit que dans les trois mois précédents. Il résulte de là que, pendant les trois mois qui se sont écoulés entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été, l'aiguille a rétrogradé vers l'est, et que, dans les neuf mois suivants, sa marche générale, au contraire, s'est dirigée vers l'ouest. »

3° *Variations diurnes.* — Signalées par Hellibrand, à Londres, en 1634, par le P. Tachard, en 1682, à Louvo, dans le royaume de Siam, observées soigneusement, en 1722, par Graham et par Celsius et Hicorter, à Upsala, les variations diurnes n'ont été l'objet d'études suivies qu'à notre époque, depuis le général Sabine et de Humboldt. En Europe, l'extrémité boréale de l'aiguille horizontale marche tous les jours de l'est à l'ouest, depuis le lever du soleil jusque vers une heure après midi, et retourne ensuite vers l'est par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre, à très peu près, vers dix heures du soir, la position qu'elle occupait le matin; pendant la nuit, l'aiguille est presque stationnaire, et recommence le lendemain ses excursions périodiques.

Les *variations diurnes* sont attribuées à l'échauffement du sol, en supposant que la terre soit magnétique et que son action attractive sur l'aiguille aimantée augmente quand le sol est moins chaud. L'action solaire agissant sur l'est avant l'ouest, l'aiguille se dirigera vers l'ouest lorsque le soleil sera à l'orient, et vers l'est quand cet astre sera passé à l'occident. Il en serait de même pour les *variations annuelles*, puisque le maximum de déviation occidentale est dans la saison chaude, et le mi-

nimum oriental dans la saison froide. Quant aux *variations séculaires*, elles sont dues, sans doute, à des phénomènes encore inconnus qui se passent à l'intérieur du globe.

**VARIATIONS DE L'INCLINAISON.** — Comme la déclinaison, l'*inclinaison* est soumise à des variations séculaires, annuelles et diverses; mais les lois de ces variations, étudiées particulièrement par de Humboldt, Arago et Hansteen, ne sont pas encore assez connues pour qu'il y ait intérêt à les présenter ici. Cependant on a fini par comprendre la nécessité de poursuivre à ce sujet des observations simultanées sur un grand nombre de points, et l'on a commencé à établir des observatoires permanents distribués dans toutes les parties du globe. L'Angleterre a aujourd'hui des observatoires bien installés à Greenwich et à Kew, Dublin, Stonyhurst, Toronto (Canada), Sainte-Hélène, cap de Bonne-Espérance, Hobarton (Van-Diémen), Madras, Bombay. La Russie en possède à Saint-Pétersbourg, Kasan, Cathérinenbourg, Barnaoul, Pékin. Citons encore Paris, Montsouris, Marseille, Bruxelles, Rome, Prague, Munich, Cambridge (États-Unis). Il est admis que l'inclinaison pendant l'été est d'environ 15' plus forte que pendant l'hiver, et d'environ 4' ou 5' plus grande avant midi qu'après.

**VARIATIONS DE L'INTENSITÉ.** — Hansteen paraît être un des premiers qui aient recherché les variations diurnes et annuelles auxquelles l'*intensité* des forces magnétiques terrestres est soumise. Pour étudier ces variations, il s'est servi d'une aiguille cylindrique en acier, de 64 millimètres de long et de 2 millimètres de diamètre; cette aiguille était suspendue à un fil de soie sans torsion, et renfermée dans une boîte au fond de laquelle se trouvait un arc divisé, destiné à mesurer l'amplitude des variations. Or, on sait que *les intensités sont en raison inverse du carré du temps des oscillations*. On peut prendre pour unité l'une quelconque des durées, et exprimer les autres en fonction de celle-là. En mettant cette règle en pratique, Hansteen a obtenu les résultats suivants : 1° L'intensité magnétique est soumise à des variations diurnes; 2° le minimum de cette intensité a lieu entre 10 et 11 heures du matin, et le maximum entre 4 et 5 heures de l'après-midi; 3° les intensités moyennes mensuelles sont elles-mêmes variables; 4° l'intensité moyenne, vers le solstice d'hiver, surpasse beaucoup l'intensité moyenne donnée par des jours semblablement placés relativement au solstice d'été; 5° les variations d'intensité moyenne d'un mois à l'autre sont à leur minimum en mai et en juin, et à leur maximum vers les équinoxes.

Signalons ici une question, grosse de conséquences, et qui préoccupe sérieusement aujourd'hui les physiciens. On ignore complètement encore si le magnétisme varie quand on s'élève dans l'atmosphère et, pour le savoir, il faut évidemment procéder à des expéditions aériennes nouvelles, qui seraient inutiles si l'on n'y procédait avec des aérostats perfectionnés, construits avec un soin comparable à celui du grand ballon captif de l'exposition de 1878 et pourvus d'une série complète d'appareils et d'instruments.

Puisque le magnétisme d'un aimant diminue quand on augmente sa température et qu'on peut lui faire subir une diminution notable en le portant à la chaleur rouge, il a semblé naturel d'en tirer la conclusion que le froid augmentait son action magnétique. « Les observations d'intensité, dit M. Lamé dans son *Cours de physique de l'École polytechnique*, faites à différentes hauteurs au-dessus du niveau des mers par M. de Humboldt dans les Andes et dans les Cordillères, et par M. Keepfer dans les montagnes du Caucase, paraissent mettre hors de doute le fait du décroissement de l'intensité magnétique dans les lieux élevés. Lors de leur voyage aérostatique, MM. Gay-Lussac et Biot ont cependant trouvé que ce décroissement était insensible; mais les changements que subit le magnétisme des aimants, par suite des variations de la température, expliquent ce résultat, car les régions élevées de l'atmosphère étant beaucoup plus froides que la surface de la terre, le barreau oscillant devait avoir acquis un excès de magnétisme qui a pu compenser ou déguiser la diminution réelle de l'action magnétique du globe. »

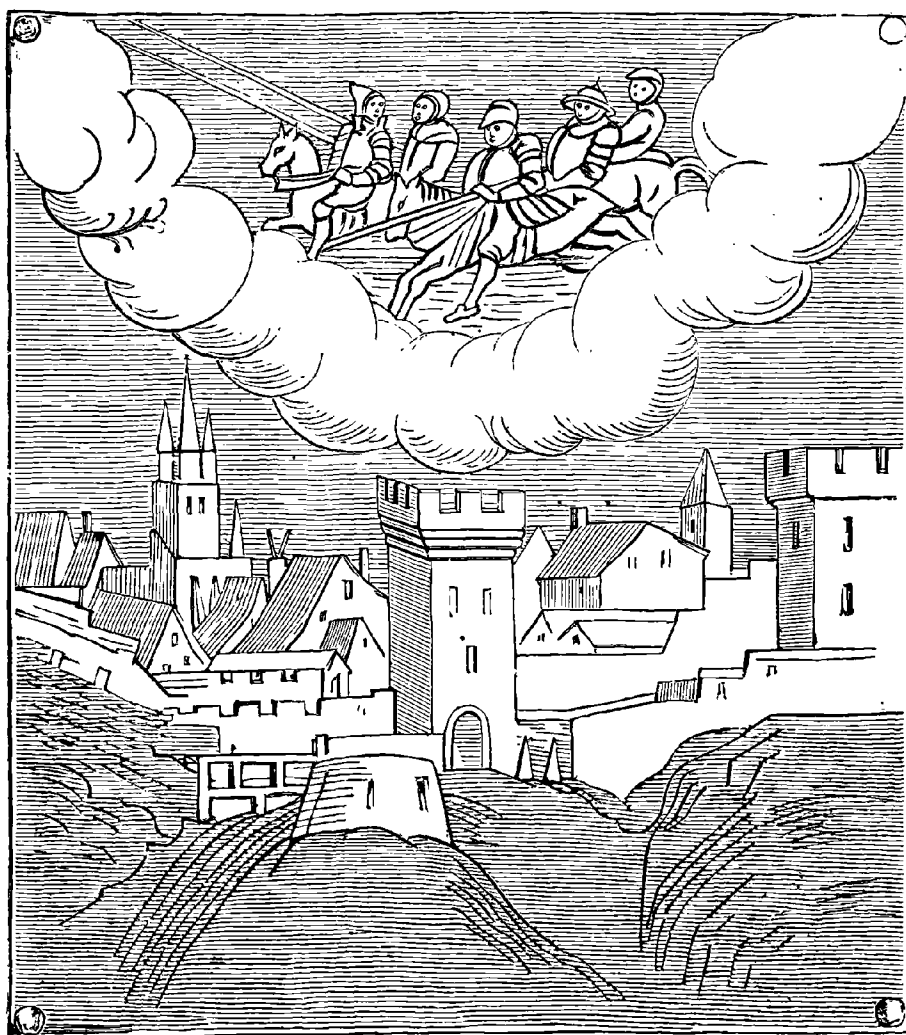
Lorsque, en 1803, Robertson exécuta son ascension (*Pesanteur*, page 372), il annonça dans son rapport à la Société galvanique de Paris qu'il avait trouvé que le pouvoir magnétique de la terre avait diminué à la hauteur de 4 à 5,000 mètres qu'il avait atteinte. Cette annonce, qui produisit une certaine émotion dans le monde savant, fut une des causes principales de l'ascension que Biot et Gay-Lussac, et plus tard Gay-Lussac seul, exécutèrent en 1804.

Les conclusions de Gay-Lussac, telles qu'elles sont exposées dans son rapport officiel, inséré dans le *Moniteur* de l'an XII, furent contraires à celles de Robertson. Il déclarait qu'il n'avait constaté aucune différence dans les observations faites à la plus haute altitude et celles qu'il avait faites à terre, et la question fut considérée comme ayant été tout à fait réglée par cette expérience. On voit qu'il est nécessaire, au contraire, de renouveler les expériences.

**VARIATIONS IRRÉGULIÈRES DE LA DÉCLINAISON.** — Le magnétisme



terrestre est dans un état continuel d'agitation, comme les flots de la mer. Cela est démontré par les observations de MM. Gauss et Weber en particulier. A côté des grands *orages magnétiques*, comme les appelle M. de



Les aurores boréales d'après le livre de Lycosthène (page 180).

Humboldt, qui se font sentir d'un pôle à l'autre, il existe aussi des tempêtes locales qui ne s'étendent que sur des surfaces restreintes, et qui produisent des perturbations magnétiques profondes que les marins désignent sous le nom d'*affolements* de l'aiguille.

Quelques remarques particulières intéressantes doivent être présentées sur cet objet.

En général, les vents les plus violents restent sans influence sur l'aiguille aimantée; les orages ordinaires ne l'affectent pas davantage. Les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, paraissent au contraire souvent s'accompagner des perturbations magnétiques. Bernoulli, en 1767, vit l'inclinaison diminuer d'un demi-degré à la suite d'une secousse terrestre. A. de Humboldt a également constaté que l'inclinaison de l'aiguille avait diminué de près d'un degré après le tremblement de terre de Cumana (4 novembre 1799). Le P. della Torre vit, pendant une éruption du Vésuve, la déclinaison changer de plusieurs degrés; de nombreuses expériences ont confirmé ces observations. Mais ce qui rend les mouvements anormaux de l'aiguille aimantée si remarquables, dit M. Becquerel, c'est le grand accord que l'on trouve jusqu'aux plus faibles nuances, en différents endroits; accord qui se montre le même dans tous les lieux d'observation, seulement avec des valeurs différentes. Ces anomalies ne paraissent être que de légers changements dans la grande force magnétique terrestre, dus probablement à des effets magnétiques du globe, ou qui ont lieu peut-être en dehors de notre atmosphère. Si l'on regarde attentivement ces perturbations, on trouve en divers endroits, dans les différents mouvements successifs, des variations considérables sous le rapport de leur grandeur, quoique d'ailleurs la ressemblance soit évidente. Ainsi, par exemple, souvent de deux saillies de courbes graphiques des perturbations dans un endroit, la première est la plus grande, et, dans un autre endroit, au contraire, c'est la seconde. On est donc forcé d'admettre que, dans le même jour et à la même heure, beaucoup de forces agissent, indépendantes peut-être les unes des autres, ayant différents sièges, et dont les actions se confondent dans des proportions fort inégales, en raison de leur position et de leur distance, ou qui peuvent s'influencer réciproquement, de manière que l'une commence à agir, quand l'autre n'a pas encore cessé. Au milieu de ce conflit, il est difficile de suivre la marche du phénomène; cependant l'on parviendra certainement à démêler ces diverses causes, lorsque la participation aux observations simultanées aura reçu une plus grande extension.

**AURORE BORÉALE.** — Le météore qui présente les rapports les plus étroits avec les perturbations magnétiques, c'est l'*aurore boréale*. On le sait, l'*aurore boréale* est un phénomène lumineux qui paraît dans le ciel, principalement la nuit et vers les pôles, ce qui le fait aussi appeler *lumière polaire*. Les anciens le connaissaient sous le nom de *torche ardente*.

On l'a appelé *aurore boréale*, en premier lieu parce qu'on l'a d'abord observé du côté du nord ou de la partie boréale du ciel, et que sa lumière, lorsqu'elle est proche de l'horizon, ressemble à celle du point du jour ou de l'aurore.

.., Le Nord, dans ses vastes domaines,  
 Contient de la clarté les plus beaux phénomènes !  
 Et qui ne connaît pas, dans ces climats glacés,  
 Ces feux par qui du jour les feux sont remplacés ?  
 Là, le pôle, entouré de montagnes de neige,  
 Conserve de ses nuits le brillant privilège,  
 Ces immenses clartés, ces feux éblouissants  
 Au sein de l'ombre obscure au loin resplendissants,  
 Qui, même avec les cieux où le jour prend naissance,  
 Rivalisent de luxe et de magnificence.

On aperçoit rarement ce phénomène dans nos climats, mais assez souvent dans les pays les plus voisins du pôle arctique, en Laponie, en Norvège, en Islande, en Sibérie, où il rompt la monotonie des longues nuits hyperboréennes. On peut dire avec raison que l'aurore boréale est le soleil de ces contrées.

Elle commence à se montrer vers 45° de latitude environ ; à partir de là, elle devient plus fréquente à mesure que l'on avance vers le pôle. On la voit dans toutes les saisons et sous toutes les formes ; souvent basse et tranquille, étendue sur l'horizon comme un nuage, ou comme une fumée légère, ayant la forme d'un arceau plein qui comprend plusieurs arcs, alternativement obscurs et lumineux, de différentes teintes de lumière et de couleur. Les aurores boréales sont plus fréquentes à l'époque des équinoxes ; cependant on n'a pu encore leur assigner une périodicité régulière.

L'aurore boréale fut observée dès la plus haute antiquité. Un passage de la Bible, dans le livre des Macchabées, prouve que les reflets lumineux, mais non méconnaissables de l'aurore boréale sont venus se montrer jusque sous le ciel de la Judée, et que ses feux gracieux ont échauffé l'imagination impressionnable des prophètes :

« On vit des hommes, montés sur des chevaux, courir dans les airs ; ils étaient armés de lances comme une bande de soldats, et des troupes de cavaliers se précipitaient au galop les unes contre les autres en faisant retentir leurs boucliers, en agitant une forêt de piques, en tirant leurs épées, en lançant leurs dards. On voyait briller les ornements d'or qui couvraient les combattants. »

On pourrait multiplier les citations prouvant que les apparitions du même genre n'ont pas été rares sous le beau ciel de l'Italie et de la Grèce. Dans les auteurs latins on trouve des détails de prodiges qui ne peuvent évidemment s'appliquer qu'à des aurores boréales :

« A Cassinium, lit-on dans *Julius Obsequens*, sous le consulat de M. Marcellus et de P. Sulpitius, on vit le soleil pendant plusieurs heures de la nuit. Le même phénomène se produisit à Pisaure, sous le consulat de T. Gracchus et de M. Leventius. Le ciel parut encore en feu sous le consulat de Scipion Nasica et de C. Martius. Sous le consulat de C. Marius et de Q. Lutatius, le jour brilla tout à coup au milieu de la nuit, en Gaule, dans le camp des Romains. Une autre fois, une lueur si intense se répandit à Rome, pendant la nuit, que les ouvriers se levèrent pour travailler, dans la persuasion que le jour était déjà commencé.

» On voit quelquefois dans le ciel, dit Pline, des torches, des lampes ardentes, des lances, des pointes enflammées dans toute leur longueur. On voit encore, et rien n'est d'un plus terrible présage, un incendie qui semble tomber sur la terre en pluie de sang, ainsi qu'il arriva la troisième année de la cent-septième olympiade, lorsque Philippe travaillait à soumettre la Grèce.

» On a vu aussi, écrit-il dans un autre endroit, des armées dans le ciel, paraissant se choquer, et tout le monde a entendu le bruit des armes et le son des trompettes. »

Lycosthène (1) a recueilli toutes les citations constatant les apparitions de ce genre, et son livre nous montre comment les artistes de son temps représentaient ce curieux phénomène (*fig.* à la page 177); car, au moyen âge comme dans l'antiquité, les aurores boréales, ainsi que toutes les choses inexplicables, étaient regardées comme des signes de la colère céleste, des précurseurs d'aventures sinistres, dont chacun faisait l'application d'après les rêves de son imagination, ses désirs ou ses craintes.

Longtemps l'erreur les crut, dans ces âpres climats,  
Le reflet des glaçons, des neiges, des frimas,  
Des esprits sulfureux exhalés de la terre,  
Qui présageaient la mort, la discorde ou la guerre,  
Et jusque sur le trône épouvantaient les rois.

Accoutumés à ce spectacle, les Lapons, les Groenlandais, les Kamtschadales n'en sont point émus. Les Groenlandais, qui font jouer aux boules

(1) LYCOSTHÈNE, pseudonyme de WOLFFHART (Conrad), savant alsacien (1518-1561), diacre de Saint-Léonard, à Bâle, où il professait la grammaire et la dialectique. Il a donné de savantes éditions d'auteurs latins et quelques ouvrages, parmi lesquels le plus célèbre est son *Prodigiorum et ostentorum chronicon*.

les âmes heureuses dans leur paradis, croient que ces grandes scènes de la nature sont les danses de ces mêmes âmes ; mais les chrétiens avides de pénitence sont effrayés. Vers la fin du xvi<sup>e</sup> siècle, à la suite de quelques aurores boréales, des troupes de dix à douze mille pénitents vont en pèlerinage à Notre-Dame de Reims et de Liesse, *pour signes vus au ciel et feux en l'air*. Des villages, avec leurs seigneurs, viennent faire *leurs prières et leurs offrandes à la grande église de Paris*, émus, dit le journal de Henri III, *à faire tels pénitentioux voyages* par les mêmes objets. Les chroniqueurs du moyen âge parlent tous d'armes sanglantes aperçues dans le ciel, comme d'un présage de grands fléaux.

Gassendi vit le premier ce phénomène avec les yeux d'un philosophe ; il l'observa plusieurs fois, et notamment le 12 septembre 1621. Ce fut alors qu'il le décrivit et lui donna le nom d'*aurore boréale*.

L'aurore boréale a été décrite bien souvent en prose et en vers, Delille s'écrie :

Ils glissent en reflets, s'échappent en lingots,  
 Ou d'une mer de feu roulent au loin les flots.  
 Ici blanchit l'argent et là jaunit l'opale ;  
 Là se mêle à l'azur la pourpre orientale ;  
 Tantôt en arc immense ils prennent leur essor,  
 Roulent en chars brillants, flottent en drapeaux d'or,  
 S'élançant quelquefois en colonnes superbes,  
 S'entassent en rochers ou jaillissent en gerbes,  
 Et, varient le jeu de leurs reflets divers,  
 De leur pompe changeante étonnent ces déserts.

Ampère, le fils de l'illustre physicien, donne cette description d'une aurore boréale qu'il a contemplée :

« Nous aperçûmes tout à coup une lueur vague et blanchâtre répandue dans le ciel. Nous nous demandions si c'était une nuée éclairée par la lune ; mais c'était quelque chose de moins compact encore, de plus indécis : on eût dit la voie lactée ou une lointaine nébuleuse. Tandis que nous hésitions, un point lumineux se forma, s'étendit d'une manière indéterminée, et on vit tout à coup de grandes gerbes, de longs glaives, d'immenses fusées dans le ciel ; puis toutes ces formes se confondaient, et à leur place paraissait une arche lumineuse, d'où tombait une pluie de lumière. Le plus souvent ce qui se passait devant nos yeux ne pouvait se comparer à rien. C'étaient des apparences fugitives, impossibles à décrire et que l'œil avait peine à saisir, tant elles se succédaient, se mêlaient, s'effaçaient rapidement. Jamais on ne pouvait prévoir, une seconde à l'avance, ce qu'allait offrir le kaléidoscope céleste. Ce qu'on croyait voir avait disparu, tandis

qu'on cherchait encore à s'en faire une idée distincte. Le merveilleux spectacle semblait toujours finir et recommencer, et il était impossible de saisir le passage d'une décoration à l'autre. On ne les voyait pas apparaître dans le ciel; mais tout à coup elles s'y trouvaient, et il semblait qu'elles y avaient toujours été. En un mot, rien ne peut donner une idée de tout ce qu'il y a de mobile, de capricieux, d'insaisissable dans ces jeux brillants d'une lumière nocturne; et encore la lune, qui se trouvait pleine dans ce moment, nuisait par son éclat à celui de l'aurore boréale. C'est pour cette raison que celle-ci était blanche et pâle. Sans cela, aux variations de formes se seraient jointes les variations de couleurs, les reflets rouges, verts, enflammés, qui donnent souvent aux aurores boréales l'apparence d'un grand incendie. Mais, à cela près, la nôtre fut une des plus riches qu'on pût voir; elle dura plusieurs heures, se renouvelant, se déplaçant, se transformant sans cesse. »

La forme même de l'aurore est susceptible de variétés inouïes qui peuvent tenir aussi bien à la distance à laquelle les observateurs se tiennent du phénomène qu'à la manière même dont elle se produit. Ainsi, nous empruntons à l'ouvrage la *Mer libre du Nord* la description d'une aurore boréale observée par le voyageur Hayes (*fig.* p. 185) :

« J'errais paisiblement parmi les icebergs de l'entrée du port, et, quoique si près de midi, je tâtonnais dans les ténèbres sur une glace raboteuse. Tout à coup, de dessous ce nuage noir qui couvre l'horizon, s'élançait un rayon brillant qui illumine l'espace d'une étrange lueur, puis s'étend en laissant l'obscurité encore plus profonde. Bientôt une immense aube de lumière se déploie sur le ciel et renferme la nue sombre dans son énorme cintre. Le jeu des rayons qui jaillissent de sa couche aux franges étincelantes est des plus capricieux et semble mêler les flammes de l'incendie avec les lueurs de l'aube. La lumière se fait toujours plus vive, et, au lieu de croître uniformément, elle donne l'idée d'une marée aux flots mouvementés et multicolores. D'abord calme et paisible, la scène devient bientôt d'une splendeur éclatante. La large coupole du ciel est en feu : l'incendie, plus terrible que celui qui illumina jadis les cieux au-dessus de Troie enflammée, jette ses effrayantes clartés à travers le firmament. Les étoiles pâlisent devant ses merveilleux reflets, comme devant le lever d'un soleil resplendissant. Je vois trembloter et s'avancer tour à tour, puis ensemble, Andromède, Persée, Capella, la Grande-Ourse, Cassiopée, la Lyre et toutes ces belles constellations qui, sans jamais se coucher, décrivent imperturbablement leur cercle régulier autour de la Polaire. Le fond de la lumière est rougeâtre, mais toutes les autres teintes viennent s'y mélanger tour à tour. Des bandes jaunes et bleues se jouent dans ces sinistres clartés; tombant à la fois de l'intérieur de l'arche illuminée, elles se fondent ensemble et jettent dans l'espace des lueurs d'un vert livide, qui, peu à peu, domine le rouge du fond. Le bleu et l'orange se mêlent dans leur course rapide, des stries violettes apparaissent sur la large zone jaunâtre et des myriades de flammes

blanches, formées de toutes ces couleurs réunies, s'élèvent vers le zénith, comme vers un centre commun d'attraction. »

L'aurore boréale, dans nos contrées, a, en général, l'apparence d'un brouillard assez obscur vers le nord, avec un peu plus de clarté vers l'ouest que dans le reste du ciel. Ce brouillard prend peu à peu la forme d'un segment de cercle, s'appuyant de chaque côté sur l'horizon ; la partie visible de la circonférence, c'est-à-dire la partie supérieure, est bientôt entourée d'une lumière blanche donnant naissance à un ou plusieurs arcs lumineux ; viennent ensuite des jets et des rayons de lumière diversement colorés, partant du segment obscur, dans lequel il se fait quelquefois quelques brèches éclairées, semblant annoncer un mouvement de fluctuation dans la masse. Quand l'aurore s'est étendue, il se forme une couronne au zénith, où concourent les rayons lumineux. Le phénomène diminue alors d'intensité ; on observe cependant encore de temps à autre des jets de lumière, une couronne et des couleurs plus ou moins vives, tantôt d'un côté du ciel, tantôt de l'autre. Enfin le mouvement cesse, la lueur se rapproche de plus en plus de l'horizon, la nue quitte les diverses parties du ciel et s'arrête vers le nord. Le segment obscur, en se dissipant, devient lumineux ; sa clarté est d'abord assez prononcée près de l'horizon, plus faible au-dessus, et finit par se perdre dans le ciel.

Les aurores boréales ne sont pas circonscrites à notre atmosphère ; car un de ces phénomènes ayant été vu à Pétersbourg, à Naples, à Rome, à Lisbonne, et même à Cadix et dans les lieux intermédiaires, Mairais, dans son *Traité de l'aurore boréale*, trouve qu'elle était éloignée de la terre en ligne verticale au moins de cinquante-sept lieues, et probablement de beaucoup plus. Il estime que ces phénomènes sont ordinairement entre cent et trois cents lieues d'élévation.

L'aurore boréale est évidemment un effet de magnétisme : le sommet de l'arc qu'elle forme se trouve toujours sur le méridien magnétique du lieu de l'observation, ou du moins ne semble pas s'en écarter d'une manière sensible, et la couronne, c'est-à-dire le petit espace à peu près circulaire où se concentrent les rayons, se trouve toujours sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison. Elle dérange de leurs positions ordinaires l'aiguille de déclinaison et l'aiguille d'inclinaison ; et elle produit ces changements même dans les lieux d'où elle ne peut être vue. En général, dès le matin du jour où l'aurore boréale doit se montrer dans quelque région des pôles, l'aiguille de déclinaison de Paris dévie à l'occident, et le soir à l'orient. Arago avait annoncé cette observation dès l'année 1825. Ainsi, le dérangement de l'aiguille de Paris peut indiquer les aurores boréales qui

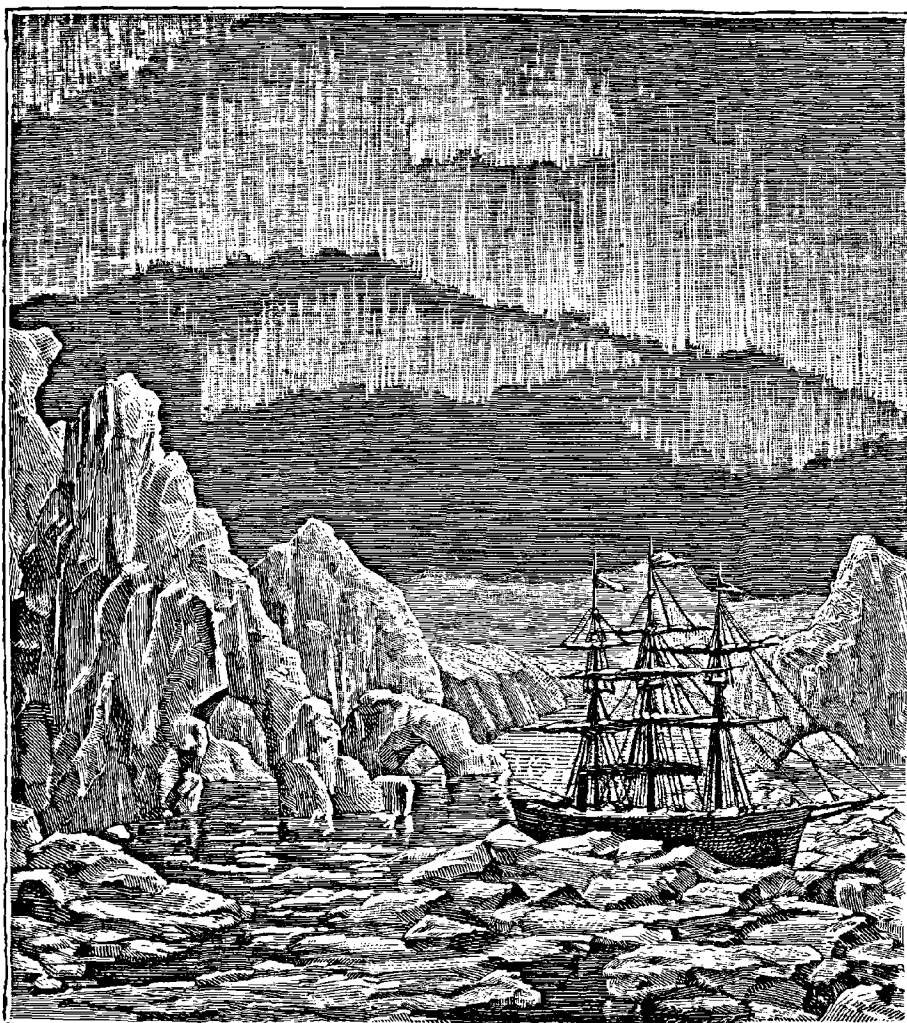
sè font voir aux Lapons, aux Groenlandais et à tous les habitants des régions polaires. Le 29 mars 1826, Arago observa des mouvements inaccoutumés dans l'aiguille magnétique; ces mouvements lui firent supposer la présence d'une aurore boréale sous de plus hautes latitudes. Sa conjecture fut pleinement justifiée, car Dalton observait au même moment, à Manchester, ce phénomène lumineux des pôles. Il est démontré que l'aurore boréale exerce également une action très vive sur le télégraphe électrique; l'aimant est rejeté de côté et l'appareil est hors de service pendant plusieurs heures.

Le rôle des aurores boréales est sans doute très considérable en météorologie. Il semble que ces magnifiques phénomènes ont une grande signification au point de vue des symptômes, et qu'aucun changement général ne puisse se produire sans avoir été annoncé de la sorte quelque temps en avance. Aussi parle-t-on d'établir des stations météorologiques dans les régions polaires et déjà la création de quelques-unes de ces stations a été commencée. Les États-Unis d'Amérique ont établi une station au nord d'Alaska, près de Point-Barrow, et une autre dans la baie lady Franklin. La France a envoyé une mission au cap Horn; les Anglais en ont une au fort Simpson; les Danois à Upernavick (Groenland); les Allemands dans l'île Pendulum (Groenland); les Autrichiens à l'île Jean-Mayen; les Suédois à la baie Mossel (Spitzberg); les Norvégiens à Bossekop; les Hollandais à la baie Moeller (Nouvelle-Zemble) et les Russes à Port-Dikson et à l'embouchure de la Léna. Le célèbre Nordenskiöld a observé un certain nombre d'aurores, dans la station voisine du détroit de Behring où la *Véga* a été si inopinément et si étroitement bloquée en 1879. Entre autres, il en a observé deux, l'une le 3 mars, et l'autre, très belle, très brillante et très longue le 20 mars, et cela d'autant plus facilement, que la lune, qui était nouvelle deux jours après, ne venait pas se montrer au-dessus de l'horizon. Or le soleil passait en ce moment à l'équinoxe du printemps. Ces deux apparitions n'ont point été aperçues dans nos climats; mais on peut, jusqu'à un certain point, admettre qu'elles ont marqué l'origine d'un changement de temps notable qui s'est produit deux ou trois jours après. Au mois de février 1879 étaient tombées de grandes pluies qui avaient amené des inondations très désastreuses, à Paris et dans plusieurs villes de nos régions. Ces pluies ont été suivies par une période de temps sec, froid et beau, dont l'aurore du 3 mars pouvait bien avoir annoncé le terme. C'est dans cette crise que de grandes tempêtes ont éclaté sur le nord de l'Écosse, et que de nouvelles inondations, encore plus terribles, ont dévasté Szegedin, en Hongrie. L'aurore du 20 mars a été suivie de tempêtes et de terribles rafales de neige, qui ne se sont pas contentées



de fondre sur la partie boréale de l'archipel britannique, mais qui, cette fois, sont descendues jusqu'à nous.

Le bruit produit par les aurores boréales est contesté : Wargentín



L'aurore boréale (page 182).

l'affirme ; mais, entre beaucoup d'autres, Franklin le nie. « Je n'ai jamais pu parvenir, dit M. de Saussure, à entendre aucun bruit particulier, même pendant les aurores boréales les plus grandes et les plus vives, à Skye, une des îles Hébrides, où régnaient le plus grand calme et le plus pro-

fond silence. Cependant j'ai recueilli, dans les îles Shetland, de nombreux témoignages à cet égard, d'autant plus remarquables qu'ils étaient entièrement spontanés et nullement influencés pour aucune question de ma part. Des personnes de divers états et conditions, et habitant des districts très éloignés dans ces îles, ont été unanimes à dire que, lorsque l'aurore boréale est forte, elle est accompagnée d'un bruit qu'ils ont tous également et unanimement comparé à celui qui se produit lorsqu'on vanne le blé. »

Aujourd'hui cependant, on croit plus généralement à la production d'un certain bruit par les aurores boréales. L'observation qui a commencé à faire changer d'opinion un grand nombre de physiciens a été faite pendant le siège de Paris, par les deux aéronautes du ballon *la Ville d'Orléans*. Nous avons dit (*Pesanteur*, page 384) que cet aérostat avait été atterrir en Norvège. M. Rollier et son compagnon ont raconté avoir entendu le bruit produit par une aurore boréale dont ils s'étaient approchés pendant leur course aventureuse. Ce récit a été mis sous les yeux de l'Académie des sciences par M. Becquerel. Depuis lors, des observations analogues se sont multipliées dans les régions boréales. Les uns prétendent que ce bruit ressemble à celui d'une robe de soie quand on la froisse; les autres imaginent, au contraire, qu'il est analogue à celui qu'engendrent des flammes agitées par le vent. Évidemment les aérostats pourront servir à cette étude, parce que les sons peuvent être plus facilement perçus en raison de ce que l'aéronaute s'approche matériellement du météore, qu'il se trouve de plus éloigné des bruits de la terre, et qu'il a au-dessus de sa tête une membrane d'une immense étendue, excessivement sonore et susceptible de recueillir tous les bruits qui font vibrer l'air.

Depuis la découverte de l'*analyse spectrale*, on n'a pas manqué de scruter le spectre de l'aurore dans l'espoir d'y trouver quelque renseignement inattendu; mais aucun fait décisif n'a été signalé encore, précisant la nature intime du phénomène.

L'ensemble des faits acquis par la science a été résumé d'une façon tout à fait admirable par M. de La Rive, dans les termes suivants :

« Toutes les observations concourent à démontrer que l'aurore boréale est un phénomène ayant son siège dans notre atmosphère, mais à des hauteurs très grandes, et qui consiste dans la production d'un anneau lumineux ayant pour centre le pôle magnétique; quoique le diamètre de cet anneau soit variable, il a toujours des dimensions considérables. Quelle que soit l'explication que l'on adopte pour l'aurore boréale, elle doit être admise pour l'aurore australe qui se produit dans une position analogue autour de l'autre pôle de la terre. Ces aurores

sont produites par des décharges électriques s'opérant dans les régions polaires entre l'électricité négative de la terre et l'électricité positive de l'atmosphère. Tous les phénomènes électro-magnétiques qui accompagnent l'aurore boréale démontrent l'existence de ces décharges et des courants électriques qui en résultent. On produit, du reste, dans l'œuf électrique (*Électricité*, page 70), des apparitions identiques à l'aide de la lumière d'induction placée sous l'influence d'un aimant. »

M. G. Planté a réussi également à produire des phénomènes analogues à ceux des aurores en faisant plonger les pôles de sa pile à haute tension dans un tube en U, plein d'eau salée; mais ces expériences ne sont pas encore concluantes. Il reste à démontrer que ces décharges peuvent être provoquées par les mouvements des astres considérés comme magnétiques, et que, par conséquent, la lumière du soleil peut être regardée comme le résultat de la rotation des aimants planétaires qui tournent autour de lui dans une magnifique machine d'induction.

Cependant quelques observations semblent donner à penser que ces influences cosmiques sont évidentes. Les aurores, dit M. Radau, ont leur plus grande fréquence aux époques des équinoxes, au commencement et à la fin de la période hivernale. Il y en a très rarement au mois de juin. La fréquence des aurores boréales est, en outre, sujette à une variation séculaire, dont la période paraît être de cinquante-six à soixante ans. Cette période elle-même pourrait se subdiviser en cinq ou six périodes de dix à onze ans, correspondant aux alternatives régulières que présentent à la fois la fréquence des taches solaires et l'amplitude moyenne des variations diverses de la déclinaison. Le parallélisme de ces trois phénomènes, déjà signalé par M. Wolff, a été confirmé par MM. E. Loonns et Allan Bronn; mais il est contesté par M. Faye. En outre, M. Hornstein a reconnu dans les variations magnétiques une période de 26 jours et demi, correspondant à la rotation synodique du soleil, c'est-à-dire au retour du même aspect de la surface solaire. Il serait ainsi démontré que les fluctuations périodiques des aurores boréales aussi bien que des variations de l'aiguille aimantée sont des phénomènes cosmiques dont le siège est le soleil. La lune, elle aussi, produit d'ailleurs une inégalité dans la variation diurne de l'aiguille. On peut même établir un rapprochement entre les variations magnétiques, les taches solaires et les éruptions volcaniques qui suivent, elles aussi, des périodes régulières.

**TREMBLEMENTS DE TERRE.** — On sait que les *tremblements de terre* sont des trépidations du sol, consistant tantôt en secousses horizontales

saccadées, tantôt en oscillations verticales qui se succèdent à de courts intervalles, et qui sont précédées et accompagnées de bruits souterrains comparables au bruit du tonnerre. Ces grandes commotions sont expliquées par des bouillonnements et des explosions de l'incandescence et des vapeurs internes. Mais comme elles s'accompagnent toujours de faits analogues à ceux de l'électricité, il n'est guère possible de ne pas faire entrer celle-ci parmi leurs causes. Ne faut-il pas d'ailleurs une force de ce genre pour activer, dans leur prison, les vapeurs intenses, si ce sont elles qui engendrent les tremblements? Quant aux apparences, toujours ils sont précédés de lueurs étranges, d'éclairs, de formation dans les régions ébranlées de tourbillons et de globes enflammés. A quoi l'ébranlement lui-même ressemble-t-il mieux qu'à une palpitation électrique de la terre elle-même?

On cite, par exemple, le grand tremblement de terre de Londres de 1749, qui fut accompagné d'un tonnerre prolongé depuis la Tamise jusqu'à Temple-Bar avant l'inclinaison des édifices, et celui de Daventry en 1750, dont la commotion bouleversa, en un instant, 10,000 kilomètres carrés du pays. Ils furent accompagnés des symptômes dont nous parlons, et, avec l'immense majorité des physiciens, le docteur Stukely les expliquait par des variations irrégulières du magnétisme terrestre.

Parmi les tremblements de terre fameux, rappelons celui de Lisbonne, en 1755, qui se fit sentir depuis la Martinique jusqu'en Laponie. La capitale du Portugal fut presque tout entière renversée sur ses habitants dont plus de 40,000 périrent (*fig.* à la page 193). Les plus beaux édifices s'écroulèrent et les vaisseaux furent brisés dans le port. Ce fut le 1<sup>er</sup> novembre, à neuf heures et demie du matin, par un ciel serein, que la première secousse se fit sentir; et le terrible phénomène ne dura que sept minutes. On vit les eaux du Tage s'élever de trois mètres à Tolède, éloignée de 44 myriamètres de Lisbonne, et les vagues de la mer montèrent à la hauteur de 19 mètres à Cadix. Ce fléau se fit aussi sentir en Afrique: la terre s'ouvrit près de Maroc: une peuplade d'Arabes fut ensevelie dans les abîmes, et les villes de Fez et de Mequinez ne furent pas moins malheureuses que Lisbonne. En 1783, vingt-neuf bourgs ou villages de la Calabre furent engloutis dans un effondrement gigantesque déterminé par un tremblement de terre; pendant ceux de 1822, 1835 et 1837, la côte du Chili se souleva sur une étendue de plus de 200 lieues, et elle est demeurée depuis à plusieurs mètres au-dessus de son niveau. Citons encore les tremblements qui désolèrent la province de Caracas en 1812, les environs d'Alep en 1822, les provinces de Murcie et de Valence en 1829, la Guadeloupe en 1843; ceux qui détruisirent les villes de Schiraz en 1856

et de Brousse en 1855, 1868 et 1869 et qui, dans cette même année 1869, renversèrent de fond en comble une ville de la Colombie.

Au mois de septembre 1879, on a ressenti à Lyon, vers 7 heures du matin, une secousse de tremblement de terre, d'une durée de deux à trois secondes. Des meubles ont été déplacés, des ustensiles de cuisine se sont entre-choqués, des maisons ont oscillé, etc. Près de l'île Barbe, des murs ont été lézardés. Un horloger de Meximieux, rapporte M. Figuier, a entendu toutes les pendules sonner à la fois ; plusieurs personnes ont été violemment secouées dans leur lit. C'est à l'ouest de la ville que le phénomène s'est produit avec la plus grande intensité. Sur toute la colline qui relie Saint-Irénée à Fourvières, de fortes oscillations ont surpris les habitants. Des secousses analogues avaient déjà été ressenties aux mois de février et de juin 1878.

Établir le rapport qui existe certainement entre les grands phénomènes magnétiques et les astres est l'objet de nombreux travaux. M. Alexis Perrey, de Dijon, dit M. de Parville, a mis depuis longtemps en évidence la relation qui semble exister entre les phases de la lune et les tremblements de terre. Aux syzygies et aux lunes équinoxiales, le nombre moyen des tremblements de terre s'accroît notablement. De notre côté, nous avons appelé l'attention sur certaines coïncidences curieuses entre les bourrasques et les phénomènes intérieurs de la terre. Le plus souvent, quand une tempête bien caractérisée traverse l'Europe, il survient en même temps des tremblements de terre. Le 29 juin 1873, pendant qu'un ouragan d'une extrême violence se déchainait sur l'Exposition de Vienne, on notait des secousses du sol très singulières dans la haute Italie.

On possède à l'observatoire de Venise des instruments enregistreurs ; on a pu relever exactement l'heure du phénomène, sa durée et le nombre des secousses. Le mouvement du sol était si marqué, que beaucoup de personnes éprouvèrent la même sensation que si elles avaient été transportées tout à coup sur le pont d'un navire par une mer agitée ; il semblait que la terre fût devenue liquide et que les maisons fussent balancées comme des navires qui montent et qui descendent avec la vague. Le phénomène fut heureusement de courte durée. On nota en tout quatorze mouvements : sept ascendants et sept descendants. Chacun d'eux a duré une seconde.

On le voit : ouragan, tempête, tremblement de terre sont survenus simultanément sur un espace considérable, en manifestant leurs effets avec une extrême énergie. On était alors peu éloigné du solstice, le 29 juin, et à cette date correspondait l'apogée lunaire. C'est un exemple de plus en faveur des influences planétaires.

**CAUSES DES PHÉNOMÈNES MAGNÉTIQUES TERRESTRES.** — On est réduit à des hypothèses sur les causes du magnétisme terrestre.

Hansteen, s'appuyant sur des principes que nous présenterons dans le livre suivant, prétendait que les phénomènes magnéto-électriques sont produits par l'induction que les planètes exercent les unes sur les autres, ce qui n'a rien d'impossible, puisqu'elles sont toutes composées d'éléments soit magnétiques, soit paramagnétiques; ce serait le mouvement de la terre autour du soleil, ainsi que celui de la lune autour de la terre qui produirait le magnétisme terrestre. D'après cette théorie, la terre ne possède pas moins de deux pôles magnétiques dans chaque hémisphère, de sorte que l'état magnétique du globe est représenté par deux aimants croisés l'un sur l'autre et ayant les deux pôles analogues placés vers le même hémisphère. En adoptant ce mode de représentation, on peut supposer que le premier montre l'action inductrice du soleil, et le second celle de la lune, qui est sensiblement moins forte.

Suivant la notation adoptée par Hansteen, on désigne par A et B les pôles de l'aimant solaire et par *a* et *b* les pôles de l'aimant lunaire. Par les deux mots d'*aimant solaire*, il faut entendre l'électro-aimant produit par la rotation de la terre autour du soleil, et par *aimant lunaire* celui que produit la rotation de la lune (A et *a* désignant les pôles situés dans l'hémisphère austral et B, *b* ceux de l'hémisphère boréal). Or, d'après les déterminations de Hansteen, les pôles principaux de A et de B se trouvaient en 1775 : le pôle A dans la terre de Van-Diémen, et le pôle B au sud de la baie d'Hudson; le pôle *a* se trouvait au sud de la Terre-de-Feu et le pôle *b* dans la Sibérie orientale, au milieu de régions alors peu explorées. On sait que les positions relatives de la lune et du soleil ne se reproduisent point exactement tous les ans d'une façon régulière; aussi la position de ces pôles ne saurait rester fixée sur la sphère céleste. Chacun de ces points se déplace en décrivant une orbite qui correspond, pour les pôles A et B, aux inégalités séculaires du mouvement du soleil, et pour les pôles *a* et *b*, à celles du mouvement de la lune; de sorte que les grands nombres que l'astronomie a découverts, et qui se traduisent dans le ciel par la précession des équinoxes et par le mouvement des nœuds de l'orbite lunaire, sont réfléchis et répercutés par les mouvements de l'aiguille aimantée.

Dans cette théorie, la variation diurne est produite par la rotation de la terre autour de son axe, mouvement dont la vitesse moyenne est bien inférieure à celle de la translation du soleil dans l'espace, comme un calcul bien simple peut en convaincre. On comprend donc que cette variation ne soit qu'une petite fraction du pouvoir magnétique total.

Chacun de ces pôles fait une révolution sur un petit cercle de la sphère terrestre :

A en 4 320 ans.	432 × 10
B — 1 728 —	432 × 4
a — 1 296 —	432 × 3
b — 864 —	432 × 2

Cette théorie conduit à des assimilations théoriques fort intéressantes, qui font involontairement songer aux analogies identiques découvertes par Pythagore dans les lois de l'harmonie. Nous n'insisterons pas sur ce point, qui appartient plutôt à l'astronomie qu'à la physique proprement dite.

L'opinion de Hansteen est adoptée par un grand nombre de physiiciens; toutefois, elle est vivement combattue par d'autres; ainsi un des astronomes les plus autorisés de l'Angleterre, sir George Biddel Airy, avance dans son *Traité de magnétisme*, que le magnétisme terrestre ne peut être produit par des forces agissant en dehors du sphéroïde terrestre. « Si le magnétisme était produit par une cause extérieure, dit-il, on peut à peine concevoir qu'une grande partie de cette force n'agirait pas suivant des plans parallèles à l'équateur. S'il en était ainsi, les effets de cette force extérieure sur un point donné éprouveraient un grand changement dans la révolution diurne de la terre. En effet, chaque partie de la terre se présenterait successivement sous différents aspects dans le cours d'un seul jour. Or, l'on a constaté que les changements diurnes sont très petits, et qu'à Greenwich, ils équivalent à peine à 2 millièmes de la force horizontale. »

D'autre part, MM. Mascart et Joubert, dans un ouvrage savant publié en 1882, *l'Électricité et le Magnétisme*, écrivent : « L'influence du soleil et de la lune ne paraît pas douteuse; tout porte à croire, cependant, qu'ils n'agissent pas directement en tant que corps magnétiques... En effet, un astre, quelle que soit la distribution du magnétisme à sa surface, équivaut, pour les points très éloignés, comme ceux de la surface terrestre, à un aimant infiniment petit ou à une sphère uniformément aimantée, c'est-à-dire n'ayant pas de pôles. »

Nous ne pouvons entrer dans le détail des polémiques auxquelles donnent lieu la production des différentes hypothèses; il nous suffit d'indiquer ce point sur lequel se portent les investigations des savants contemporains.

## CHAPITRE III

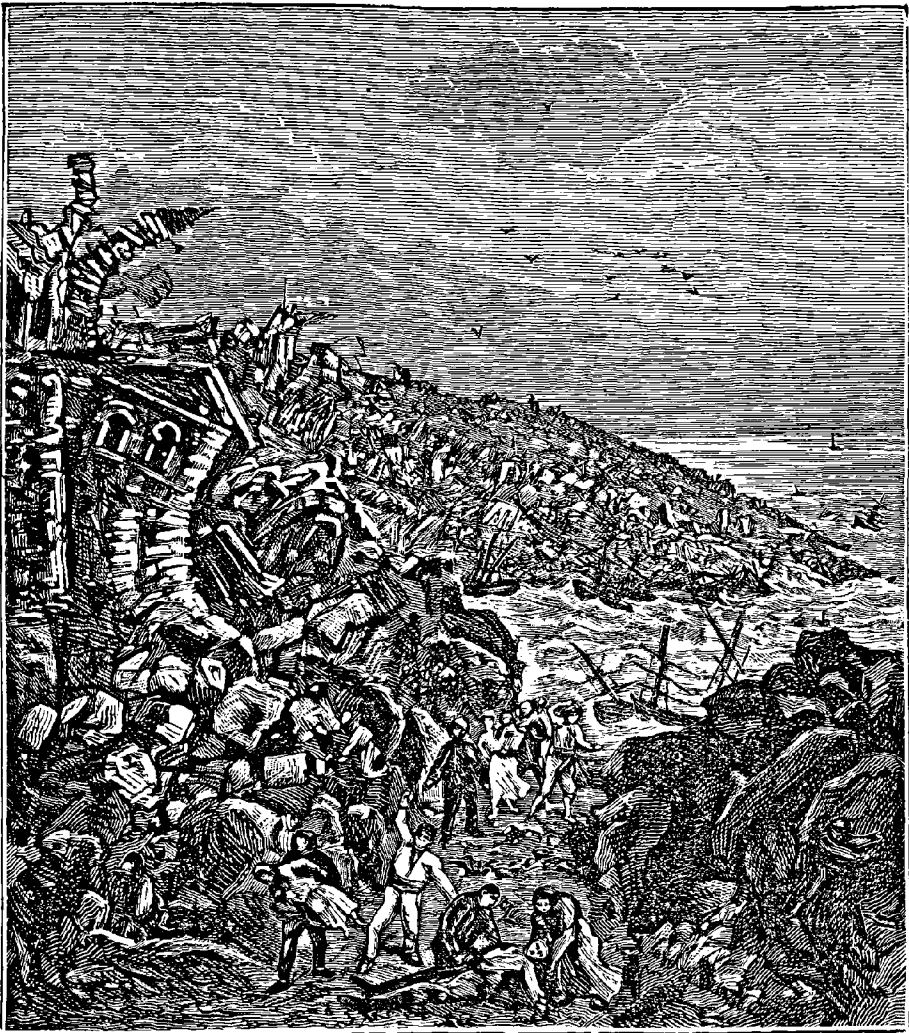
### PROCÉDÉS D'AIMANTATION

**AIMANTATION PAR L'ACTION DE LA TERRE.** — Aimanter une substance, c'est lui transmettre les propriétés magnétiques, c'est-à-dire celles d'attirer le fer et de se diriger vers le nord. La torsion, l'oxydation, l'action de la lime et presque toutes les actions mécaniques ou chimiques produisent sur le fer doux le même effet que la percussion, c'est-à-dire qu'elles y développent un certain degré de force coercitive. Nous avons vu aussi qu'un morceau de fer doux peut s'aimanter par influence (page 151). Les seules substances qui puissent s'aimanter d'une manière durable sont l'acier trempé et l'oxyde de fer constituant les aimants naturels. L'aimantation peut aussi se produire lentement par l'influence prolongée de la terre ; celle-ci, en effet, agit comme les aimants sur les substances magnétiques. Mais, comme cette influence est très faible, elle ne peut avoir d'effet que sur les substances magnétiques dont la force coercitive est à peu près nulle. Voilà pourquoi l'action de la terre, insensible sur l'acier trempé, est au contraire marquée sur le fer doux. Si l'on prend une barre de fer doux d'environ 1 mètre de longueur, et qu'on la dispose parallèlement à l'aiguille d'inclinaison dans le méridien magnétique, ses deux fluides se séparent ; un pôle austral se forme dans la partie de la barre dirigée vers le nord, tandis qu'un pôle boréal se développe à l'autre extrémité. Mais comme la force coercitive du fer doux est nulle, il suffira de retourner la barre, toujours maintenue dans le méridien magnétique, pour intervertir aussitôt ses deux pôles. Toutefois si, pendant que la barre de fer est sous l'influence du globe terrestre, on frappe quelques coups de marteau sur l'une de ses extrémités, on lui communiquera une certaine force coercitive en vertu de laquelle ses pôles magnétiques pourront se fixer pour quelque temps.

**AIMANTATION PAR FRICTIONS.** — Le procédé autrefois employé pour aimanter les barreaux d'acier et les aiguilles de boussole est l'*aimantation par frictions*, qui se divise en frictions par *simple touche* par *touché séparée* et par *double touche*.



1° *Méthode de la simple touche.* — Dès le XII<sup>e</sup> siècle, on construisait des boussoles avec des aiguilles de fer que l'on aimantait par le contact d'un aimant ;



Tremblement de terre de Lisbonne (page 188).

Qui une aiguille de fer bouts  
En un poi de liège, et l'atise  
A la pierre d'aimant bise,

dit un poème attribué à Guillaume le Normand. Et, des siècles aupa-

PHYS. ET CHIM. POPUL.

Liv. 127.

vant, les poètes Claudius et Lucrèce constataient que le fer s'aimantait par le frottement, et aussi que l'aimant se fortifiait par le contact. Il est vrai que ces derniers ajoutaient que les vertus du contact de l'aimant étaient non seulement matérielles, mais encore morales. Porter un aimant sur soi donnait la faculté de plaire à tout le monde et même le don de l'éloquence; cela suffisait pour réconcilier les époux brouillés et pour guérir le mal de tête. Mais, au moyen âge, on arrondissait les pierres d'aimant pour les façonner en sphères, sur lesquelles on traçait un équateur, des méridiens et des parallèles, qu'on appelait *microgées* ou *terrelles*, espérant ainsi découvrir les mystérieuses propriétés de la force magnétique. Aujourd'hui, il a été reconnu que la meilleure forme à donner aux aimants est celle du fer à cheval.

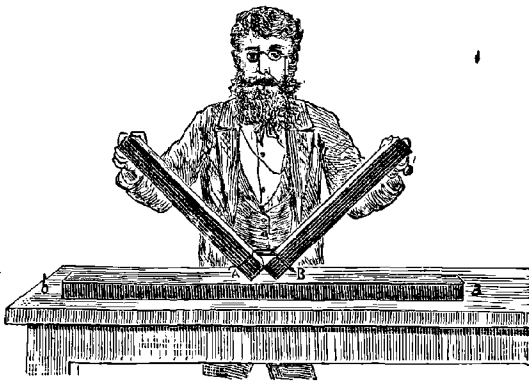


Fig. 65. — AIMANTATION PAR DOUBLE TOUCHE.

La méthode de la *simple touche* ne peut convenir que pour des aiguilles de faible dimension ou de petits barreaux, parce qu'elle ne possède qu'une faible puissance

d'aimantation. Elle consiste à faire glisser le long du barreau à aimanter le pôle d'un aimant puissant, et à répéter plusieurs fois les frictions dans le même sens et sur les deux faces du barreau. L'extrémité que le pôle de l'aimant mobile quitte la dernière, prend un pôle de nom contraire, tandis que l'autre extrémité prend un pôle de même nom. Ce procédé a, en outre, l'inconvénient de produire des *points conséquents* (page 144).

2° *Méthode de la double touche.* On doit à Mitchell, vers 1750, cette méthode que perfectionna Æpinus, qui consiste à assembler deux aimants de même force, A et B (*fig. 65*), les pôles contraires en regard, et à les promener simultanément du milieu du barreau *ab* vers l'une de ses extrémités *a*, puis vers l'autre *b*, en formant un angle d'environ 20°, et ainsi de suite. Après un certain nombre de frictions, on revient au point de départ, c'est-à-dire au milieu, et l'on enlève les barreaux. Il faut avoir soin que chacune des moitiés ait subi le même nombre de frictions. Cette méthode a, comme la précédente, l'inconvénient de produire souvent des *points conséquents*.

3° *Méthode de la touche séparée.* En 1745, le docteur anglais Gowan

Knight imagina l'aimantation par la méthode de la touche séparée, méthode dont Serwington Savery avait d'ailleurs fait usage dès 1730. Lorsque Gowan Knight, rapporte M. Radau, présenta en 1746, à la Société royale de Londres, ses aimants artificiels obtenus par un procédé nouveau, il refusa de divulguer la nature de son invention. « On m'en offrirait, dit-il, autant de guinées que j'en pourrais emporter, que je ne donnerais pas mon secret. » Ce n'est qu'après sa mort que Wilson fit connaître le mode d'opération employé. Cependant ses aimants, célèbres par leur puissance, s'étaient répandus partout, et avaient excité l'émulation des physiciens.

C'est ainsi que, vers 1745, Réaumur et Buffon reçurent d'Oxford de petits barreaux « aimantés par un docteur anglais, sans avoir été passés sur une pierre, » et qui soulevaient des poids relativement considérables. Duhamel (1), à qui ces aimants furent communiqués, savait qu'un fabricant d'instruments de mathématiques de

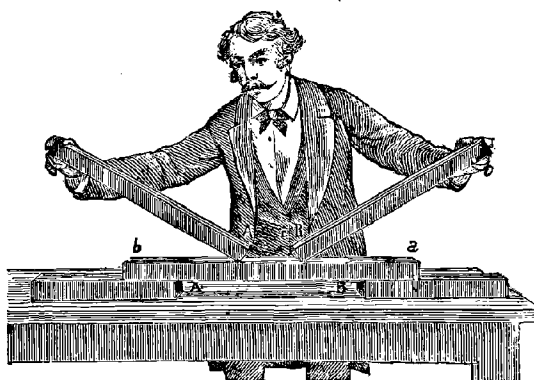


Fig. 66. — AIMANTATION PAR TOUCHE SÉPARÉE.

Paris, nommé Lemaire, possédait également un procédé d'aimantation d'une grande efficacité. Lemaire magnétisait une lame d'acier en l'attachant sur une autre lame plus longue, et il réunissait plusieurs lames ainsi préparées pour en former un faisceau. Ce fut là le point de départ des recherches de Duhamel sur les avantages qu'on peut tirer des *armatures* pendant l'aimantation.

Dans cette méthode, on commence par poser l'aiguille *ba* qu'on veut aimanter (*fig. 66*) entre les deux pôles contraires *A' B'* de deux aimants ou faisceaux magnétiques puissants. On prend ensuite deux autres aimants d'égale force *AB*, dont on applique les pôles contraires, et dirigés

(1) DUHAMEL (J.-P.-François GUILLOT-), savant métallurgiste (1730-1816), professeur à l'École des mines, membre de l'Académie des sciences, inspecteur général des mines. On lui doit de nouveaux procédés par la cémentation de l'acier et l'extraction de l'argent. Il était de la famille de DUHAMEL (Jean-Baptiste), physicien distingué, de l'ordre des Oratoriens (1624-1706), secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences depuis sa fondation, et qui, après quelques voyages en Angleterre et en Hollande, publia des ouvrages classiques qui firent pénétrer dans l'enseignement les vérités scientifiques. D'un esprit élevé et tolérant, ce dernier avait vainement tenté de concilier la science et la religion, les philosophes anciens et les philosophes modernes. Il a donné en latin une *Histoire de l'Académie des sciences*.

dans le même sens que ceux des aimants fixes, sur la partie moyenne de l'aiguille, en les inclinant suivant un angle de  $25^\circ$  environ. Cela fait, on écarte les deux aimants mobiles l'un de l'autre en les faisant glisser séparément vers les extrémités de l'aiguille, puis on les soulève et on les

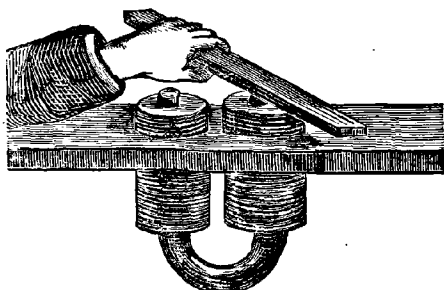


Fig. 67.

AIMANTATION PAR UN ÉLECTRO-AIMANT.

raporte au milieu pour les faire glisser encore de la même manière, et ainsi de suite un certain nombre de fois sur les deux faces jusqu'à saturation. Cette méthode n'engendre jamais de points consécutifs.

**AIMANTATION PAR L'ÉLECTRICITÉ.** — Les procédés dont nous venons de parler sont complètement tombés en désuétude. On emploie aujourd'hui presque exclusivement dans les ateliers les deux méthodes suivantes, basées sur des principes que nous développerons ci-après :

1° On se sert d'un *électro-aimant* fixe (*fig. 67*), sur les pôles duquel on fait glisser, alternativement et en sens contraire, le barreau à aimanter. L'effet de cette friction est de développer à l'extrémité qui abandonne l'aimant un pôle de nom contraire à celui qui agit, d'où l'on voit que les frictions inverses sur les deux pôles tendent à produire une aimantation dans le même sens.

2° Quand on veut produire une aimantation assez énergique, l'électro-aimant doit être puissant, et dès lors l'adhérence du barreau est telle, que l'opération devient incommode. D'ailleurs le barreau peut se trouver fortement rayé par la friction. On préfère dans ce cas faire mouvoir le long du barreau une bobine (*fig. 68*) traversée par un courant.

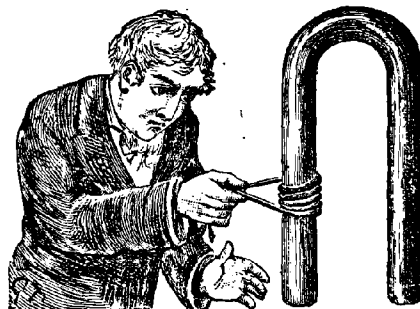


Fig. 68.

AIMANTATION PAR UN COURANT.

C'est Arago (1) le premier, après les belles découvertes d'Ørsted, qui

(1) ARAGO (Dominique-Jean-François), illustre savant français (1786-1853). Après des études brillantes, pris de goûts militaires, il entra à l'École polytechnique, le premier de la promotion (1803), et en 1805 il en sortit, appelé au Bureau des longitudes en qualité de secrétaire-bibliothécaire de l'Observatoire. L'année suivante, il fut chargé avec M. Biot d'aller compléter la mesure de l'arc

découvrit que l'on pouvait ainsi faire des aimants puissants, en soumettant l'acier et le fer à l'action d'un courant électrique. Une expérience intéressante a été faite en 1875, dans le même ordre d'idées, à l'Académie des sciences, par M. Thomasi. Ce physicien produit des aimants, non plus en soumettant du fer ou de l'acier, comme Arago, à l'action d'une hélice dans laquelle passe un courant électrique, mais en plaçant un barreau dans les spires d'un tube creux au sein duquel circule un jet de vapeur. Un tube de cuivre de 2 à 3 millimètres de diamètre est enroulé en hélice autour d'un cylindre de fer ; on fait passer de la vapeur à 5 ou 6 atmosphères dans le tube, et le morceau de fer s'aimante et conserve son aimantation pendant toute la durée du passage de la vapeur.

Quelle est la cause du phénomène ? M. Thomasi s'en est tenu aux faits, sans insister sur la théorie. Quelques physiciens ont avancé que la vapeur, en circulant, créait un courant thermo-électrique par suite de la différence de température entre la paroi froide extérieure et la paroi chaude intérieure du tube. Il semble que, s'il en était ainsi, l'égalité de température tendant à s'établir, le courant disparaîtrait vite. Il est plus probable que le frottement des gouttelettes de vapeur d'eau, entraînées contre les parois du tube, crée de l'électricité qui aimante les barreaux.

du méridien en Espagne, laissée inachevée par Méchain, et il accomplit cette tâche au milieu des périls les plus grands (*Introduction*, page 34). De retour à Paris (1809), il fut nommé membre de l'Académie des sciences, professeur de géométrie analytique à l'École polytechnique, chargé du cours d'astronomie à l'Observatoire. Député en 1830, membre du gouvernement provisoire en 1847, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, président de la Société des gens de lettres, Arago fut comblé d'honneurs pendant sa vie, et sa ville natale, Estagel (Pyrénées-Orientales), lui a élevé une statue (page 145). Ses recherches sur la *polarisation de la lumière*, qui lui ont permis de créer la *lunette polariscope*, sa découverte de l'*aimantation du fer par les courants électriques*, ses observations sur les variations de la déclinaison de l'aiguille aimantée et les relations qui unissent ces variations aux orages magnétiques, sur les aurores boréales, ses recherches sur la *météorologie et la géographie physique*, ont complété ses travaux sur les sciences physiques. Il a reconnu avec M. Dulong que la loi de Mariotte se vérifie pour l'air jusqu'à 27 atmosphères, et concourut avec M. Biot à la détermination exacte du poids spécifique de l'air. En astronomie, citons ses recherches sur la déclinaison de certaines étoiles, l'étude des phénomènes particuliers que présentent les éclipses totales du soleil et la détermination de l'atmosphère de cet astre. Il trouva dans les *interférences* la cause de la scintillation des étoiles et détermina la vitesse de leur lumière, ainsi que celle de la transmission des rayons de différentes couleurs. Mais, plus peut-être que les nombreux ouvrages qu'il a laissés, ce qui rend Arago un homme vraiment digne de son immense gloire, c'est son amour pour le peuple, son désir de mettre la science à la portée des plus humbles pour lesquels il écrivait l'*Astronomie populaire*, les *Biographies*, les *Notices scientifiques*, etc. Pourquoi la popularité d'Arago, tandis que les Laplace et les Lalande sont presque inconnus des masses ? C'est que les méthodes scientifiques de ces hommes de génie ne sont pas identiques ; tandis qu'Arago, tout en ne restant pas inférieur du côté du savoir et des travaux sur la science spéculative, avait pour but la vulgarisation et l'application directe de la science, Laplace et Lalande vivaient au milieu d'abstractions sublimes, parlant un langage inconnu. Arago est le premier qui ait compris que, si les formules sont utiles pour établir les grandes théories, il faut se débarrasser de tout cela lorsqu'on expose les faits au public. Aussi Arago est-il mort entouré de l'affection et de l'admiration de tous, et sa mémoire sera-t-elle toujours l'objet de la vénération des peuples.

d'Armstrong (*Électricité*, page 42), dont les effets sont connus, rend cette hypothèse plus probable.

**DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME DANS LES AIMANTS.** — Dans une lettre adressée en 1607 à Curzio Picchena, Galilée parle d'une pierre d'aimant tout à fait extraordinaire. Elle était si puissante, dit-il, qu'en approchant la pointe d'un cimenterre à une distance égale à l'épaisseur d'une plaque d'argent, on ne pouvait plus la retenir, et même qu'une personne solide, appuyant le cimenterre contre la poitrine, ne pouvait résister à l'entraînement. J'y ai découvert, continue Galilée, un autre effet admirable. Un même pôle attire et repousse le même morceau de fer. A la distance de quatre ou cinq doigts au moins, il attire le fer, puis, à la distance de un doigt, il le repousse. Si l'on place le morceau de fer sur une table et qu'on mette l'aimant très près, le morceau de fer s'écarte et fuit devant l'aimant qu'on pousse derrière lui; mais si l'on retire l'aimant au moment où la distance devient de quatre doigts, le morceau de fer est attiré et suit l'aimant qu'on éloigne, mais il n'approche pas à plus d'un doigt.

Cette pierre d'aimant fut achetée par le grand-duc à prix d'or. On la considérait comme une des plus grandes curiosités du temps. On ne sait pas d'où elle provenait, et encore moins ce qu'elle est devenue. Il est permis de supposer que ce n'était pas une pierre naturelle, mais bien de l'acier aimanté. L'aimant était en effet très puissant et soulevait 6 livres. Mais comment expliquer, en tout cas, cette vertu toute particulière d'attirer et de repousser tout à la fois ?

M. Bertrand appela dernièrement l'attention de M. Jamin sur le curieux aimant de Galilée, et le savant professeur de l'École polytechnique est parvenu très simplement, en appliquant ses recherches récentes sur les procédés d'aimantation, à préparer des aimants qui attirent et repoussent à volonté. Le fameux aimant du grand-duc n'offrira plus rien de mystérieux désormais. M. Jamin a montré que l'aimantation ne pénètre dans le métal qu'à une profondeur limitée, mais d'autant plus grande que le courant électrique est plus fort. En faisant agir d'abord un courant énergétique, puis un second courant inverse, mais plus faible, on superpose dans le barreau d'acier deux aimantations contraires, l'une profonde, l'autre superficielle. Ce n'est pas là une simple vue de l'esprit, car on peut aisément, avec de l'acide sulfurique dilué, détacher la couche superficielle du métal, et, en la dissolvant, enlever aussi le magnétisme de la surface; on retrouve alors l'aimantation profonde. Si l'on ne pousse pas l'opération jusqu'au bout, l'acide attaque, surtout en commençant, les arêtes et les extrémités du barreau, de telle sorte que l'aimantation super-

ficielle, résistant à la surface, l'aimantation profonde et inverse est mise à nu par points aux extrémités.

**FORME DES AIMANTS. — ARMURES ET ARMATURES.** — Les aimants perdent lentement leurs facultés si celles-ci ne sont pas perpétuellement en jeu ; c'est pourquoi on leur donne des *armures*, c'est-à-dire des pièces de fer doux qu'on met en contact avec les pôles. Soit, par exemple, un aimant naturel (*fig. 69*) : sur les deux faces polaires on place deux lames de fer doux A et B, serties par des pièces de cuivre et se prolongeant par les prismes *p* et *p'* qui deviennent les pôles de l'aimant. Une pièce de fer doux *c*, appelée *contact*, *armure* ou *armature*, est soutenue par la force de l'aimant ainsi qu'un poids qui y est attaché. L'aimant, étant ainsi sans cesse en activité, conserve sa puissance, et celle-ci peut même s'accroître.

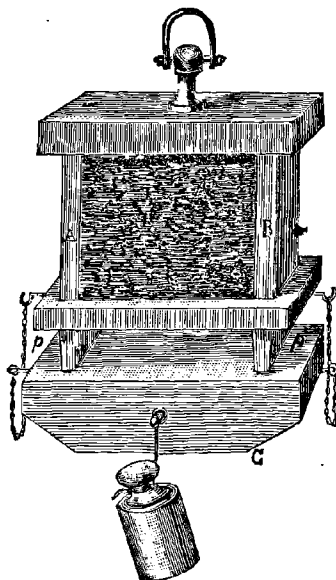


Fig. 69. — AIMANT NATUREL ARMÉ.

Dans un aimant artificiel, rien n'est plus facile que de placer l'armature, puisque l'on sait où sont les pôles, mais il n'en est pas de même d'un aimant naturel, où la position des pôles est inconnue. Il faut commencer d'abord par les déterminer ; on scie ensuite les deux côtés où ils se trouvent, perpendiculairement à l'axe polaire, de manière à conserver la plus grande longueur possible. On polit les faces, puis on leur applique les armures. On est dans l'usage de donner au *contact* 11 millimètres de plus que la distance qui se trouve entre les faces extérieures des pieds de l'armure ; on ne lui donne aussi que le tiers de l'épaisseur de l'aimant. L'expérience a indiqué que la surface de contact du *portant* doit être polie et légèrement arrondie, de telle sorte qu'il ne touche l'aimant que, par une seule ligne.

Les aimants artificiels en fer à cheval, à égalité de longueur et de largeur, ont une force relative plus grande quand ils sont plus épais, ainsi que cela résulte des expériences de Coulomb ; en outre, quand on augmente leurs dimensions, les poids portés par les aimants sont comparativement moindres.

Pour donner une idée des limites entre lesquelles les actions sont

comprises, nous citerons les résultats suivants donnés par M. Becquerel, et obtenus dans la construction d'aimants formés de lames d'acier de 0<sup>m</sup>,01 d'épaisseur.

POIDS DE L'AIMANT.	POIDS PORTÉ.	RAPPORT DES POIDS.
1 <sup>er</sup> ..... 0 kil. 52	1 <sup>er</sup> ..... 14 kil.	27
2 <sup>e</sup> ..... 0 — 99	2 <sup>e</sup> ..... 23 —	25
3 <sup>e</sup> ..... 10 — 40	3 <sup>e</sup> ..... 105 —	10

Ainsi, le plus gros aimant a porté 10 fois son poids et le plus petit 27 fois.

On ne peut toutefois fixer aucune règle précise quant au poids porté par

les divers aimants, les résultats que l'on obtient dépendant non seulement des dimensions des aimants et de leur poids, mais encore de la trempe de l'acier. Les aimants naturels sont, en général, très faibles; les petits, plus puissants relativement que les grands; ils portent rarement plus de 10 fois leur poids. Cependant leur pouvoir s'accroît si on les garnit d'armatures de fer doux.

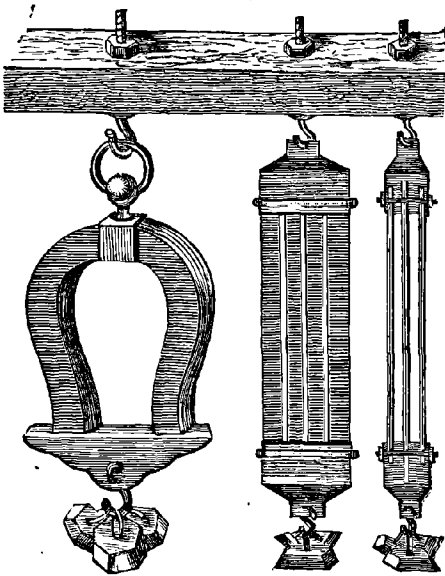
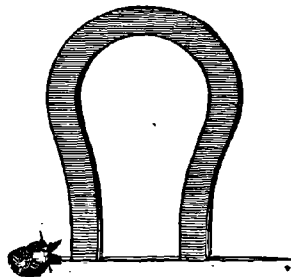


Fig. 70. — FAISCEAUX AIMANTÉS.

**FAISCEAUX AIMANTÉS.** — On nomme *faisceaux aimantés* (fig. 70) un système de barreaux aimantés réunis parallèlement, les pôles du même nom en regard. Tantôt les barreaux sont droits, et alors on a un *faisceau rectiligne*, tantôt ils sont recourbés de manière à rapprocher les pôles contraires et l'on a un *faisceau en fer à cheval*.

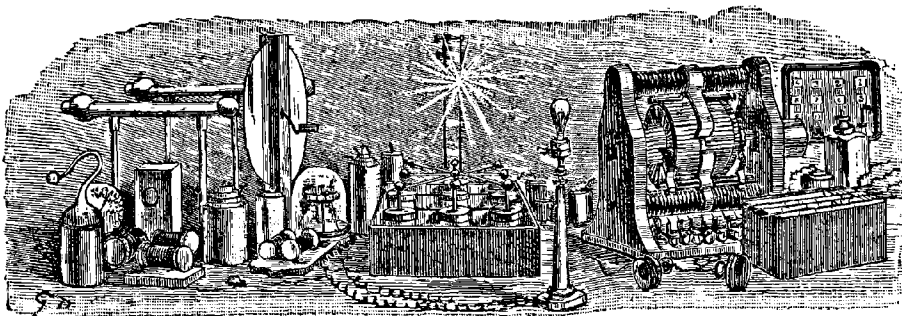




PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES







## LIVRE VII

### ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

#### CHAPITRE PREMIER

##### DE LA PILE ET DES COURANTS

**EXPÉRIENCE DE GALVANI.** — Sulzer (1), dans un ouvrage publié en 1767, et qui a pour titre : *Nouvelle théorie du plaisir*, avait parlé, rapporte M. Hoeffler, de la saveur particulière que font ressentir deux lames de métaux différents, placés dans la bouche, en observant certaines précautions qu'il indiquait. Cette indication resta inaperçue. Dans une lettre datée du 3 octobre 1784, Cotugno (2) raconte que, en voulant disséquer une souris vivante, il reçut une forte commotion dans le bras au moment où il allait ouvrir, avec son scalpel, le ventre de l'animal, et qu'il ne se serait jamais douté qu'une souris fut électrique. Quelque temps après, en 1790, Galvani (3) fit la découverte qui a immortalisé son nom.

Cette découverte a été racontée avec bien des variantes. On rapporte

(1) SULZER (Georges), savant professeur suisse (1720-1779), d'abord vicaire d'un curé de campagne, puis maître d'école, obtint une chaire de mathématiques à Berlin, puis devint membre de l'Académie de cette ville. On a de lui des travaux estimés sur la psychologie et les beaux-arts.

(2) COTUGNO (J.-B.), professeur d'anatomie à Naples (1742-1808).

(3) GALVANI (Aloys), médecin et physicien italien (1737-1798), fut nommé professeur d'anatomie à Bologne en 1762. Il perdit cette place lors de l'établissement de la République cisalpine, pour n'avoir pas voulu prêter serment au nouveau gouvernement. Il mourut dans l'indigence. Il publia en 1791 le résultat de ses expériences, sous le titre : *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius* (in-4°, Bologne).

que, dépouillant des grenouilles pour en préparer un bouillon à sa femme, Lucia Galeazzi, qui se mourait de la poitrine, il arriva qu'ayant, par hasard, touché avec deux métaux différents les nerfs lombaires d'une de ces grenouilles, dont les pattes postérieures avaient été séparées du tronc, ces deux pattes se contractèrent vivement. On dit encore que Galvani, ayant disséqué plusieurs grenouilles pour étudier leur système nerveux, avait suspendu tous les trains de derrière à un balcon en fer, au moyen d'un crochet en cuivre, engagé dans les nerfs lombaires, et que, toutes les

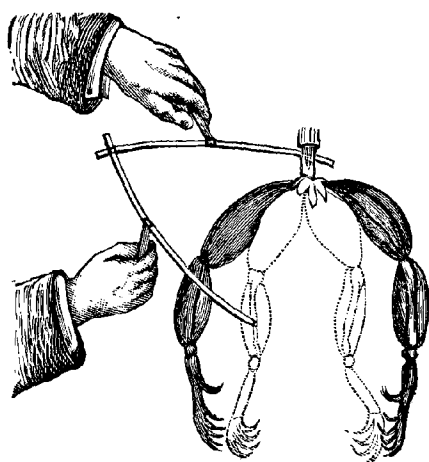


Fig. 71. — EXPÉRIENCE DE GALVANI.

fois que, dans le balancement que le hasard leur imprimait, ces mêmes nerfs touchaient le fer, il arriva que le phénomène de contraction se produisit. Suivant un autre récit, dans une de ces réunions d'amateurs d'expériences électriques qui se tenaient alors, un jour, dans le laboratoire de Galvani, qui s'occupait alors de l'étude des grenouilles, quelques-uns de ces animaux avaient été placés sur la table de la machine électrique; un des assistants s'amusa à faire tourner la roue et

à tirer des étincelles, sans se préoccuper des grenouilles. Quel ne fut pas l'étonnement de tous, lorsqu'ils virent, à chaque étincelle, les muscles de l'animal mort et dépouillé agités de violentes convulsions!

De quelque manière que ce phénomène soit venu à sa connaissance, Galvani l'étudia avec une rare sagacité, et découvrit bientôt les conditions nécessaires pour le reproduire à volonté, ce qui est le point important. Pour faire cette expérience, on enlève d'un coup de ciseaux les bras et la tête d'une grenouille, puis les membres inférieurs étant rapidement dépouillés, on laisse tenir ces derniers à la partie supérieure du corps uniquement par les nerfs cruraux, filets blanchâtres très distincts, qui se trouvent à la jonction des deux cuisses et suivent la colonne vertébrale (fig. 71); puis, avec un arc formé d'une tige de cuivre et d'une tige de zinc, on touche à la fois les nerfs cruraux et les muscles lombaires. A chaque contact les muscles se contractent et s'agitent; on dirait que cette moitié d'animal reprend vie et veut sauter. Ces convulsions peuvent être observées quelques heures encore après que la grenouille a cessé de vivre.

La sensation produite par cette expérience fut profonde dans le monde savant, et l'on adopta de prime abord les idées théoriques émises à ce sujet par le professeur de Bologne sur ces phénomènes. Galvani reconnaissait bien entre l'agent observé par lui et l'électricité la plus grande analogie, mais il en niait l'identité; il croyait que c'était là une électricité d'une nature toute particulière, et, pour la différencier d'avec l'autre, il l'appelait *électricité animale*, et plus tard *galvanisme*; enfin, il avait la prétention d'avoir mis la main sur le *fluide nerveux*, le *fluide vital* :

« Tous les animaux, disait-il, jouissent d'une électricité inhérente à leur économie, qui réside spécialement dans les nerfs, et par lesquels elle est communiquée au corps entier. Elle est sécrétée par le cerveau; la substance intérieure des nerfs est douée d'une vertu conductrice pour cette électricité, et facilite son mouvement et son passage à travers les nerfs; en même temps l'enduit huileux de ces organes empêche la dissipation du fluide et permet son accumulation. »

Les expériences de Galvani furent répétées dans le monde entier par tous les physiiciens. Les médecins, les physiologistes en adoptèrent avec enthousiasme les théories, pensant déjà avoir trouvé le secret de la vie. Hypothèse aussi séduisante qu'elle fut éphémère!

**EXPÉRIENCE DE VOLTA. DÉCOUVERTE DE LA PILE.** — Volta (1) avait répété l'expérience de Galvani, et constaté que, quand l'arc métallique qui unissait les muscles et les nerfs de la grenouille était formé d'un seul métal, les convulsions étaient à peine sensibles, et, qu'au contraire, elles devenaient très prononcées lorsque l'arc conducteur était formé de deux métaux différents. Il concluait de là que le fluide électrique n'était pas renfermé dans la grenouille, comme le disait Galvani, mais qu'il se développait dans les métaux mêmes. Un débat mémorable s'engagea alors entre Galvani et lui. Chacun des deux savants soutint son opinion et voulut l'étayer de faits nouveaux. C'est ainsi que Volta construisit la pile, de toutes les découvertes modernes la plus féconde en résultats.

Il avait, dès 1794, édifié sa théorie; son esprit, absorbé par cette idée, y revenait sans cesse, cherchant le moyen de confirmer ses assertions par des

(1) VOLTA (Alexandre), célèbre physicien italien (1745-1827), d'abord professeur à Côme, sa ville natale, entretenait à dix-huit ans une correspondance avec l'abbé Nollet, devint professeur de physique à l'université de Pavie en 1779. Bonaparte le fit comte et sénateur du royaume d'Italie, et l'inscrivit le premier sur la liste des membres de l'Institut italique. Il était déjà, depuis 1803, membre correspondant de celui de France. Il a imaginé de nombreux appareils relatifs à l'électricité, mais l'invention de la pile est son principal titre de gloire. Appelé en France après cette découverte, il y reçut la médaille d'or de l'Institut. Il se retira dans la retraite en 1819.

preuves concluantes. Il était alors fort embarrassé par un fait dont il ne pouvait se rendre compte. Il avait mis en contact deux disques, l'un de zinc, l'autre de cuivre, et, sur ces deux métaux, il avait reconnu la présence de l'électricité, mais tous deux étaient électrisés de la même façon, tandis que, d'après la théorie, ils auraient dû l'être d'une façon inverse. Or, un jour, en 1800, il lisait dans un journal de Rome le récit de l'élection du pape Pie VII. Malgré lui, son attention ne pouvait s'attacher à sa lecture, sa pensée se reportait sans cesse vers le phénomène inexplicable. Machinalement ayant détaché un coin du journal et l'ayant mis à sa bouche, il lui vint la fantaisie d'employer à son expérience ce petit morceau de papier humide. Obéissant à cette inspiration, il prit ses disques, et plaça le papier humide sur l'appareil qui lui servait à désigner la nature de l'électricité. La difficulté était vaincue ! Chacun des métaux était électrisé d'une manière différente. Il comprit alors que jusqu'à ce moment il se trompait. Pour reconnaître l'électricité d'un disque, il le mettait en contact avec du laiton qui est du cuivre presque pur. Le cuivre touchant le laiton, deux substances semblables étaient en contact ; le zinc touchant le laiton, les deux métaux étaient différents, et le couple primitif, zinc-cuivre, était reproduit. Volta, qui croyait étudier chaque métal séparément, n'observait en réalité que le cuivre. Mais, en touchant le laiton par l'intermédiaire du papier humide, il ne faisait pas intervenir un troisième métal, et rentrait dans les conditions exigées par sa théorie. Dès lors, la pile était inventée (1).

Laissons Volta lui-même rendre compte de son immortelle découverte (2).

« Après avoir bien vu quel degré d'électricité j'obtiens d'une seule de ces couples métalliques à l'aide du condensateur dont je me sers, je passe à montrer qu'avec deux, trois, quatre, etc., couples bien arrangés, c'est-à-dire tournés toutes dans le même sens et communiquant toutes les unes avec les autres par autant de couches humides (qui sont nécessaires pour qu'il n'y ait pas d'actions en sens contraire, comme je l'ai montré), on a justement le double, le triple, le quadruple, etc.; de sorte que si avec une seule couple on arrivait à électriser le condensateur au point de lui faire donner à l'électromètre, par exemple, trois degrés, avec deux couples, on arriverait à six, avec trois à neuf, avec quatre à douze, etc., sinon exactement, du moins à peu près. Voilà donc déjà une petite pile construite ; elle ne donne pas encore des signes à l'électromètre, sans le secours du condensateur. Pour qu'elle en donne immédiatement, pour qu'elle arrive à un

(1) J. Baille, *l'Électricité* (Hachette, 1880).

(2) *Lettre à La Méthérie*, publiée dans le *Journal de physique*, année 1801.

degré entier de tension électrique, qu'on pourra à peine distinguer, étant marqué par une demi-ligne dont s'écarteront les pointes des paillettes, il faut qu'une telle pile soit composée d'environ soixante de ces couples de cuivre et de zinc, à raison d'un soixantième de degré que donne chaque couple. Alors elle donne aussi quelques secousses si on touche les extrémités avec des doigts qui ne soient pas secs, et de beaucoup plus fortes si on les touche avec des métaux qu'on empoigne par de larges surfaces avec des mains bien humides, établissant ainsi une beaucoup meilleure communication. De cette manière, on peut déjà avoir des commotions d'un appareil, soit à pile, soit à tasse, de vingt et même de trente couples, pourvu que les métaux soient suffisamment nets et propres, et surtout que les couches humides interposées ne soient pas de l'eau simple et pure, mais des solutions salines assez concentrées. »

Perfectionnée successivement par Cruikshank, qui imagina de fixer les couples métalliques à une colonne en bois verticale; par Parrot, qui donna aux couples métalliques une disposition horizontale, par Voight, Robertson, Van Marum et une foule d'autres physiciens, la *pile de Volta*, ou *pile à colonnes*, se compose (fig. 72) d'une série de disques superposés dont chacun est formé d'une rondelle de cuivre soudée à une rondelle de zinc. Ces disques sont appelés *couples*; les couples sont séparés les uns des autres par des rondelles de drap, mouillé avec de l'eau légèrement aiguisée d'acide sulfurique; à chacune des extrémités de la pile est attaché un fil métallique : celui qui communique au zinc extrême se charge de fluide *positif*, celui qui aboutit au cuivre, à l'autre extrémité, de fluide négatif.

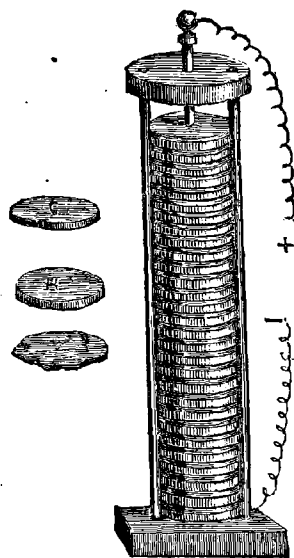


Fig. 72. — PILE A COLONNES.

On appelle un *élément* de la pile un métal attaquable, le zinc; un corps inattaquable ou peu attaquable, le cuivre, et un liquide attaquant. Les *pôles* ou *électrodes* sont les extrémités où les électricités s'accumulent; le pôle *positif* est désigné sous le nom d'*anode*, l'autre de *négatif* ou *cathode*. La circulation d'électricité qui est censée continuer sans cesse par le fil d'un pôle à l'autre est le *courant*; ce fil est le *rhéophore*. Enfin, on nomme *électricité voltaïque* l'électricité dégagée par les piles.

On ne peut douter que les deux fluides positif et négatif, accumulés aux deux extrémités de la pile, et se portant l'un vers l'autre pour se reconstituer quand ils sont en communication, n'agissent de la même

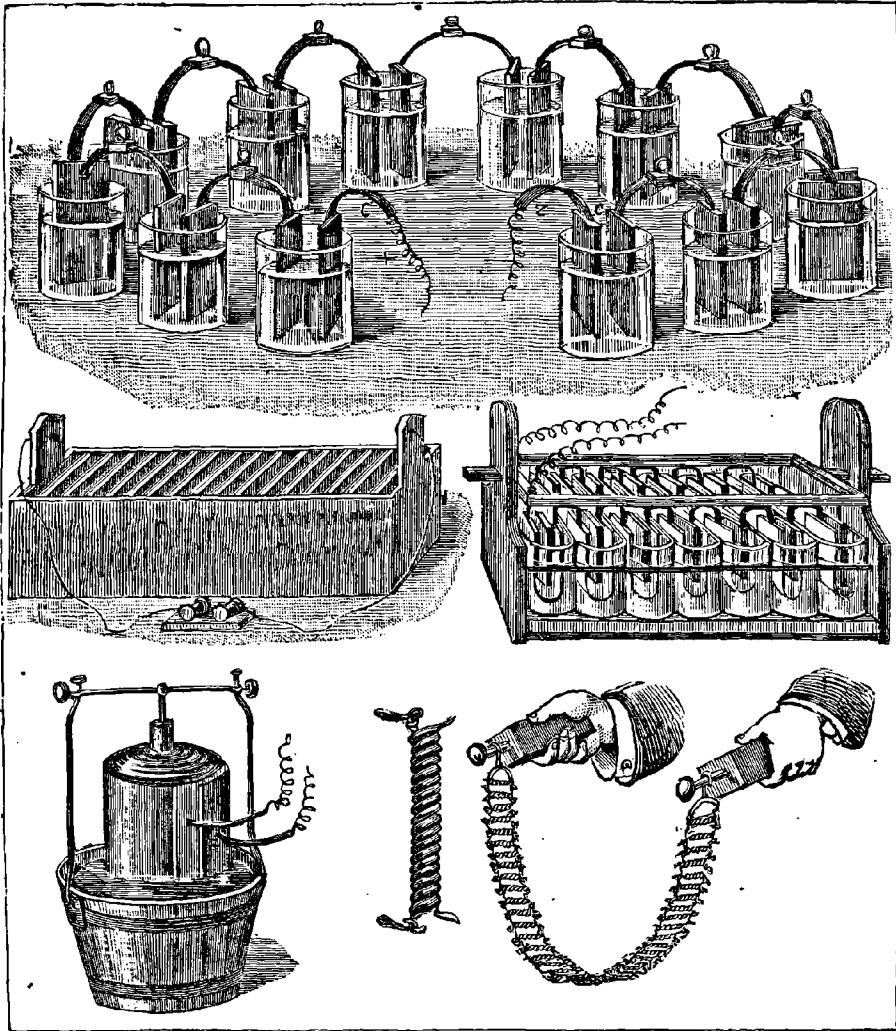
façon aux deux pôles, et qu'en conséquence le fil ne soit incessamment sillonné par deux courants contraires. Le même effet doit se produire également dans la pile; de sorte que le fil conducteur et la pile forment un circuit complet dans lequel se meuvent circulairement et en sens contraire les deux électricités. Mais, pour faciliter les explications, *il est convenu* de ne considérer dans le fil conducteur qu'un seul *courant d'électricité positive*, allant du pôle zinc au pôle cuivre, tandis que le *courant négatif* traverse la pile elle-même pour se porter du pôle cuivre au pôle zinc.

**THÉORIE DE LA PILE.** — Pour expliquer les effets de son appareil, Volta admettait : 1° qu'au *contact* des deux métaux se développe ce qu'il appelle une *force électromotrice*, séparant les électricités du fluide neutre, et les repoussant chacune dans un sens différent ; 2° qu'il existe des corps conducteurs, mais non électromoteurs, qui peuvent être mis *en contact* avec d'autres sans produire d'électricité, mais qui peuvent conduire facilement ce fluide ; 3° que l'électricité produite par chaque couple se propageait tout entière dans la pile, sans pour cela être être modifiée par l'électricité provenant des autres couples, et que, de cette façon, l'énergie de la pile était proportionnelle au nombre des couples.

Ces idées théoriques, dit fort justement M. Deschanel, ne sauraient supporter un examen sérieux ; elles sont, on peut dire, en contradiction manifeste avec ce qu'il y a de plus fondamental dans la science. S'il y a, en effet, un principe absolu, c'est que les forces physiques ne se créent pas, qu'elles naissent les unes des autres en éprouvant diverses transformations, mais qu'il n'est pas plus en notre pouvoir de les créer ou de les détruire qu'il ne l'est de créer ou de détruire la matière ! Comment comprendre dès lors que le courant, qui est susceptible de produire lui-même des phénomènes actifs de diverses sortes, puisse avoir pour origine le phénomène passif du *contact* ? Cela est tout à fait contradictoire. Mais qu'on regarde fonctionner une pile : à mesure que se produit à l'extérieur de l'appareil le travail propre du courant, on voit à l'intérieur un travail correspondant, dont le premier est la transformation et la conséquence ; c'est le travail chimique. Si donc nous utilisons, pour diverses expériences, la chaleur, la lumière ou une action quelconque, due aux courants, c'est parce qu'un certain travail chimique s'est accompli, lequel s'est partiellement transformé ; ce n'est donc que grâce à une certaine dépense que nous obtenons un effet déterminé, conformément aux principes fondamentaux de la mécanique.



**PILES DIVERSES.** — La forme de la *pile à colonnes* était trop incommode pour qu'elle pût subsister longtemps ; un des principaux inconvénients provenait de ce que la pression occasionnée par le poids des disques exprimait



Piles diverses (pages 209 et suivantes).

le liquide des rondelles humides et diminuait peu à peu l'action de la pile. La forme la plus simple d'un perfectionnement consistait donc à placer séparément les parties humides de l'appareil ; aussi Volta lui-même imagina-t-il la *pile à couronne de tasses* (*fig.* à la page 209). Cette pile se

compose de vases en verre pleins d'eau acidulée par l'acide sulfurique au vingtième ou au trentième, et placés à côté les uns des autres; dans chacun de ces vases plonge l'un des bouts d'une lame mixte formée par la réunion de deux lames de cuivre C et de zinc Z. Chaque vase avec sa dissolution et ses lames de zinc et de cuivre forme un *couple* ou *élément*. Le pôle négatif se trouve à l'extrémité du dernier zinc, le pôle positif au dernier cuivre.

La pile à couronne était encore peu commode à cause des manipulations assez longues qu'elle occasionne; Cruikshank lui substitua la *pile à auge* (*fig.* à la page 209). Dans cette pile, les couples, soudés rectangulairement, sont disposés de champ et parallèlement dans une caisse de bois dont les parois intérieures sont enduites d'un vernis non conducteur. L'intervalle compris entre deux couples est rempli d'eau acidulée d'un acide minéral qui remplace la rondelle humide de la pile à colonnes.

Cette pile fut remplacée par la *pile de Wollaston*, appelée aussi *pile à bœaux* (*fig.* à la page 209), dans le double but de faciliter la manipulation de la pile et de multiplier la surface du cuivre, c'est-à-dire du métal qui sert à recueillir l'électricité positive de l'eau acidulée. Un élément de cette pile se compose d'une lame de zinc entourée par une lame de cuivre qui ne la touche pas, de petits morceaux de bois isolants s'opposant au contact. On plonge l'élément dans un vase en cuivre contenant de l'eau acidulée; le zinc s'attaque, la force électromotrice se développe au point où l'action chimique a lieu, le fluide négatif se répand sur le zinc, et le positif dans l'eau acidulée où il se trouve recueilli par la lame de cuivre qui devient l'électrode positif. Pour former une pile avec ces éléments, on réunit le zinc d'un élément au cuivre du suivant; le zinc et le cuivre qui restent seuls deviennent les deux pôles. Tous les couples, par les lames qui les reliait, sont fixés à un cadre de bois qu'on élève ou qu'on abaisse à volonté entre deux montants de bois. Quand on veut faire fonctionner la pile, on soulève le cadre et avec lui tous les couples, et on maintient tout le système à l'aide de deux goupilles de fer qu'on introduit dans les montants au-dessous des deux poignées du cadre.

Quelquefois on se sert d'un seul élément à la Wollaston, d'une surface assez grande. On a substitué à ce couple isolé un couple en hélice, dont la surface est plus étendue, et qui est destiné à fournir une grande quantité d'électricité à faible tension. Cette *pile en hélice* (*fig.* à la page 209) se forme en roulant autour d'un cylindre en bois deux lames, l'une de cuivre, l'autre de zinc, mais de façon qu'elles restent séparées l'une de l'autre par du drap ou des morceaux de bois. On met ce couple en activité en le plongeant dans un tonneau rempli d'eau acidulée.

Citons encore la forme de piles adoptée par M. Pulvermacher, qui

peut être fort commode pour obtenir des effets de tension assez considérables, pour être utilisée comme appareil électro-médical. Chaque couple de cette pile, dite *pile en chaîne*, se compose (*fig.* à la page 209) d'un petit cylindre en bois, dont les dimensions varient depuis 2 centimètres de longueur jusqu'à 5 ou 6, et de 5 à 10 millimètres de diamètre. Deux fils métalliques, l'un en zinc, l'autre en laiton, sont enroulés en hélice autour de ce petit cylindre, mais parallèlement, à 1/2 millimètre de distance et sans se toucher. Le premier aboutit à deux crochets en laiton fixés dans le bois, et le deuxième à deux autres crochets. En plongeant ce système dans du vinaigre ordinaire, les deux métaux et le bois humide constituent un élément voltaïque, qui cesse de fonctionner quand le bois est sec. Si on réunit cinquante ou soixante éléments semblables en les accrochant l'un à l'autre par les pôles de nom contraire, on forme une chaîne qui est une pile voltaïque. On peut aussi disposer quelques-uns de ces petits cylindres parallèlement dans des boîtes en verre ou en bois. Perfectionnées incessamment par leur inventeur, ces piles viennent récemment de recevoir de lui deux importantes modifications. On reprochait à ces piles d'être très vite hors d'usage par suite de l'usure rapide des zincs. M. Pulvermacher a rendu ces zincs mobiles, ce qui permet de les remplacer pour un prix insignifiant. Puis il a imaginé un outil qui lui permet de tresser le fil de zinc et le fil de cuivre en même temps qu'un fil de coton qui sert à les séparer et qui, étant hygrométrique, retient une quantité suffisante d'humidité pour que l'attaque du zinc se produise. Dix à quinze spires de zinc ainsi accolées à autant de spires de cuivre fortement dosées et séparées par le fil de coton forment un élément. La tension obtenue avec cette chaîne est assez forte.

Nous parlerons enfin des piles dites *piles sèches*. Quelque temps après la découverte de Volta, on chercha à ne pas employer de liquide actif. MM. Hachette et Desormes remplacèrent d'abord le liquide dans les piles ordinaires par la colle d'amidon; quelques années après, Deluc forma une colonne composée de disques de zinc et de papier doré seulement d'un côté, entassés les uns sur les autres, le zinc en contact avec la face dorée du papier. L'humidité du papier suffisait pour charger la pile. Zamboni, en 1812, cherchant le mouvement perpétuel, en plaçant un levier mobile entre deux piles sèches, perfectionna l'appareil Deluc. On entasse, en les pressant fortement les uns contre les autres des milliers de disques de papier, dont l'une des faces est étamée, et l'autre recouverte d'une couche très mince de peroxyde de manganèse, broyé avec un mélange de farine et de lait. L'humidité du papier sert encore à établir la circulation d'électricité, qui, en raison du peu de conductibilité du papier, donne une charge aux

\*

deux extrémités de la pile plus lentement que dans les piles ordinaires. Les piles de ce genre cessent de fonctionner au bout d'un certain temps, quand le papier a perdu toute son humidité. On ralentit habituellement cette déperdition en coulant du soufre autour de la pile sèche et en ne laissant à nu que les deux extrémités. On peut, à l'aide de ces piles, charger facilement un condensateur et même obtenir des étincelles ; mais la quantité d'électricité produite étant très petite, les autres effets sont souvent inappréciables. Ces piles n'ont, en conséquence, servi jusqu'ici qu'à provoquer des mouvements continus au moyen des faibles attractions et répulsions qu'exercent les électricités accumulées aux deux pôles, et encore ces mouvements s'arrêtent bientôt.

**PILES A COURANT CONSTANT.** — Les différentes piles décrites ci-dessus, et qui ont été plus ou moins modifiées par de nombreux physiciens, sont toutes à un seul liquide : l'électricité y est toujours produite par une décomposition de l'eau et une oxydation du zinc. Dans les premiers instants ces piles donnent un courant assez énergique ; mais le courant diminue très rapidement, et l'on ne peut songer à les employer quand il faut une action active et constante. Ce phénomène est dû : 1° à l'affaiblissement de l'action chimique par suite de la neutralisation de l'acide sulfurique à mesure qu'il agit sur le zinc ; 2° à la formation de *courants secondaires* en sens inverses du courant principal par suite de la décomposition du sulfate de zinc déjà formé, d'où résulte le dépôt d'une couche de zinc à la surface des plaques de cuivre.

On a obtenu d'autres piles, dites à *courant constant*, construites avec deux dissolutions différentes séparées l'une de l'autre par des diaphragmes poreux, dans lesquels sont plongés les solides, et avec lesquelles ces inconvénients disparaissent en partie.

La pile inventée par Daniell, et qui porte son nom, est une des premières dont on ait fait usage. Chacun des éléments de cette pile se compose (*fig. 73*) d'un vase extérieur en verre dans lequel est reçu un cylindre en cuivre rouge ouvert à ses deux extrémités et percé de trous latéralement. A la partie supérieure de ce cylindre est une rigole dont le fond est également percé de petits trous. Dans ce cylindre on place un second vase en terre poreuse, lequel contient un autre cylindre en zinc, ouvert aussi par ses deux bouts et amalgamé. Enfin, les deux cylindres de cuivre et de zinc portent chacun une patte en cuivre qui sert à transmettre le courant aux électrodes, qui sont fixés par des vis de pression. Pour mettre cet appareil en activité, on verse dans le vase extérieur en verre une dissolution saturée de sulfate de cuivre, et dans le vase en

terre poreuse une autre dissolution de chlorure de sodium ou de sulfate de zinc. On dispose ensuite quelques cristaux de sulfate de cuivre dans la petite rigole circulaire, dont le fond, percé de trous, doit plonger dans la dissolution de cuivre. Ces cristaux ont pour but de maintenir constamment cette dissolution à l'état de saturation. Il suffit, pour former la pile, de réunir un certain nombre de ces éléments en les faisant communiquer par les pôles contraires.

Tant que les deux électrodes ne communiquent pas entre eux, la pile reste inactive ; mais aussitôt que la communication est établie, on observe

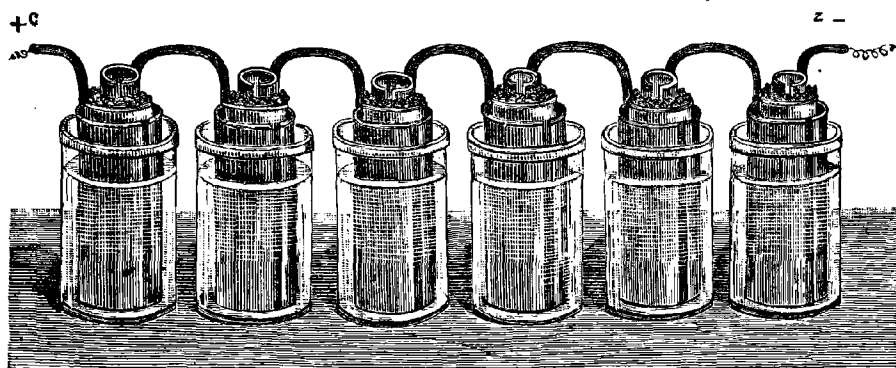


Fig. 73. — PILE DE DANIELL.

un courant dont l'intensité peut demeurer constante pendant très longtemps.

Voici ce qui se passe dans chaque élément ; l'eau est décomposée ; son oxygène se combine avec le zinc, qu'il électrise négativement, tandis que l'hydrogène à l'état naissant se porte, à travers le vase en terre poreuse, sur le sulfate de cuivre, qu'il décompose en réduisant son oxyde.

Le dépôt de cuivre sans adhérence et pulvérulent se forme peu à peu sur les parois du cylindre en cuivre, qui s'électrise alors positivement. Quant à l'acide sulfurique provenant de la décomposition du sulfate de cuivre, il se porte sur l'oxyde de zinc pour le transformer en sulfate.

Ainsi, dans cette pile, c'est le zinc qui forme le pôle négatif et le cuivre qui constitue le pôle positif. Dans la pile voltaïque la disposition des pôles est inverse.

M. Marié-Davy a eu l'idée de perfectionner cette pile, déjà modifiée par M. Bréguet. Chaque élément se compose d'un vase extérieur en verre, rempli d'eau pure, dans lequel est reçu un cylindre en zinc ouvert à ses

deux extrémités. Dans ce cylindre est un second vase en terre poreuse qui contient un cylindre de charbon des cornués à gaz, lequel plonge dans du sulfate de mercure, réduit en poudre, délayé dans une petite quantité d'eau et renfermé dans le vase de terre poreuse. Cette pile a l'avantage de ne s'user que très lentement et de donner un courant d'une grande constance, ce qui la rend plus commode pour l'usage des télégraphes et autres appareils qui n'ont besoin que d'une pile peu énergique.

Mais la pile dont on fait presque exclusivement usage aujourd'hui

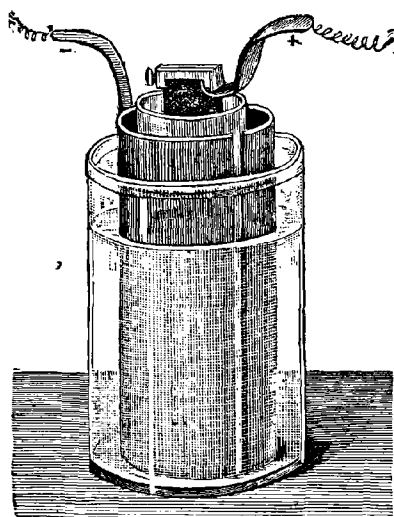


Fig. 74. — ÉLÉMENTS DE BUNSEN.

dans les cabinets de physique porte le nom de *pile de Bunsen*, et date de 1843. Il faut dire que cette pile n'est qu'une modification de celle de Grove, construite quelques années auparavant; Bunsen (1) n'a fait que remplacer la lame de platine de la pile de Grove par du charbon. D'ailleurs, l'élément primitif de Bunsen n'était même pas tel qu'il est aujourd'hui; il a été modifié successivement par de nombreux constructeurs et l'est encore journellement.

Cette pile se compose, en fait, d'éléments formés d'un vase extérieur plein d'eau acidulée dans lequel plonge un vase de terre poreuse (*fig. 74*); ce vase renferme de l'acide nitrique du commerce

(à 40°), et l'on y fait plonger un prisme de charbon de cornue; puis on réunit successivement à l'aide de pinces le charbon d'un élément avec le zinc de l'élément suivant; le pôle positif correspond évidemment au dernier charbon et le pôle négatif au dernier zinc.

La pile de Bunsen est surtout employée industriellement en Amérique; en France, on se sert plutôt de la pile Daniell ou de la pile Marié-Davy; cependant, depuis quelques années, on a introduit dans l'usage des télégraphes la pile Leclanché. Dans cet appareil, le vase poreux renferme, au lieu de liquide, une poudre noire très chargée d'oxygène (peroxyde de manganèse). Le liquide acidulé est aussi remplacé par du chlorhydrate d'ammoniaque de Lavoisier, ou quelquefois par du sel marin ordinaire. C'est dans cette dissolution que plonge la tige de zinc. Cette pile a un débit

(1) BUNSEN (Robert-Guillaume), chimiste éminent, professeur à l'université de Heidelberg (1811-1860), correspondant de l'Académie des sciences.

très constant, la production d'électricité est très régulière; de plus, la dépense est relativement assez faible, la surveillance et l'entretien faciles. Son seul inconvénient est que le débit est assez faible et qu'il faut associer un grand nombre de couples pour avoir un courant convenable.

Cette pile a encore été perfectionnée récemment, principalement par MM. Clamond et Gaïffe, en substituant le sesquioxyde de fer au peroxyde de manganèse, et par le mode de fabrication qui est plus économique.

Mentionnons encore la *pile au bichromate de potasse*. Ce fut Bunsen qui, le premier, signala à l'attention des électriciens le bichromate de potasse pour remplacer l'acide azotique; mais, en même temps, il les mettait en garde contre un obstacle qu'il n'avait pu franchir lui-même: l'action de la pile, d'abord d'une incomparable énergie, était éphémère; presque aussitôt le courant se ralentissait, si bien que la pile s'éteignait au bout de quelques instants. C'est pourquoi Bunsen, tout en faisant grand cas du bichromate de potasse, renonça à s'en servir. Cependant l'énergie du courant avait frappé plus d'un esprit; si courte qu'elle fût, elle suffisait pour rendre incandescents certains instruments de chirurgie, tels que les cautères olivaires et les couteaux de fer. Aussi deux médecins anglais, Leeson et Warington, reprirent-ils avec quelque succès la première idée de Bunsen. Mais ce fut Poggendorf, déjà connu par ses travaux sur le magnétisme, qui jeta sur la question une vive lumière en publiant un mémoire sur ces piles. Alors, on construisit facilement les piles au bichromate de potasse. L'élément est formé d'un ballon (*fig. 75*), contenant une dissolution de 3 parties de bichromate de potasse et de 4 parties d'acide sulfurique dans 18 parties d'eau. Dans le liquide, on fait plonger une double lame de zinc dans l'intérieur de laquelle est disposée une lame de charbon ou deux lames charbon et entre elles une lame de zinc. La double lame communique métalliquement avec une borne, placée sur le couvercle en substance isolante qui ferme le vase et qui sert de pôle positif. La tige qui supporte la lame de zinc passe à frottement doux dans un anneau métallique, réuni à une seconde borne qui sert de pôle négatif. Lorsqu'on veut suspendre

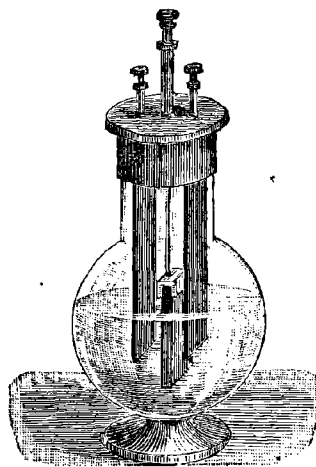


Fig. 75.

PILE AU BICHROMATE  
DE POTASSE.

l'action de la pile, on soulève la lame de zinc, afin de supprimer son contact avec le liquide.

**AMALGAMATION DU ZINC.** — Dans une pile en activité, le travail, produit à l'extérieur, correspond à l'oxydation du zinc. Si l'on met du zinc ordinaire, l'action trop vive de l'acide sulfurique donne une consommation de celui-ci sans effet utile; de plus, certains courants produits peuvent être inverses de celui de la pile et le détruire partiellement. Il faudrait du zinc chimiquement pur, mais son emploi serait trop coûteux; c'est pourquoi on se sert de zinc *amalgamé*, c'est-à-dire combiné à sa surface avec une petite quantité de mercure. Dans ce cas, le zinc n'est attaqué par l'acide sulfurique que lorsque les pôles de la pile communiquent, et il présente de plus l'avantage de donner naissance à un courant plus intense et plus régulier.

**PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.** — Le problème de la transformation directe du calorique en électricité a été admirablement résolu en 1873 par M. Clamond. Voici comment l'auteur décrit son système (1) :

« Avant d'entrer dans les détails techniques concernant mon appareil, je crois, dit-il, devoir jeter un regard rétrospectif sur la question. Les courants thermo-électriques, découverts par Seebeck (*Chaleur*, page 485) ont été l'objet d'études très approfondies de la part de savants distingués, entre autres MM. Marais et Becquerel. Ce dernier a longuement et minutieusement étudié les lois du développement des courants thermo-électriques dans des substances différentes et à diverses températures, et récemment son fils, M. Edmond Becquerel, a fait connaître une pile thermo-électrique d'une intensité remarquable.

« Avec son thermomètre thermo-électrique, M. Becquerel faisait, en 1858, dans son pavillon météorologique et climatologique du Jardin des Plantes, de précieuses observations relatives aux influences physiologiques de la chaleur et de la lumière sur les animaux et les végétaux. Il l'utilisait surtout pour mesurer exactement la température des parties intérieures du corps de l'homme et des animaux, et publia des observations sur les variations de la température des végétaux. Ce thermomètre se construit avec deux fils, l'un de fer, l'autre de cuivre, et un galvanomètre; en maintenant les deux soudures à une égale température, l'aiguille aimantée, également sollicitée par deux courants en sens contraire, se met à zéro; et la seule cause qui reste de variation n'étant plus que la chaleur de l'atmosphère ou du corps en expérience, on obtient, à un dixième de degré près, la mesure de cette chaleur dans des lieux plus ou moins éloignés de celui où l'on travaille. Cependant l'intensité du courant obtenu était trop faible pour

(1) Comptes rendus de l'Académie des sciences (20 avril 1874).



pouvoir établir sur les piles thermo-électriques des appareils industriellement utilisables.

» Le premier essai d'appareil pratique fut fait par M. Farmer, qui produisit deux de ses modèles à l'Exposition universelle de 1857. Ces appareils, réellement



AMPÈRE

remarquables, avaient le défaut de perdre rapidement leur force. Les barreaux, excessivement fragiles, se brisaient en se refroidissant. Le 31 mai 1869, M. Becquerel présentait à l'Institut une pile thermo-électrique que j'avais construite, en collaboration de M. Mure, avec des couples de galène et des lames de fer. Il consta-

tait en même temps que l'affaiblissement du courant provenait, non de la diminution de la force électro-motrice, mais de l'augmentation de la résistance de l'appareil. Je dois dire, pour rendre justice à mon collaborateur d'alors, M. Mure, que, si nos efforts communs ne parvinrent pas à rendre les piles à galène durables, ils contribuèrent à donner aux barreaux et à l'ensemble de la pile une disposition que j'ai conservée, n'en ayant pas trouvé de meilleure.

» Les recherches que j'ai faites par la suite m'ont prouvé que l'augmentation de la résistance intérieure était due à deux causes :

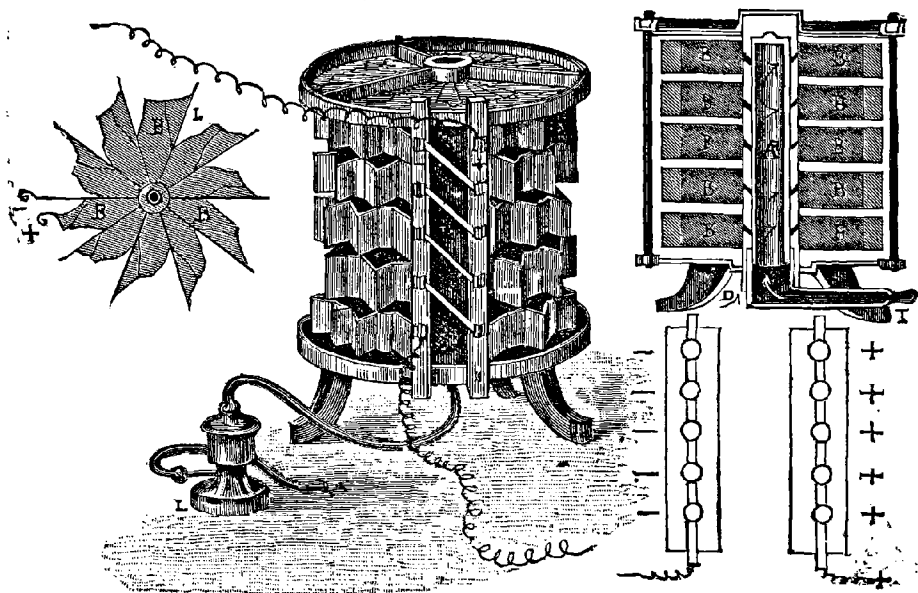


Fig. 76. — PILE THERMO-ÉLECTRIQUE DE M. CLAMOND. (Vue en perspective.)

» 1<sup>o</sup> Oxydation des contacts des lames polaires avec le barreau cristallisé sous l'influence de la chaleur.

» 2<sup>o</sup> Fendillation du barreau et séparation de ces différentes parties suivant des plans perpendiculaires à sa longueur.

» J'ai évité le premier inconvénient par une disposition particulière de l'attache de la lame polaire. A cet effet, la lame métallique, découpée au balancier, est repliée sur elle-même de manière à présenter une ou plusieurs charnières (fig. 76); ces charnières, prises dans la coulée, se trouvent d'abord enveloppées par le métal, qui s'introduit dans leur intérieur et forme ainsi des noyaux métalliques. Ces derniers, se dilatant plus que les charnières, pressent constamment contre elles, de sorte que l'action de la chaleur ne tend qu'à raffermir les contacts.

» Quant au second inconvénient, il était bien plus difficile à constater et à éviter. Lorsqu'on coule un corps thermo-électrique, soit un métal, soit un sulfure

métallique, dans un moule froid de forme cubique, il se forme trois plans de séparation, parallèles aux faces du cube, de sorte que l'on obtient, par le fait, huit cubes séparés. Ces séparations ne sont pas visibles de prime abord ; mais, après avoir chauffé plusieurs fois de suite la masse, on constate, en la brisant, l'existence de ces trois plans par des couches noires provenant de l'oxydation de ces surfaces intérieures. Ce fait peut s'expliquer en ce sens, que les corps thermo-électriques, étant dépourvus d'élasticité, et tous plus ou moins cassants, se séparent en parties distinctes qui cristallisent contre les parois du moule. Les corps thermo-électriques, coulés dans des moules froids, sont excessivement fragiles. On a cru, en faisant recuire ces barreaux, améliorer leur condition physique. Le recuit donne au barreau un aspect plus solide, mais ne fait que développer les fentes qui se sont formées par la coulée. J'ai monté des piles avec des barreaux recuits et d'autres non recuits, soit en galène, soit en alliage métallique, et j'ai toujours remarqué que les barreaux recuits faiblissaient plus rapidement encore que les autres. Les conditions à remplir pour obtenir des barreaux homogènes sont les suivantes : annihiler l'influence des parois du moule et empêcher le plus possible la cristallisation.

» J'ai employé à cet effet un procédé analogue à celui qui est usité pour donner aux bougies stéariques de la solidité en empêchant la cristallisation. Le moule étant chauffé à une température très voisine du point de fusion de la substance thermo-électrique, celle-ci est coulée elle-même très près de son point de solidification.

» J'ai adopté, pour la confection de mes couples, l'alliage de zinc et d'antimoine, employé par Marais, et des lames de fer pour armatures. J'ai adopté l'alliage antimoine et zinc, parce qu'il est bon conducteur de l'électricité, et parce que la température de son point de fusion rend plus pratique et plus facile à réaliser mon mode de coulage.

» J'emploie le fer préalablement au cuivre et à l'argent, parce que ces derniers métaux sont attaqués, dissous par l'alliage, et que les armatures qu'ils constituent sont mises rapidement hors de service ; le fer, au contraire, résiste très bien.

» Ainsi construits, les barreaux thermo-électriques ont dû constituer des piles qui ne sont plus sujettes à détérioration. J'ai dû à l'obligeance de M. Jamin la faculté de faire fonctionner ces appareils dans son laboratoire de la Sorbonne, et d'y continuer mes études et mes travaux. C'est ainsi qu'un de mes appareils y a fonctionné six mois sans éprouver de variations.

» Voici du reste la description de l'appareil.

» Le tout forme un cylindre, dont l'intérieur est luté avec de l'amiante et chauffé au moyen d'un tuyau en terre réfractaire, percé de trous. Le gaz, mélangé à l'air, sort de l'intérieur de ce tuyau et vient brûler dans l'espace annulaire compris entre le tube et les barreaux. Les extrémités des couronnes viennent aboutir à des pinces en cuivre fixées sur deux planchettes. Les couronnes peuvent être accouplées en tension ou en surface : la surface que peut recouvrir chaque cou-

ronne est de 7 décimètres carrés, ce qui fait 35 centimètres carrés pour toute la pile. On obtient alors un dépôt moyen de 20 grammes à l'heure de cuivre de bonne qualité. La dépense du gaz est réglée au moyen d'un régulateur, qui la rend invariable et la met à l'abri des variations de pression.

» Ainsi disposée et construite, la pile marche des mois entiers sans entretien ni surveillance, fournissant un courant absolument constant. »

Cette pile électro-thermique est employée à l'imprimerie de la Banque de France, dans les ateliers galvanoplastiques que MM. Goupil et C<sup>ie</sup> ont installés à Asnières pour des opérations d'héliogravure; partout elle donne d'excellents résultats.

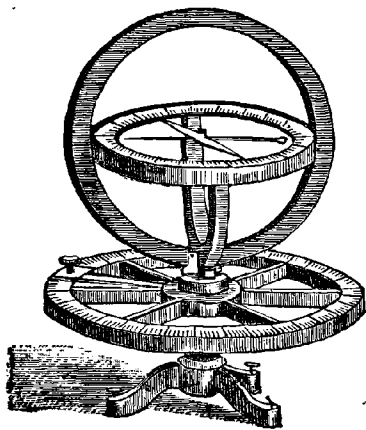


Fig. 77. — BOUSSOLE DES SINUS.

ment employé; c'est-à-dire que l'on compare la déviation de l'aiguille produite successivement par les courants qu'on veut étudier. Nous reviendrons ci-après sur la construction et les principes sur lesquels reposent cet instrument et tous les rhéomètres. Pour obtenir une précision plus grande, on se sert de la *boussole des sinus*, instrument construit par M. Pouillet sur les principes indiqués par de La Rive. Cet instrument se compose (*fig. 77*) d'une aiguille aimantée de 12 à 15 centimètres de longueur, munie d'une chape en agate par laquelle elle repose sur un pivot d'acier. Un fil recouvert de soie, et dans lequel on fait circuler le courant électrique à examiner, s'enroule sur la gorge d'un cercle vertical. Ce cercle étant dans le plan du méridien magnétique, l'extrémité de l'aiguille est en face d'un repère tracé sur le cercle horizontal placé au-dessous d'elle, cercle qui n'a pas besoin d'être divisé. Dès que le courant passe, l'aiguille est déviée; mais l'appareil peut tourner autour de son axe et être amené dans une position telle, que l'aiguille soit encore en face du repère. On déduit de considérations mécaniques que l'intensité

**INTENSITÉ DES COURANTS. — MESURE DE CETTE INTENSITÉ.** — L'*intensité* d'un courant électrique est l'effet plus ou moins énergique qu'il produit. Ce courant se mesure au moyen d'appareils portant le nom générique de *rhéomètres* (du grec *rheos*, courant, *metron*, mesure). Quand les courants sont très faibles, comme ceux qui se produisent dans les expériences sur la chaleur rayonnante (*Chaleur*, page 484), le *galvanomètre* est l'instru-

du courant est proportionnelle au sinus de l'angle dont le cadre s'est déplacé, angle que l'on peut lire sur un cercle horizontal porté par l'instrument à sa partie inférieure. L'aiguille étant au-dessous du cadre, quand elle est à son repère, il est difficile de déterminer sa position exacte : aussi préfère-t-on lui fixer une mince aiguille de bois perpendiculairement à sa direction, et c'est l'aiguille de bois que l'on amène en face d'un repère choisi de telle sorte que, cette condition étant remplie, la boussole se trouve juste dans le plan du cadre.

M. Pouillet a construit un autre instrument donnant des résultats plus précis encore, et connu sous le nom de *boussole des tangentes*. Cet appareil a la forme suivante (fig. 78) : un grand cercle

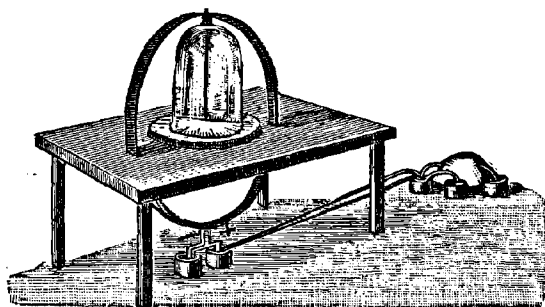


Fig. 78. — BOUSSOLE DES TANGENTES.

métallique reçoit le courant et peut être introduit dans le circuit à l'aide de deux godets pleins de mercure. L'aiguille aimantée est suspendue par un fil de cocon au centre d'un cercle divisé sous une cloche de verre. On donne ainsi au cercle des dimensions fort grandes par rapport à l'aiguille. Le cadre et l'aiguille étant placés dans le plan du méridien magnétique, la tangente trigonométrique de l'angle dont l'aiguille est déviée est proportionnelle à l'intensité du courant.

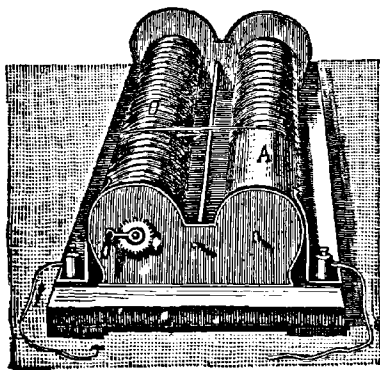


Fig. 79. — RHÉOSTAT.

Wheastone a imaginé, pour mesurer l'intensité des courants, un appareil connu sous le nom de *rhéostat*. Cet appareil (fig. 79) se compose de deux cylindres parallèles, dont l'un A est en laiton et l'autre B en bois. Sur ce dernier est tracée une rainure hélicoïdale : un fil de cuivre fin suit cette rainure et va ensuite

s'enrouler sur l'autre cylindre A. Une des extrémités du fil étant mise en communication avec un des pôles d'une pile, et le cylindre de cuivre avec l'autre pôle, on fait tourner l'un des cylindres ; le fil entraîne l'autre cylindre, de sorte qu'il s'enroule sur le premier en quittant le second. On peut ainsi introduire une longueur quelconque de fil fin, ce qui peut varier l'intensité du courant ; or, d'après les lois de Ohm que nous énon-

çons ci-dessous, cette intensité est en raison inverse de la longueur du circuit, et l'on peut mesurer cette longueur en centimètres au moyen de deux aiguilles que font mouvoir en tournant les cylindres A et B, aux extrémités desquels elles sont fixées.

**LOIS DE OHM.** — La longueur, le diamètre et la nature des fils conducteurs font varier l'intensité d'un courant. Les lois qui la régissent sont au nombre de quatre, que Ohm (1) déduisit de considérations théoriques, qu'il vérifia expérimentalement et qui s'expriment ainsi :

1<sup>re</sup> LOI. — *L'intensité d'un courant est la même dans tous les points du circuit qu'il traverse.*

2<sup>e</sup> LOI. — *L'intensité d'un courant varie en raison inverse de la longueur du fil conducteur.*

3<sup>e</sup> LOI. — *L'intensité d'un courant varie en raison directe de la section du fil conducteur.*

4<sup>e</sup> LOI. — *L'intensité d'un courant varie en raison directe de la conductibilité du métal qui forme le circuit.*

En d'autres termes, la résistance qu'oppose un circuit à un courant qui le traverse est d'autant plus grande que le fil est plus long, et d'autant moindre qu'il est plus gros et meilleur conducteur.

**COURANTS DÉRIVÉS.** — Si un courant part d'une pile P (fig. 80), arrive à un godet *q* plein de mercure, suit le fil *rqx*, traverse le godet *n* et retourne à la pile; ce courant possède une certaine intensité. Si l'on

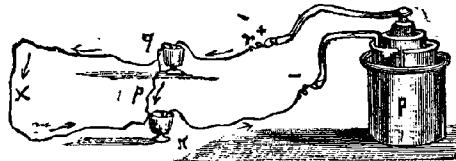


Fig. 80. — COURANTS DÉRIVÉS.

plonge ensuite dans les deux godets *q* et *n* les extrémités d'un fil *p*, on aura établi une dérivation; une portion de l'électricité circulera dans ce nouveau fil, produisant un courant dérivé. La portion du courant qui circule encore dans le fil

*qan* est un courant partiel, et la portion du conducteur *qrPmn* est le courant principal. Les lois d'Ohm et l'expérience ont prouvé que le courant primitif est supérieur en intensité au courant partiel et au courant dérivé; mais qu'il est inférieur au courant principal.

**UNITÉS ÉLECTRIQUES.** — Après une discussion assez longue, mais

(1) OHM (Georges-Simon), physicien allemand (1787-1854), professeur à Göttingue. Ses nombreux travaux relatifs à l'électricité lui ont mérité l'honneur de donner son nom à l'une des unités électriques.

qui a heureusement abouti, le Congrès international, réuni à Paris à l'Exposition d'électricité (*fig.* à la page 225), a fixé les unités électriques.

M. Wurtz, président de l'Académie des sciences, rendait compte en ces termes de cet important travail, dans la séance du 7 février 1882 :

« C'est un fait digne de remarque que l'électricité, dont la nature est profondément cachée, soit susceptible de mesures exactes, propres non seulement à exprimer toutes les conditions d'une expérience scientifique, mais encore à fournir une base certaine aux évaluations que l'industrie réclame... On sait mesurer le travail électrique en faisant entrer dans le calcul de ces mesures des données expérimentales, telles que l'intensité, la force électro-motrice, la résistance. Il s'agit là de mesures, c'est-à-dire de comparaisons, et les valeurs numériques par lesquelles on exprime les conditions d'une expérience ou le jeu d'un appareil, ou le rendement d'une machine, ont besoin d'être rapportées à des unités.

» La tâche principale du congrès des électriciens a donc été la définition des *unités électriques*. Il avait été précédé dans cette voie. Un physicien illustre, Weber, avait imaginé les unités absolues d'intensité et de résistance. Pour ces définitions, le Congrès a adopté le système électro-magnétique, préconisé par l'*Association britannique pour l'avancement des sciences*, et qui consiste à mesurer la force avec laquelle un courant agit sur un pôle d'aimant. C'est donc une force magnétique qui sert de point de départ à la fixation des unités électriques, et ces dernières sont rapportées à des unités mécaniques de longueur, de masse, de temps, qui sont le centimètre, le gramme, la seconde. Elles présentent entre elles une corrélation intime, car l'unité d'intensité est l'intensité qui est produite par l'unité de force électro-motrice dans l'unité de résistance. Au point de vue théorique, ces unités de mesure sont définies exactement et en valeur absolue, de façon à offrir au calcul une base sûre, et à ne pas introduire de coefficients arbitraires. Seulement elles représentent des quantités très petites, par rapport à celles qu'il s'agit de mesurer. On a donc été conduit à les remplacer, dans la pratique, par des multiples déterminés, et à l'unité de résistance, par exemple, on a substitué un milliard d'unités de résistance qu'on nomme un OHM. Ce dernier exprimant une résistance exactement définie par la théorie, il s'agit maintenant d'en trouver une représentation pratique, c'est-à-dire de déterminer la nature, la section et la longueur d'un conducteur métallique qui offre effectivement cette résistance. Ce sera l'étalon de résistance électrique, comme le mètre est l'étalon de longueur. Le Congrès des électriciens s'est appliqué à cette tâche, et, adoptant une idée de Pouillet, a décidé que l'étalon de résistance serait une colonne de mercure d'un millimètre de section, et dont la longueur devra être fixée par une commission internationale de physiciens.

» A l'unité de résistance, qui vient d'être définie, et à l'unité de force électro-motrice, le congrès a rattaché l'unité de quantité et l'unité de courant, et a voulu rendre hommage à la science française en nommant la première Coulomb et la seconde Ampère. »

Ainsi, les unités électriques dorénavant en usage sont :

1° Les unités fondamentales : centimètre, masse du gramme, seconde, et ce système est désigné, pour abrégé, par les lettres C, G, S.

2° L'OHM, unité de *résistance*, égale à 10° CGS, et correspondant à une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section, à la température de 0° et d'une longueur qui sera fixée ultérieurement.

3° Le VOLT, unité de *tension* et de *force électromotrice*, égale à 10° CGS, et correspondant à la tension d'une pile Daniell.

4° L'AMPÈRE, unité d'*intensité* du courant, équivalant au courant obtenu en faisant passer un volt dans un ohm.

5° Le COULOMB, unité de *charge*, c'est-à-dire la quantité d'électricité définie par la condition que, dans le courant d'un ampère, la section du conducteur soit traversée par un coulomb par seconde.

6° Le FARAD, unité de *capacité* définie par la condition qu'un coulomb, dans un condensateur dont la capacité est d'un farad, établisse entre les armatures une différence de tension d'un volt.

**ACCOUPLLEMENT DES ÉLÉMENTS D'UNE PILE.** — Pour former une pile, on peut ou réunir le pôle positif de chaque élément au pôle négatif du suivant : c'est l'*association en pile*; ou réunir entre eux tous les pôles positifs et entre eux tous les pôles négatifs : c'est l'*association en batterie*.

Dans l'*association en pile*, c'est-à-dire quand l'élément voltaïque circule dans un circuit fermé, son intensité s'exprime par le quotient de la force électrique de l'élément divisé par la résistance totale du circuit. Soit  $n$  éléments dans le circuit,  $R$  la résistance et  $E$  la force électromotrice de chacun d'eux supposés égaux,  $r$  la résistance du rhéophore. L'intensité du courant fourni dans le circuit par un seul élément sera évidemment :

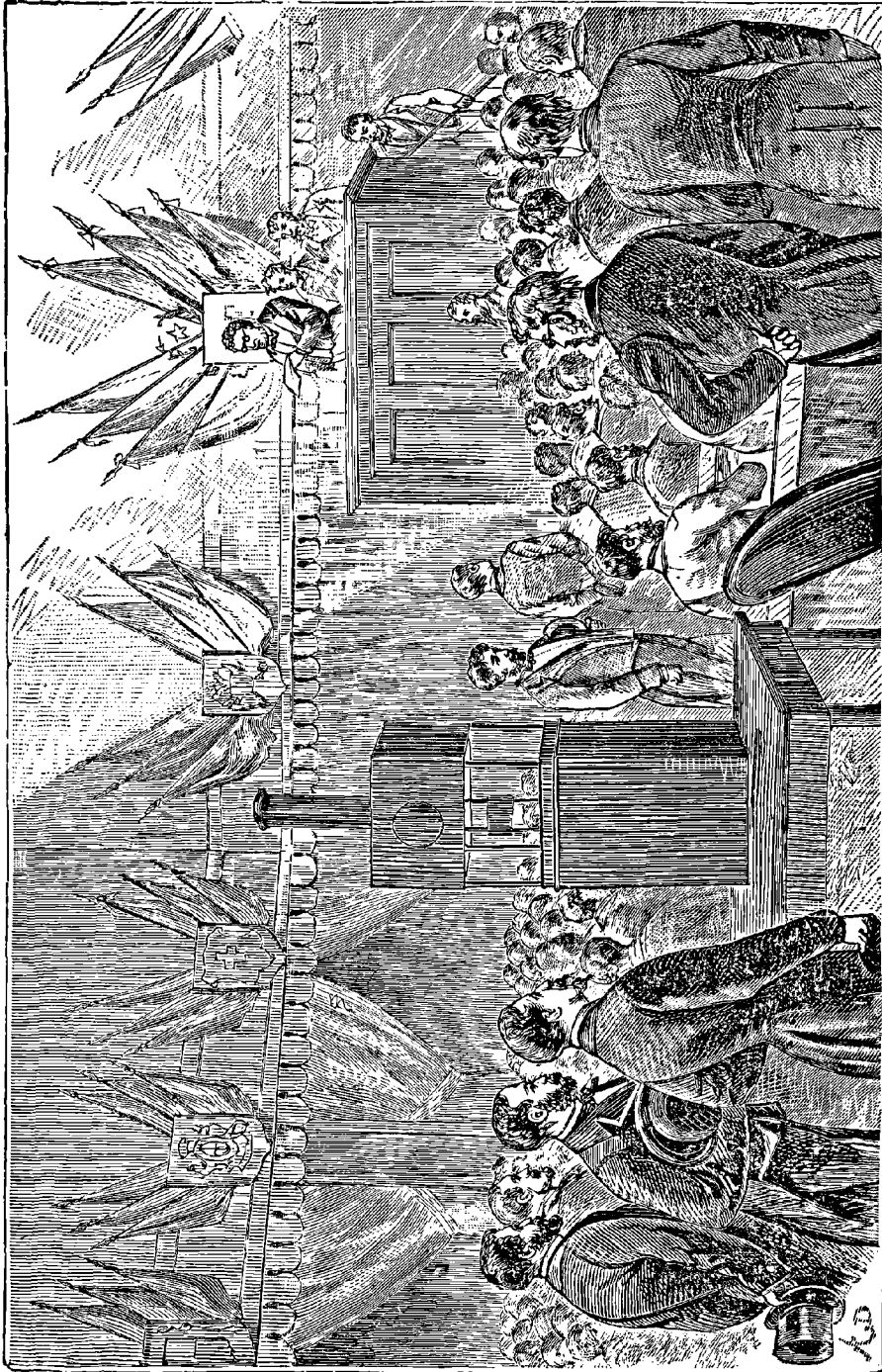
$$i = \frac{E}{nR + r};$$

d'où l'intensité du courant total sur la somme des intensités des courants fournis par chacun des éléments :

$$I = \frac{nE}{nR + r}$$

Si la résistance  $r$  est très considérable, le dénominateur de la fraction varie peu avec le nombre des éléments, tandis que le numérateur





Le Congrès des Électriciens à l'Exposition internationale d'Électricité,  
au Palais de l'Industrie à Paris, en 1882.



étant proportionnel à ce nombre, il en sera sensiblement de même de l'intensité. On peut encore écrire :

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}},$$

et dire qu'augmenter le nombre des éléments revient à diminuer dans le même rapport la résistance du conducteur interpolaire, ce qui est d'autant plus avantageux que cette résistance est plus grande. C'est à cette résistance qu'il faudra toujours proportionner le nombre des éléments associés en pile ; car si  $r$  est fort petit, il n'y a qu'une augmentation insignifiante d'intensité quand on multiplie le nombre des couples.

Dans l'association en batterie, on peut considérer la réunion de tous les éléments comme un seul élément de dimensions  $n$  fois plus grandes et dont la force électro-motrice sera encore  $E$ , car l'expérience et la théorie prouvent que la force électro-motrice dépend de la nature, mais non du nombre des éléments. Quant à la résistance, elle sera  $r$  dans le rhéophore et  $\frac{R}{n}$  dans la portion où se trouvent les éléments, puisque tout se passe comme s'il y avait un seul élément de section  $n$  fois plus grande. L'intensité du courant total sera donc :

$$I = \frac{E}{\frac{R}{n} + r} = \frac{nE}{R + nr}.$$

Si  $r$  est beaucoup plus considérable que  $R$ , on voit que le nombre des éléments n'a aucune influence sensible sur l'intensité ; si au contraire  $r$  est fort petit, l'intensité croît sensiblement comme le nombre des éléments.

On devra donc associer les éléments en pile quand le rhéophore offrira une grande résistance, et en batterie dans le cas contraire. On peut aussi combiner ces deux modes, et la théorie, comme l'expérience, prouve que l'on obtient l'intensité maximum quand la pile et le rhéophore possèdent la même résistance.

**COURANTS SECONDAIRES. — ACCUMULATEURS.** — Nous avons dit ci-dessus qu'une des causes qui tendent à diminuer promptement l'intensité du courant, dans les piles à un seul élément, est la formation de *courants secondaires*, qui, se produisant en sens inverse du courant principal, le détruisent en totalité ou en partie. Ces courants secondaires ont

été l'objet d'études sérieuses de la part de M. Gaston Planté (1), travaux qui, selon l'expression du rapporteur de la Commission de l'Académie des sciences, « ont déjà reçu plusieurs applications intéressantes, et constituent un ensemble de recherches originales et importantes qui ont pris place dans la science. »

Voici le principe des *couples secondaires* de M. Gaston Planté. Si l'on immerge deux plaques de plomb dans de l'eau acidulée, et qu'on les mette en communication, à l'aide de fils, avec une petite pile, le plomb, sous l'influence du courant électrique, s'oxyde. Si l'on interrompt la communication avec la pile, au bout d'un certain temps, un phénomène remarquable s'est produit : des lames de plomb part un courant électrique de sens inverse au premier et plus énergique, mais de courte durée. C'est ce qu'on appelle un *courant secondaire*. Le travail lent et continu de la pile avait oxydé le plomb ; l'action de la pile cessant, la désoxydation se fait, la lame de plomb revient à son état normal, comme un ressort tendu revient à sa place quand la force qui le maintient cesse d'agir. Mais la désoxydation est une action chimique qui engendre de l'électricité ; aussi se produit-il un courant électrique inverse du premier : plus la pile aura oxydé le métal profondément et plus le travail de désoxydation sera énergique et long, plus le courant secondaire engendré sera lui-même énergique. Donc, adaptez à une petite pile une série de plaques de plomb ; le travail de la pile s'accumulera à la surface du plomb, et, quand vous voudrez le récolter, il suffira de recueillir le courant inverse engendré par la désoxydation du métal. Plus on chargera les lames de plomb, qui constituent une véritable batterie électrique, et plus on en obtiendra, à un moment donné, d'énergie et de persistance dans l'effet produit.

Un *couple secondaire* à lames de plomb, ayant moins d'un demi-mètre carré de surface, peut, après avoir été chargé par deux couples Bunsen, rougir un fil de platine d'un demi-millimètre de diamètre pendant vingt minutes, et un fil de 2/10 de millimètre pendant une heure environ sans aucune communication avec la source primaire, et même quarante-huit heures après avoir été chargé. Une batterie d'un mètre carré et demi de

(1) PLANTÉ (Gaston), auteur d'importants travaux relatifs à l'électricité. Les premières recherches de M. Planté sur la polarisation voltaïque remontent à 1859. On doit à ce savant physicien les accumulateurs d'électricité, la machine rhéostatique, et d'ingénieuses expériences et théories sur l'électricité atmosphérique. L'Académie des sciences, dans sa séance publique annuelle du 6 février 1882, lui a décerné le prix fondé par M. Lacaze, dont la valeur est de 10,000 francs. M. G. Planté s'est empressé, dans un sentiment de rare libéralité, de faire don de cette somme à la *Société des amis des sciences*. « Pour ce chercheur justement célèbre, a-t-on dit, la justice est venue tardive, mais elle sera aussi complète qu'elle peut l'être ici-bas, lorsqu'on a perdu la santé et ceux que l'on aime ! » Il a été nommé chevalier de la Légion d'honneur le 1<sup>er</sup> janvier 1882.

surface a pu rougir un fil un mois après que la batterie avait été chargée. Remarquons que les lames envoient un courant d'autant plus énergique qu'elles ont plus d'usage, qu'elles ont été plus profondément oxydées sous l'influence de la pile, qu'elles sont plus *formées*.

On conçoit maintenant sans peine qu'il soit possible de recueillir de l'électricité à volonté. Des lames de plomb séparées et immergées dans de l'eau acidulée servent de collecteurs; mettez-les en relation avec une petite pile, au bout de quelques heures la provision d'électricité est déjà suffisante. On rompt toute communication et le vase est plein d'électricité. Il suffit alors d'approcher les boutons métalliques d'une batterie à l'extrémité d'un fil pour enflammer à distance un corps quelconque. Tout fil tendu entre les deux boutons métalliques rougit instantanément et finit par fondre.

M. Gaston Planté a construit sur ce principe un charmant briquet, qu'il a appelé briquet de Saturne. Une boîte en acajou, grosse comme un réveil-matin (*fig. 81*), renferme une *batterie secondaire*. Sur un des côtés de la boîte est fixée une petite bougie dont la mèche est traversée par un fil de platine en relation avec les deux pôles de la batterie. On appuie sur une touche; le fil de platine rougit et la bougie s'enflamme. Une fois chargé, le briquet peut donner une soixantaine d'inflammations successives. La petite pile qui l'approvisionne d'électricité est de trois petits éléments Daniell contenus dans une boîte de dimensions restreintes. C'est un mode d'inflammation économique, car la batterie ne s'use pas, et quelques cristaux de sulfate de cuivre tous les trois mois suffisent pour entretenir la pile.

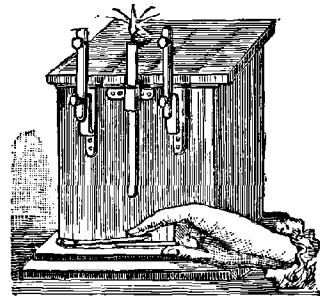


Fig. 81.  
BRIQUET DE SATURNE.

Le *couple secondaire* de M. Gaston Planté se compose (*fig. à la page 233*) d'un vase en verre V, plein d'eau acidulée au dixième par l'acide sulfurique, et dans lequel plongent les lames de plomb L, enroulées en hélice pour présenter une plus grande surface et séparées par des bandelettes de caoutchouc; PP sont les pôles du couple secondaire auxquels aboutissent les fils de la pile primaire Y; SS, des lames métalliques, en communication directe avec ces pôles; B est un boulon servant à presser la lamelle R et à fermer le circuit secondaire; F est un fil métallique serré entre deux pinces, destiné, pour une expérience, à être traversé par le courant secondaire.

Pour établir une batterie, on associe au moyen des *commutateurs*

CCC'C' les couples secondaires, en *surface* ou *quantité* pendant la charge, et en *série* ou *tension* pendant la décharge. II' sont les pôles auxquels aboutissent les fils de la pile primaire X servant à charger la batterie; TT sont les pôles auxquels aboutissent les fils de l'appareil destiné à être traversé par la décharge de la batterie, appareil qui est ici les charbons destinés à la production de la lumière électrique Z.

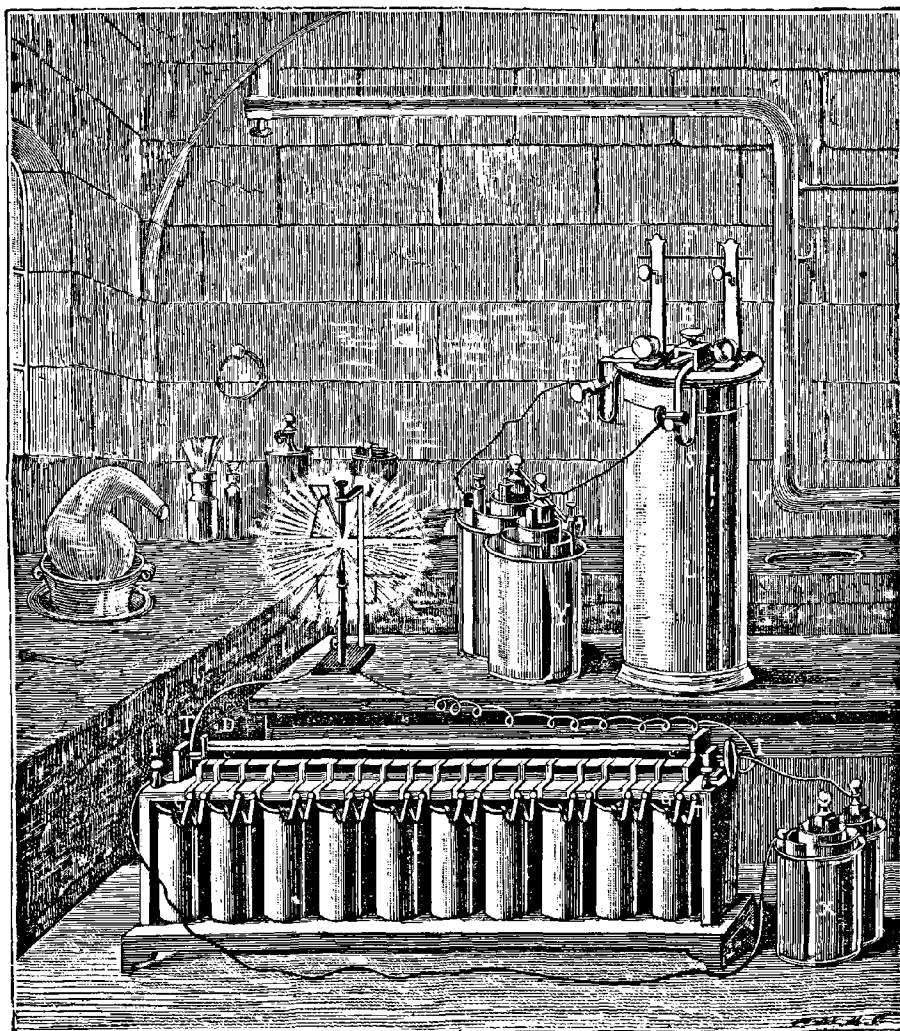
Cette pile présente l'avantage de pouvoir emmagasiner une grande quantité d'électricité; le courant secondaire y est très puissant; mais elle demande un temps très considérable pour être formée et fonctionner convenablement. Un ingénieur distingué, M. Faure, a imaginé de déposer préalablement sur les feuilles de plomb de l'élément Planté une couche épaisse d'oxyde de plomb, et il obtient ainsi très rapidement des accumulateurs d'une très grande puissance.

Les *courants secondaires* avaient été, à la fin du siècle dernier, l'objet d'études importantes. Les premières expériences qui ont donné lieu à l'invention des accumulateurs sont de Gautherot (1). Voici en quels termes il expose sa découverte : « Je me suis aperçu que la saveur brûlante que l'on se procure en plaçant deux fils dans sa bouche, et en plongeant leurs deux autres extrémités dans les couples polaires d'une pile persévérerait lorsqu'en les retirant des tasses, on les faisait toucher l'une contre l'autre. Cette saveur s'observe, même quand les fils sont de platine ou d'argent. Elle a même de la permanence, si on renouvelle plusieurs fois le contact sans le prolonger. » Cette observation conduisit Gautherot à présenter à la Société galvanique un appareil composé d'une fiole et d'un bouchon dans lequel passaient deux fils d'argent. On remplit le flacon d'eau salée jusqu'à deux centimètres du goulot, on y place le bouchon, ce qui fait plonger dans l'eau l'extrémité inférieure des fils d'argent, lesquels sont maintenus parallèlement l'un à l'autre et sans se toucher. On accroche chacune de leurs extrémités au pôle d'une pile. Un moment après, lorsque l'un des fils commence à produire de petites bulles on fait cesser les communications avec la pile. Si on porte les deux fils à la langue, on éprouve une saveur très forte, quelquefois même accompagnée d'une légère commotion, et cette action a quelque permanence, puisque l'on obtient ces actions à différentes reprises.

Les expériences de Gautherot furent suivies d'expériences d'Erman; mais Gautherot étant mort, personne ne donna suite à ses recherches à

(1) GAUTHEROT (1753-1803). Élevé à la cathédrale de Dijon, il y fut enfant de chœur, et devint un des plus habiles professeurs de clavecin, d'orgue et de harpe de son temps. La découverte de l'électricité ayant excité son génie, il s'adonna à l'étude de cette science, et se fit recevoir membre de la *Société galvanique*, pour laquelle il fit de nombreuses expériences.

cation fort naturelle de ces faits. Soit (*fig. 83*) une file de molécules d'eau situées entre deux électrodes, l'une positive, l'autre négative. L'oxygène de la molécule 1, qui touche le pôle négatif, se dégage, et l'hydrogène s'unit à



Couple et batterie secondaire de M. Gaston Planté (page 229).

l'oxygène de la molécule 2; l'hydrogène de celle-ci s'empare de l'oxygène de la molécule 3, et ainsi de suite, formant un double courant d'hydrogène vers le pôle négatif, d'oxygène vers le pôle positif. Arrive alors une nouvelle file de molécules qui subit à son tour le même effet d'électrolyse.

Dans les liquides, les dissolutions décomposées, il peut se produire des effets très complexes; quand les électrodes ne sont pas en or ou en platine, c'est-à-dire inoxydables, il se forme une foule de réactions qui dépendent de la nature de ces corps. Si, par exemple, dans l'électrolyse de l'eau, on prend pour électrode positif une lame de zinc, l'oxygène qui arrive sur ce métal se combine avec lui, et il n'y a pas dégagement de ce gaz; il peut se produire alors des *actions secondaires* qui masquent en apparence la décomposition électro-chimique. Même avec des électrodes inoxydables, on peut avoir des produits secondaires, attendu que les gaz transportés, étant à l'état naissant, sont doués d'une activité chimique plus énergique que lorsqu'ils sont préparés par les procédés ordinaires et recueillis dans les vases.

De l'électrolyse de l'eau, Faraday a tiré deux lois importantes que l'expérience a confirmées :

1<sup>re</sup> LOI. — *Quand un même courant traverse successivement plusieurs dissolutions salines, les poids des éléments séparés sont proportionnels à leurs équivalents chimiques.* On appelle *équivalent d'électricité dynamique* la quantité d'électricité nécessaire pour mettre en liberté dans un voltamètre un équivalent d'hydrogène.

2<sup>e</sup> LOI. — *Si dans le circuit d'une pile se trouve un voltamètre, pour un équivalent d'hydrogène mis en liberté dans ce voltamètre, il y a un équivalent de zinc dissous dans chacun des éléments de la pile.*

Donc équivalence parfaite entre le travail effectué par les forces chimiques à l'intérieur de la pile et le travail de ces mêmes forces détruit dans le circuit. Il faut en conclure qu'en augmentant les éléments de la pile on n'obtient pas une décomposition plus considérable, mais seulement plus rapide, fait important dans la galvanoplastie, où les éléments de pile auront une grande surface, mais seront en nombre juste suffisant pour que la résistance de la pile puisse forcer le courant à circuler dans les bains.

**ÉLECTROLYSE DES COMPOSÉS BINAIRES.** — Lorsqu'on soumet à l'électrolyse un *composé binaire* dont un des éléments est métallique, le métal se rend toujours au pôle négatif, c'est-à-dire qu'il est toujours électro-positif. Cette observation a permis à Davy d'obtenir les métaux alcalins en décomposant par la pile les alcalis correspondants, entre autres le potassium. Il plaçait un morceau de potasse, légèrement humectée, sur une lame de platine mise en communication avec le pôle positif d'une pile à auges de 200 couples, et il fermait le circuit avec un fil de platine, qu'il posait sur la potasse et qui était en relation avec le pôle négatif; aujour-



d'hui, on répète facilement l'expérience avec une pile de Bunsen de 20 ou 30 éléments. Il se manifeste aussitôt une action très vive ; la potasse se fond aux deux parties électrisées. Du côté négatif, il n'y a aucun dégagement de gaz, mais il s'y dépose de petits globules ayant un éclat métallique très brillant, et brûlant avec explosion et une flamme vive à l'instant de leur formation. Ces globules sont le potassium, qui se change en potasse au contact de l'air ou de l'eau.

Seebeck a profité de la grande affinité du potassium pour le mercure pour en obtenir davantage. On pratique une cavité dans un fragment de potasse légèrement humectée, et on la remplit de mercure ; ce fragment est ensuite posé sur la lame de platine en relation avec le pôle positif, tandis que le fil négatif plonge dans le mercure. L'alcali et l'eau sont alors décomposés, leurs principes constituants sont transportés à leur pôle respectif, et le radical de l'alcali, en se combinant avec le mercure, forme un amalgame qui ne se décompose pas ; on le met ensuite dans l'huile de naphte pour le préserver de l'action de l'air. Pour obtenir le potassium pur, on place l'amalgame dans un tube recourbé, fermé aux deux extrémités et dont on a chassé préalablement l'air. En chauffant l'extrémité où se trouve l'amalgame, on volatilise le mercure, et le potassium reste.

**ÉLECTROLYSE DES SELS.** — Tous les *sels* sont décomposés par le courant électrique, mais non avec la même facilité. Quand le courant est suffisamment fort et que les sels sont constitués par des oxydes très stables, il y a isolement des uns et des autres, puis transport des acides au pôle positif et des oxydes au pôle négatif. C'est ce qu'on constate aisément en remplissant un tube en U d'une dissolution de sulfate neutre de soude à laquelle on a ajouté du sirop de violettes, et en faisant plonger dans chacune des branches de ce tube un fil de platine en communication avec l'un des pôles d'une pile en activité. Au bout de quelques instants, la liqueur rougit dans le tube positif et verdit dans le tube négatif. Si l'on interrompt le courant, et si l'on mêle le liquide des deux branches, la teinte bleue reparaît par la neutralisation de l'acide et de la base isolés.

Dans d'autres circonstances, il arrive que non seulement le sel est décomposé en ses deux principes constituants, mais encore que l'oxyde métallique est réduit, en sorte que le métal se rend au pôle négatif et qu'au pôle positif se réunissent l'oxygène de l'oxyde et l'acide décomposé. La plupart des sels des quatre dernières sections en dissolution, et ceux de la première section, quand ils sont humectés, éprouvent ce genre de décomposition. Avec les premiers, l'expérience se fait encore de la même manière : en plongeant dans une dissolution de sulfate de cuivre, par exemple, deux

électrodes de platine, introduisant le courant produit par deux couples de Bunsen (*fig. 84*), on verra du cuivre métallique se déposer sur l'électrode négatif, tandis que des bulles d'oxygène se dégageront le long de l'électrode positif, en même temps que le liquide

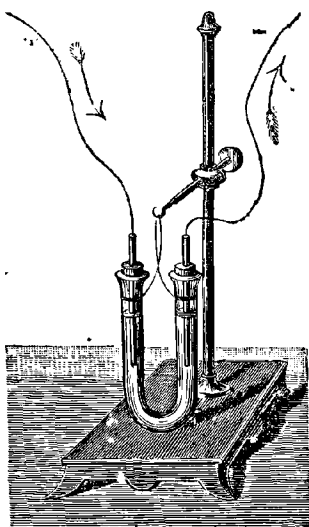


Fig. 84. — DÉCOMPOSITION  
DU SULFATE DE CUIVRE.

entourant ce dernier se chargera d'acide sulfurique libre. Si l'on opère avec un sel de la première section, on l'humecte légèrement, puis on le met en contact avec les deux électrodes d'une pile de 80 à 100 paires récemment chargée. A l'instant même, on voit apparaître au pôle négatif des globules métalliques. Pour recueillir ceux-ci, on se sert du mercure, ainsi que le docteur Seebeck l'a indiqué, et, dans ce cas, on forme avec le sel une petite coupelle dans laquelle on place le mercure; le fil négatif plonge dans ce métal, tandis que le fil positif est en communication avec une plaque de platine qui supporte la coupelle (*fig. 85*). Il se produit bientôt un amalgame plus ou moins riche.

C'est sur cette action décomposante de l'électricité sur les sels que sont fondées les belles applications de la galvanoplastie, de la dorure, de l'argenture, du cuivrage, etc., dont nous allons parler tout à l'heure.

#### CAUSES DE LA CONSTANCE DES PILES A DEUX LIQUIDES. —

On voit maintenant pourquoi les piles à deux liquides donnent des courants plus constants que les autres. Le courant électrique agit sur le liquide comme sur un *électrolyte*; il décompose l'eau ac-

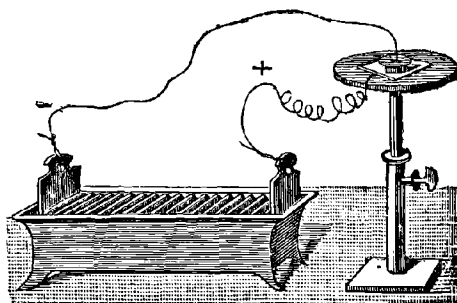


Fig. 85.

DÉCOMPOSITION DES SULFATES ALCALINS.

idulée. Ce courant marchant dans la pile du pôle négatif au pôle positif, et non pas du pôle positif au pôle négatif comme dans le *rhéophore*, il en résulte que l'hydrogène se dépose sur le corps collecteur de l'électricité positive, c'est-à-dire sur le cuivre dans la pile de Wollaston et ses analogues. Là, il se forme une gaine peu conductrice que le courant ne

traverse qu'avec peine, ce qui diminue son intensité. Pour prouver que telle est bien la cause de l'affaiblissement de la pile, il suffit de retirer les couples du liquide attaquant, pendant juste assez de temps pour que l'hydrogène, qui s'est condensé sur le cuivre ait pu se dégager; en remettant la pile en action, on voit qu'elle a repris son énergie première. Dans la pile de Daniell, l'hydrogène, en se portant sur le cuivre, rencontre le sulfate de cuivre; il se substitue au métal dans ce sel pour former de l'acide sulfurique hydraté, et c'est le cuivre ainsi produit qui se dépose sur le métal collecteur de l'électricité positive, ce qui ne peut en rien altérer la conductibilité du circuit. Dans les piles de Bunsen et de Grove, l'hydrogène naissant réduit l'acide azotique. C'est quand cette dissolution est saturée, ce qui arrive rapidement, que ces piles donnent des émanations acides. Dans toutes les piles à courant constant, l'hydrogène est aussi détruit avant d'avoir pu se dégager à l'état gazeux.

**GALVANOPLASTIE.** — Jusqu'à une époque éloignée de nous d'à peine un quart de siècle, on ne savait appliquer l'or et l'argent que par des moyens mécaniques, ou à l'aide d'un intermédiaire d'un emploi désastreux pour la santé des ouvriers, le *mercure*. Les anciens avaient été séduits, comme nous, par l'aspect des métaux précieux; l'or et l'argent décoraient leurs temples et leurs palais. Ils appliquaient ces métaux soit en lames, soit en feuilles minces analogues à celles que font les batteurs d'or. Plus tard, au moyen-âge, on parvint à dorer les objets en cuivre ou en laiton à l'aide du mercure; on se fait difficilement une idée des désastres causés par l'emploi de cet agent dans les ateliers de dorure. La découverte des savants illustres qui ont créé l'*électro-chimie* et la *galvanoplastie* n'aurait-elle eu d'autre résultat que celui de supprimer cette cause permanente de destruction pour un nombre considérable d'ouvriers, qu'elle devrait être regardée comme l'une des plus grandes et des plus utiles découvertes des temps modernes.

L'art de déposer les métaux par voie humide, avec toutes les propriétés physiques qu'ils possèdent, s'appelle l'*hydroplastie* (1). Ces dépôts s'obtiennent tantôt par simple affinité chimique, tantôt en recourant à l'électricité dynamique, et s'effectuent dans des solutions salines ou bains dont la composition varie pour chaque métal. Lorsqu'on emploie l'électricité, on peut se proposer deux ordres de résultats différents: 1° ou bien déposer sur un métal pauvre une couche mince, continue et adhérente d'un métal

(1) Parmi les ouvrages à consulter sur cette industrie importante, citons les suivants: *Manuel complet de Lottinoplastique*, par Lottin de Laval; *Hydroplastie* par M. de Plazanet. Nous empruntons à ce dernier ouvrage de nombreux renseignements.

plus précieux ou moins oxydable. C'est le cas de la *dorure* et de l'*argenterie galvaniques*, du *platinage du cuivre*, du *cuivrage du zinc* et de la *fonte*, etc., etc.; 2° ou bien on veut obtenir une couche de métal continue, mais non adhérente et assez épaisse pour pouvoir, au besoin, se séparer de l'objet sous-jacent et en donner une reproduction exacte. C'est le but de la *galvanoplastie* proprement dite, qui se rapporte aux statues, aux bas-reliefs, aux médailles, etc., et de la *galvanotypie*, qui se rapporte aux clichés, aux planches gravées, et en général à tous les objets qui sont destinés à transporter leurs empreintes sur d'autres corps par la pression.

A peine Volta avait-il inventé l'admirable instrument qui l'a illustré, qu'on chercha à appliquer la pile à la précipitation des métaux, mais sans songer à les obtenir dans l'état spécial qui constitue les qualités d'un bon dépôt métallique. Volta lui-même, Nicholson et Cruikshank (1) avaient essayé; mais ils avaient obtenu des dépôts pulvérulents, lamelleux ou cristallins, et point de couches continues et adhérentes. Brugnatelli, élève de Volta, puis son collègue à l'université de Pavie, obtint le premier, en 1802, un dépôt d'or et d'argent offrant l'aspect d'une couche régulière et uniforme, comme il convient à la dorure et à l'argenterie. Il parvint même à déposer le platine; mais ce métal était réduit à l'état de poudre très fine, qui ne prenait de l'éclat et de l'adhérence que par le frottement. Il y a bien de l'obscurité dans les descriptions qu'il a données de la méthode qu'il employait; MM. Barral, Chevalier et Henri, voulant essayer de reproduire les opérations du savant italien en suivant ses indications, n'ont obtenu que des résultats très imparfaits. Le problème de la dorure était peut-être résolu au point de vue scientifique; mais il était loin de l'être en pratique.

En 1825, M. de La Rive, à Genève, reprit les expériences de Brugnatelli; mais le succès ne couronna pas d'abord ses efforts; ce n'est qu'en 1840, c'est-à-dire après les travaux de M. Becquerel sur l'application des décompositions électro-chimiques au traitement des minerais, que M. de La Rive réalisa l'application de l'or sur les métaux, mais sa méthode était encore imparfaite. La solution complète et industrielle du problème de la dorure à la pile est due à MM. Elkington. Le 29 septembre 1840, M. Elkington prit un brevet pour la dorure du cuivre à l'aide d'une dissolution d'oxyde d'or dans du prussiate de potasse. A la même époque, M. Richard Elkington prenait un brevet pour l'application de l'argent à l'aide du courant galvanique et d'une solution de chlorure d'argent dans le prussiate de potasse.

La dorure et l'argenterie électro-chimiques étaient dès lors découvertes

(1) CRUIKSHANK (Guillaume), savant anatomiste anglais (1746-1800), s'est aussi beaucoup occupé de physique et de chimie.

et allaient bientôt prendre une importance industrielle considérable. M. de Ruoltz vint ensuite et employa l'appareil composé et un grand nombre de dissolutions, dont les principales sont : 1° le cyanure d'or dissous dans le cyanure simple de potassium ; 2° dissous dans le prussiate jaune ; 3° dans le prussiate rouge ; 4° le chlorure d'or dans les mêmes cyanures ; 5° le sulfure d'or dans le sulfure de potassium. M. de Ruoltz chercha également à déposer d'autres métaux, et réussit notamment à déposer du laiton par voie électro-chimique. Si donc on a donné à tort à M. de Ruoltz le mérite de la découverte de l'argenture et de la dorure électro-chimiques, puisqu'il avait été précédé de plusieurs mois par MM. Elkington, il serait injuste de lui refuser le mérite d'avoir cherché à perfectionner et à généraliser les procédés des manufacturiers anglais.

MM. Roseleur et Lavaux parvinrent à obtenir le platine en couches adhérentes et d'épaisseur facultative, et M. Roseleur, appliquant les phosphates et les sulfites à la dissolution des divers oxydes métalliques, rendit tout à fait pratiques la plupart des opérations de l'électro-métallurgie. Bien d'autres chimistes concoururent à amener cette belle science au degré de perfectionnement qu'elle a atteint ; nous parlerons des procédés employés aujourd'hui, sans entrer, bien entendu, dans des détails de fabrication, qui sont tout spéciaux et sortent de notre cadre (1).

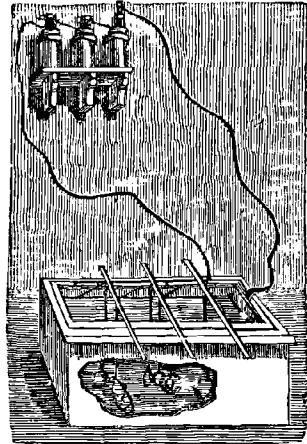


Fig. 86. — DORURE À FROID.

**DORURE GALVANIQUE.** — La dorure galvanique se fait soit à chaud, soit à froid : à chaud pour les objets de petite et de moyenne dimension, comme la bijouterie, les couverts, les couteaux, etc. ; à froid pour les objets de grande dimension, comme pendules, lustres, etc. Il existe un grand nombre de formules pour les bains ; chaque fabricant, pour ainsi dire, a la sienne. Les deux plus employées sont :

Eau distillée.....	3 litres.	Eau distillée.....	3 litres.
Cyanure de potassium pur...	30 grammes.	Cyanure de potassium pur...	25 grammes.
Or vierge (en chlorure).....	10 grammes.	Carbonate de potasse.....	100 grammes.
—		Ammoniaque d'or provenant de	10 gram. d'or.

(1) Ainsi, dans les ateliers de M. Rousset, rue Visconti, dont nous donnons un croquis (page 241), on emploie des appareils particuliers, imaginés par M. Rousset lui-même, et qui présentent de grands avantages.

On dispose ce bain dans des auges en bois, doublées de gutta-percha (*fig. 86*). Le pôle positif est mis en contact avec une lame d'or ou de platine, pendant que le pôle négatif communique avec une galerie en cuivre supportant les objets destinés à la dorure.

Pour les bains de dorure à chaud, la formule la plus employée est :

Eau distillée.....	40 litres.		Cyanure de potassium pur....	40 grammes.
Phosphate de soude.....	500 grammes.		Or (en chlorure d'or).....	10 grammes.
Bisulfite de soude.....	150 grammes.			

Ces bains s'emploient presque bouillants et avec un anode de platine ; on les entretient en y ajoutant de temps en temps une solution composée

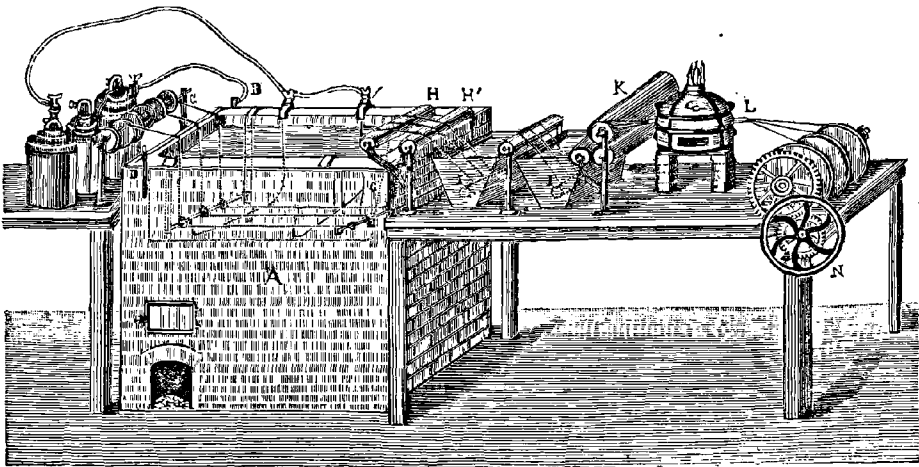


Fig. 87. — DORURE DU TRAIT.

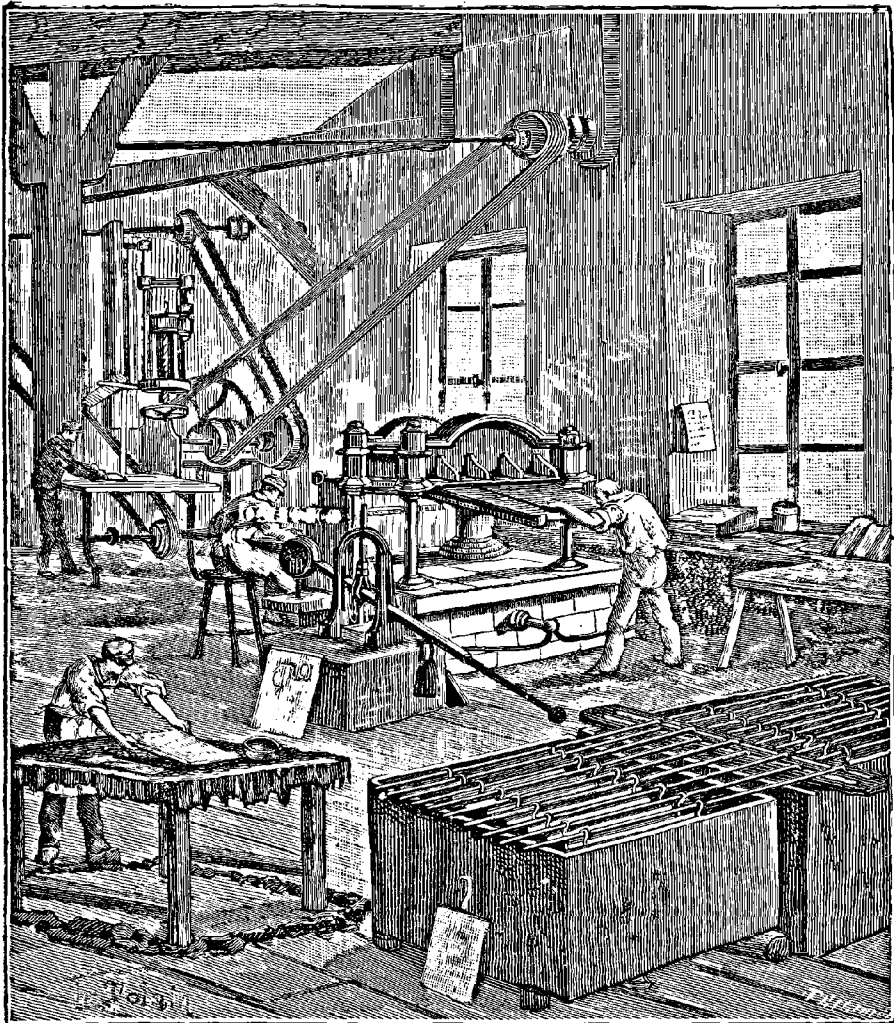
A. Fourneau. — B. Chaudière en fonte émaillée. — C. Broche supportant les bobines. — D. Tige en cuivre faisant communiquer les fils au pôle négatif. — EE. Galets en ivoire ou en porcelaine. — GG. Fils de platine servant d'anodes. — HH. Bobines folles. — II. Cuves contenant l'une une solution de cyanure, l'autre de l'eau pour rincer les fils. — K. Rouleaux garnis de vieux calicot pour essuyer les fils. — L. Tube chauffé où les fils se séchent. — M. Bobines mises en mouvement par la manivelle N et destinées à recevoir les fils dorés.

de 20 grammes de cyanure de potassium pour 10 grammes d'or, transformé en ammoniure, le tout dissous dans un litre d'eau. On conçoit cependant que, si parfaite que puisse être la méthode de dorure, elle exige, dans certains cas, des précautions ou des dispositions particulières.

C'est ainsi que, pour la fabrication du *trait*, ou fil fin d'argent ou de cuivre doré, on emploie la disposition représentée ci-contre, et que la légende suffit à faire comprendre (*fig. 87*). Après la dorure, le fil passe à la filière ou au laminoir, suivant qu'on veut le laisser rond ou l'aplatir.

**ARGENTURE GALVANIQUE.** — Voici une des plus utiles applications de l'électro-chimie. Il est peu de familles qui n'aient maintenant leur

service de table en orfèvrerie argentée, leurs couverts de Ruolz. C'est une économie bien entendue pour les gens riches ; pour les ménages modestes, c'est une sorte de luxe utile et peu coûteux. L'orfèvrerie



Atelier de galvanoplastie de M. Rousset, à Paris.  
(D'après un croquis de M. Toram).

argentée a débarrassé ces ménages de ces ustensiles de cuivre, d'étain ou de fer, souvent dangereux, toujours malpropres et d'un aspect désagréable. Cette fabrication est arrivée aujourd'hui à une perfection qui ne laisse rien à désirer ; et elle a pris une telle importance que l'argenture des cuil-

lers et des fourchettes absorbe chaque année 25,000,000 d'argent métallique, c'est-à-dire le quart de la production annuelle de toutes les mines connues il y a quelques années. L'usine seule de MM. Christophle emploie annuellement plus de 6,000 kilogrammes d'argent. L'épaisseur moyenne adoptée pour les dépôts correspond à 3 grammes par décimètre carré de surface. Il en résulte que depuis sa fondation, en 1842, cette seule usine, ayant mis en œuvre 169,000 kilogrammes d'argent, a couvert une superficie de 56 hectares.

Tous les procédés industriels d'argenture galvanique en usage reposent sur l'emploi du cyanure double d'argent et de potassium. Les formules varient légèrement; mais on opère toujours, en dernière analyse, dans un bain contenant du cyanure d'argent tenu en dissolution dans un excès de cyanure de potassium. Sous l'influence du courant électrique, cette dissolution sera décomposée, et si l'on a placé un objet métallique au pôle négatif et une lame d'argent au pôle positif, l'argent provenant de la décomposition du cyanure d'argent se portera au pôle négatif et formera un dépôt métallique sur l'objet qui s'y trouve, pendant que le cyanogène se rendra au pôle positif et formera du cyanure d'argent aux dépens de l'anode. Le bain se trouvera donc théoriquement maintenu au même état de saturation; en pratique, il n'en est pas tout à fait ainsi, pour divers motifs dans le détail desquels il est inutile d'entrer ici. Parmi les formules assez nombreuses et les diverses méthodes de préparer les bains d'argenture, nous n'en signalerons que deux : la première indiquée par M. H. Bouilhet, la seconde par M. A. Roseleur :

*Première méthode.* — Pour obtenir 100 litres de bain, on prend 2 kilogrammes d'argent vierge et on les dissout dans 6 kilogr. d'acide nitrique, de façon à obtenir du nitrate d'argent fondu; on dissout ce nitrate d'argent dans 25 litres d'eau, et, d'autre part, on dissout 2 kilogr. de cyanure de potassium dans 10 litres d'eau. On verse peu à peu la solution de cyanure dans la solution d'argent, et on obtient un précipité de cyanure d'argent. On s'arrête aussitôt qu'il ne se forme plus de précipité et on décante. Le cyanure d'argent est lavé, puis dissous dans 2 kilogr. de cyanure de potassium, et on ajoute de l'eau de manière à former 100 litres. On y ajoute aussi quelquefois 1 kilogr. de prussiate jaune de potasse.

*Deuxième méthode.* — Pour préparer 100 litres de bain, on prend 2,500 d'argent vierge qu'on transforme en nitrate d'argent dans 12 à 15 fois son poids d'eau distillée, et on verse dans cette dissolution de l'acide cyanhydrique jusqu'à ce que l'addition d'une nouvelle quantité de cet acide ne produise plus de précipité. On recueille sur un filtre et on lave le précipité de cyanure d'argent. D'autre part, on a mis en dissolution 5 kilogr. de cyanure de potassium, et on y fait dissoudre le cyanure d'argent qui forme, en se dissolvant, le cyanure double d'argent et de



potassium et constitue le bain d'argenteure. On donne à ce bain les qualités des vieux bains en le faisant bouillir pendant quelques heures.

La plupart du temps les argenteurs ne prennent pas toutes ces précautions et se contentent de faire dissoudre dans du cyanure de potassium du nitrate ou du chlorure d'argent. Quelle que soit d'ailleurs la méthode employée pour la préparation du bain, l'opération se pratique de la même façon que pour la dorure.

**CUIVRAGE GALVANIQUE.** — Le cuivrage galvanique s'emploie, soit pour donner aux métaux pauvres, fer, fonte, zinc, étain, l'aspect du cuivre ou du bronze, soit pour les préparer à recevoir un dépôt d'un métal plus riche, or, argent ou platine. L'adhérence de ces derniers métaux est, en effet, bien plus complète grâce à l'interposition de cette couche de cuivre, et souvent même il serait absolument impossible de se dispenser du cuivrage. Enfin le cuivrage galvanique sert encore de préparation aux pièces qui doivent recevoir un épais dépôt de cuivre dans le bain acide de galvanoplastie. Si l'on portait dans ce dernier bain des objets en fer, fonte ou zinc, sans les préserver d'abord par une couche de cuivre galvanique, ils seraient attaqués par le liquide du bain et ne donneraient lieu qu'à une réduction du sel de cuivre à l'état de boue métallique. Les bains de cuivrage s'emploient le plus souvent à froid et se disposent comme les bains de dorure et d'argenteure. Les menus objets se cuivrent dans une passoire (*fig. 88*). On peut employer plusieurs formules pour préparer le bain; citons celle-ci :

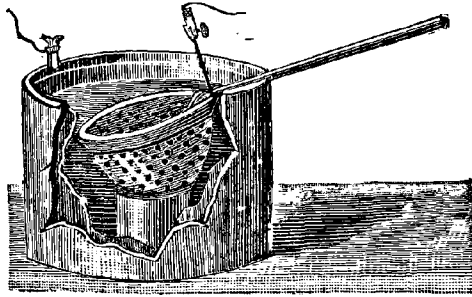


Fig. 88. — CUIVRAGE GALVANIQUE.

Acétate de cuivre.....	500 grammes	Cyanure de potassium.....	750 grammes.
Carbonate de soude.....	500 —	Eau distillée.....	15 litres.
Sulfate de soude.....	500 —		

Ce bain s'emploie à froid ou à chaud sur tous les métaux usuels, avec une pile Bunsen et un anode de cuivre rouge. MM. Mignon et Rouart ont récemment imaginé un procédé particulier au moyen duquel la Société des Fonderies et Hauts Fourneaux du Val-d'Osne a cuivré, depuis 1873, une grande quantité de fonte d'art, de statues, de fontaines, de balcons et

de candélabres, et d'une façon si adhérente, que les tubes de fer peuvent être étirés après le cuivrage, les plaques de tôle peuvent être fraisées sans que le métal se détache. Ces procédés s'appliquent également au plombage et au zingage.

**PLATINAGE, NICKELAGE, ZINGAGE, FERRAGE.** — Diverses solutions de platine avaient été indiquées et essayées avec des succès contestables, lorsque, en 1846, MM. Roseleur et Lanaux découvrirent un procédé qui permet d'obtenir le platine à épaisseur avec une adhérence parfaite et avec toutes les propriétés physiques de ce métal. Ce procédé, devenu d'une application assez fréquente, est ainsi présenté par les inventeurs :

On transforme 10 grammes de platine en chlorure de platine aussi neutre que possible; on met le chlorure en dissolution dans 500 grammes d'eau distillée. On ajoute une dissolution de 100 grammes de phosphate d'ammoniaque dans 500 gr. d'eau distillée, et enfin on redissout le précipité qui s'est formé, en versant peu à peu et en agitant une solution de 500 gr. de phosphate de soude dans 1 litre d'eau. On fait bouillir ce liquide pendant plusieurs heures, jusqu'à ce que le bain, d'alcalin qu'il était, devienne sensiblement acide. Ce bain, employé à chaud et sous l'action d'une forte batterie, donne un dépôt de platine adhérent et d'épaisseur presque illimitée sur le cuivre et ses alliages. Il faut éviter d'y plonger des objets en fer, zinc, étain ou plomb, car le bain se décomposerait promptement et abandonnerait son platine sous la forme d'une poudre noire.

On imite souvent le *platinage* par le *nickelage*. C'est au chimiste Smée, puis à M. Becquerel que l'on doit les premiers essais de la nickerure des métaux. Mais ces essais n'avaient donné que des résultats insuffisants, quand le docteur Isaac Adams, de Boston, fit connaître des procédés pratiques et véritablement industriels pour nickeler les métaux. Ces procédés furent publiés en 1869, et depuis cette époque vingt usines fonctionnent aux États-Unis. Dès le mois de décembre 1869, la première usine européenne de nickerure était fondée à Paris par MM. Adams et Gaiffe, et, dès le 17 janvier 1870, cette usine voyait ses produits présentés à l'Académie des sciences par M. Dumas, l'éminent chimiste.

Le nickel s'emploie surtout pour recouvrir le cuivre, le laiton, le bronze, le maillechort, le fer, la fonte et l'acier; le dépôt de nickel se rapproche du platinage blanc, qu'on obtient dans les vieux bains de platine. Le bain usité se compose de 10 litres de sulfite de soude liquide à 25 degrés; 500 grammes d'azotate de nickel et 500 grammes d'ammoniaque. M. Gaiffe recommande un bain préparé en faisant dissoudre à saturation, dans de l'eau distillée chaude, du sulfate double de nickel et d'ammo-

niaque exempt d'oxydes de métaux alcalino-terreux. La proportion du sel à dissoudre est de : 1 partie en poids pour 10 parties également en poids d'eau. On filtre après refroidissement. Outre les opérations ordinaires de dégraissage et de décapage, il est nécessaire que les pièces soient très bien polies avant d'être mises au bain, le nickel étant un métal très dur, difficile à brunir.

Le *zingage* galvanique s'effectue très facilement dans un bain composé de 10 litres d'eau, 500 grammes de protochlorure de zinc et 500 grammes de cyanure de potassium. Mais il est peu employé jusqu'à présent parce qu'il protège le métal sous-jacent contre l'oxydation avec moins d'efficacité que le zingage par immersion dans un bain de zinc fondu, qu'on appelle très improprement *galvanisation*.

La principale application du *ferrage* est de rendre plus rigides et plus solides les planches gravées ou les clichés galvanoplastiques destinés à l'impression en opérant sur la face postérieure un dépôt de fer. Les formules de ferrage sont nombreuses ; mais la plupart des praticiens en font mystère. Il nous suffit de savoir qu'ils opèrent par les mêmes moyens galvaniques que pour les autres métaux.

**GALVANOPLASTIQUE.** — La *galvanoplastique* est l'art en vertu duquel on dépose dans un moule creux ou en relief, formant l'électrode négatif d'un appareil composé d'un ou de plusieurs couples voltaïques, un métal dont les parties s'agrègent ensemble et prennent l'empreinte de la surface du moule. Quatre métaux principalement ont jusqu'à ce jour été obtenus en couches épaisses ; ce sont : le fer, le cuivre, l'argent et l'or. Le plus important de beaucoup par le nombre de ses applications est le cuivre.

« De toutes les découvertes modernes, dit M. Figuier, dans les *Merveilles de la science*, la galvanoplastique est celle qui prépare à l'avenir les plus singuliers et les plus étonnants résultats. » Sans doute, le bronze reste la plus haute expression de l'art, et c'est, selon toutes les probabilités ce qui restera toujours vrai : mais on ne peut s'empêcher de remarquer que seule la galvanoplastie rend accessible aux fortunes modestes, en les multipliant économiquement, les chefs-d'œuvre de la sculpture. Et même le grand seigneur sera souvent très heureux d'avoir recours au galvanoplaste. La fonte, qui réclame toujours et forcément le concours du ciseleur, serait impuissante à rendre avec une rigoureuse exactitude un bas-relief dans tout le charme de sa naïve originalité. On pourra arriver, avec des frais énormes, à une imitation, mais non à un véritable fac-similé. En outre, la fonte ne reproduit jamais exactement les dimensions d'un

modèle donné, par suite du retrait du métal en fusion, retrait qui, de plus, n'est pas le même dans tous les points. Avec la galvanoplastie, rien de semblable à redouter : sous l'action lente et constante de l'électricité, tels seront les moules et telles seront aussi les épreuves. Demandez encore aux graveurs s'ils ne sont pas heureux que leurs œuvres, grâce à la galvanoplastie seule, puissent se perpétuer et passer à la postérité. C'est enfin par la galvanoplastie que le naturaliste peut, en quelque sorte, éterniser une feuille, un fruit, un poisson, un reptile, en les reproduisant avec des finesses de détails que l'œil armé d'une loupe pourra seule découvrir, qui sera la nature prise sur le fait, des modèles métalliques créés sans le concours du sculpteur ni du ciseleur. Cependant il n'est pas rare de rencontrer des gens qui dédaignent les épreuves galvanoplastiques, disant que c'est du cuivre de mauvaise nature sans épaisseur suffisante, qu'il faut nécessairement renforcer avec des soudures à l'étain, qui par suite, manquent complètement de sonorité, et sont peu durables. Et ils citent comme exemple les bas-reliefs de la statue de Gutenberg par David, bas-reliefs qui, après une année d'exposition à l'air, étaient presque entièrement transformés en carbonate de cuivre. MM. Oudry et Roseleur ont l'un et l'autre répondu d'avance à ces critiques, en déplorant que la spéculation ne laisse pas les objets soumis à la galvanoplastie dans un bain assez prolongé pour qu'ils soient vraiment recouverts d'une couche épaisse de cuivre qui les rendrait éternellement inaltérables.

Nous allons d'abord donner, d'après M. Becquerel, quelques détails historiques sur ce sujet important.

Un savant anglais, M. Spencer, fut conduit par une observation due au hasard à faire l'expérience suivante : une plaque carrée de cuivre fut mise en communication avec une plaque de zinc de même forme et de même grandeur, au moyen d'un fil de cuivre. La plaque de cuivre fut recouverte à chaud d'une couche de vernis composé de cire jaune, de résine et d'ocre rouge ; avec une pointe métallique on traça dans ce vernis, des lettres, en mettant à nu le cuivre, comme dans la gravure à l'eau-forte. Cette préparation faite, on prit un vase rempli à moitié d'une solution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle on plongea la plaque de cuivre, ainsi que le verre d'un bec à gaz, fermé à l'une de ses extrémités par un tampon de plâtre de 0<sup>m</sup>,02 d'épaisseur, et rempli aux deux tiers d'une solution étendue de sulfate de soude. L'élément zinc du couple fut plongé dans cette dernière, la face inférieure du disque placée parallèlement à la face supérieure de la cloison perméable ; le fil conjonctif fut recourbé de manière que la plaque de cuivre fût opposée par la surface gravée à la face inférieure de la même cloison. Dès que le circuit fut fermé, le

cuivre provenant de la décomposition de ce dernier vint remplir les sillons tracés par la pointe dans le vernis, de manière à produire des caractères en relief.

M. Spencer eut aussitôt l'idée de faire servir ces caractères à l'impression typographique; dès 1838, il prépara ainsi une plaque en cuivre avec laquelle il obtint des épreuves qui furent distribuées dans le public. Immédiatement après, il chercha quelles étaient les conditions à remplir pour que le cuivre pût résister à l'action de la presse. Quelques essais ne tardèrent pas à lui montrer que la densité de la dissolution de sulfate de cuivre, l'épaisseur et la perméabilité du diaphragme étaient les éléments à prendre en considération. En effet, en opérant avec une solution saturée de sulfate de cuivre, le cuivre précipité était pur, et il renfermait d'autant plus de protoxyde que la densité était moindre. Au delà d'une certaine limite, on n'obtenait plus que du protoxyde. La solution étant toujours saturée, M. Spencer fit varier l'épaisseur et la perméabilité du diaphragme. Quand ce diaphragme était mince et grossier, le cuivre se précipitait rapidement: il était alors granuleux et friable; en augmentant l'épaisseur, ou la texture devenant plus serrée, le cuivre se déposait lentement, devenait plus dur, plus homogène et possédait de plus en plus les qualités du cuivre pur de fusion, que l'on doit rechercher en galvanoplastie. Poursuivant le cours de ses expériences, M. Spencer parvint à reproduire en creux une médaille de cuivre; il se servit ensuite de moules pour obtenir des contre-épreuves, qui fussent le fac-similé de toutes ces pièces. De semblables pièces circulaient, à ce qu'il paraît, à Liverpool, dans les premiers mois de 1838.

Tandis que M. Spencer découvrait en Angleterre la galvanoplastie et posait les bases de ce nouvel art, M. Jacobi, à Saint-Petersbourg, parvenait à des résultats semblables. On annonçait à l'Académie de Saint-Petersbourg, dans la séance du 9 octobre 1838, que M. le professeur Jacobi venait de faire une découverte qui présageait d'importants résultats pour l'art chalcographique. Au mois de mai 1839, la revue *P Athenæum* dit positivement que M. Jacobi avait trouvé un procédé galvanique pour convertir en un relief les figures les plus délicates gravées sur une planche de cuivre; M. Jacobi lui-même, dans une lettre adressée à Faraday, à la date du 21 juin 1839, décrit avec détails les procédés galvanoplastiques.

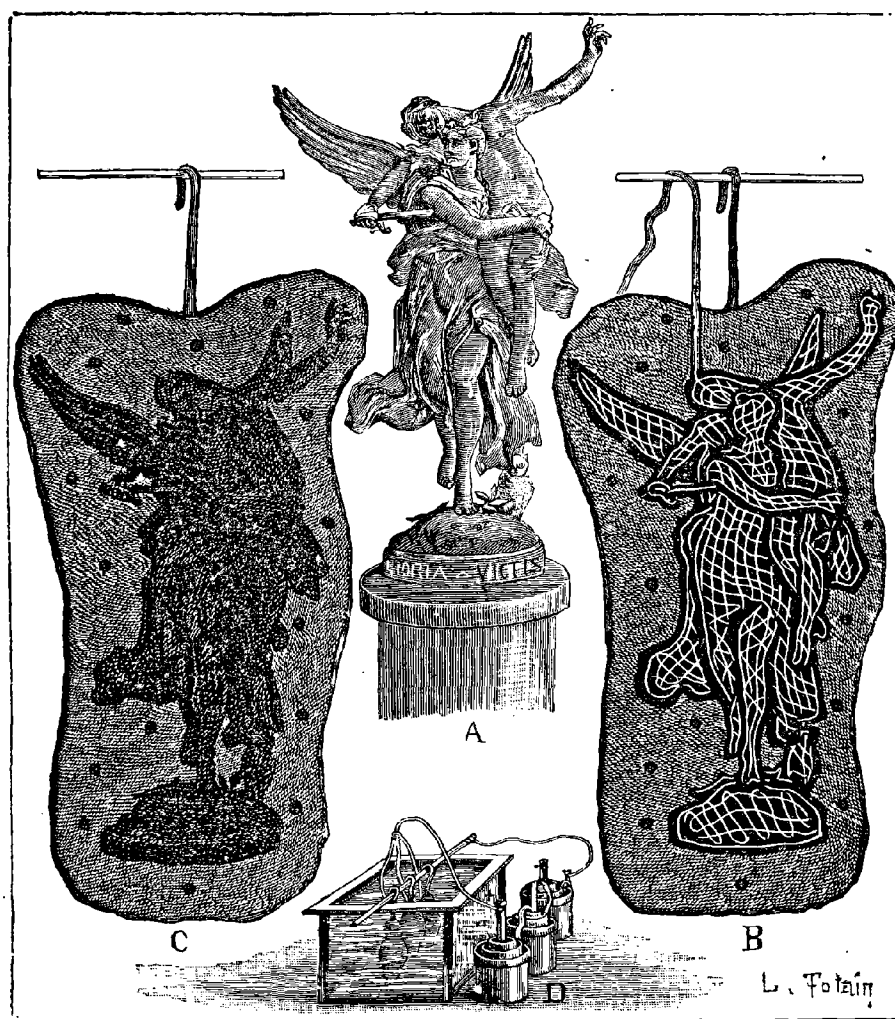
Quoi qu'il en soit, de nombreux savants distingués et des expérimentateurs habiles ont perfectionné l'invention et l'ont conduite au point qu'elle a atteint aujourd'hui: citons, entre autres, MM. Becquerel, Bocquillon, Elsner, Grove, Smée, Elkington, Solly, Sorel, Chevalier, Roseleur, Lenoir.

Bien que la galvanoplastie puisse avoir à exécuter des opérations aussi multiples que diverses et se proposer des résultats variés à l'infini, on n'en procède pas moins toujours à l'aide des mêmes bains et des mêmes appareils électriques. Les bains sont ainsi préparés : on ajoute environ 5 pour 100 de son volume d'acide sulfurique à de l'eau ordinaire, et on lui fait dissoudre autant de sulfate de cuivre que cela est possible à la température ordinaire. L'eau à 15° dissout environ 200 grammes de sulfate de cuivre, et le liquide marque 23° à 24° à l'aréomètre Baumé. Ce sulfate de cuivre est placé à la partie supérieure du bain dans des paniers en gutta-percha ou en grès.

Quelles que soient la forme des appareils et leurs dimensions, ils se composent toujours : 1° d'un vase extérieur en gutta-percha, grès, verre, etc., inattaquable à l'acide sulfurique; 2° d'un ou de plusieurs diaphragmes en porcelaine déglazée ou en terre de pipe; 3° d'une lame de zinc plongée dans ce vase; 4° d'une galerie en cuivre fixée au zinc et destinée à supporter les objets. On remplit le vase extérieur de la dissolution de sulfate de cuivre, et on met dans le diaphragme de l'eau acidulée à 2 ou 3 centièmes d'acide sulfurique. C'est là l'*appareil simple*, c'est-à-dire, au fond, une pile de Daniell dans laquelle le vase extérieur en cuivre est remplacé par l'objet lui-même. Dans l'*appareil composé*, la source d'électricité est extérieure au liquide à décomposer (fig. à la page 241). Ce dernier est contenu dans une cuve ordinairement en bois doublée de gutta-percha qui porte deux galeries de cuivre, dont l'une, mise en communication avec le pôle positif de la pile, supporte de larges lames de cuivre rouge, et l'autre reçoit les objets. Les anodes de cuivre rouge ont pour objet de maintenir le bain à saturation en se dissolvant au fur et à mesure de l'opération dans l'acide sulfurique mis en liberté. L'action qui se produit est très simple. Le sulfate de cuivre décomposé par l'électricité se dédouble et forme un oxyde de cuivre et un acide sulfurique. L'oxyde de cuivre, qui tend à se porter sur le pôle négatif, y trouve l'hydrogène à l'état naissant qui le ramène à l'état métallique, pendant que l'acide sulfurique trouve au pôle positif de l'oxyde de cuivre dont il s'empare pour reformer du sulfate de cuivre.

Avec l'un ou l'autre de ces appareils, on peut obtenir des dépôts de cuivre sur des objets métalliques, et aussi non métalliques, mais que l'on a *métallisés* en les recouvrant d'une couche de *plombagine* ou *graphite*, variété de charbon qui conduit très bien l'électricité. Le plus souvent cette plombagine est préparée à l'aide de sels d'or, d'argent ou de platine, de façon à être plus conductrice. La plus facile à préparer est la *plombagine dorée*: dans un gramme d'éther sulfurique, on fait dissoudre

10 grammes de chlorure d'or, et on broie avec ce liquide 1 kilogramme de plombagine. On laisse l'éther se volatiliser, et le chlorure d'or, en se réduisant à l'état métallique sous l'influence de l'air et de la lumière,



Galvanoplastie d'une statue (page 252).

laisse autour de chaque grain microscopique de plombagine une quantité de métal infiniment petite, mais suffisante néanmoins pour en accroître notablement la conductibilité.

Les opérations galvanoplastiques varient presque à l'infini, soit dans

les moyens d'exécution, soit dans les résultats qu'on cherche à obtenir ; néanmoins, on peut tous les ranger dans les quatre catégories suivantes :

1° *Dépôt sur métal avec adhérence.* — Lorsqu'on a besoin d'une épaisse couche de cuivre, on a recours au bain acide de galvanoplastie : c'est ce qui a lieu dans la dorure mate sur zinc. Après un premier dépôt dans un bain au cyanure double de potassium et de cuivre destiné à préserver le zinc de l'action acide du bain de sulfate de cuivre, on obtient, dans ce dernier, un dépôt plus ou moins épais suivant le degré de mat que l'on désire. C'est aussi par une méthode analogue que s'obtiennent les dépôts épais sur fer, fonte, etc., par exemple sur les pièces destinées à la marine, clous, plaques de blindage, etc.

2° *Dépôt sur métal sans adhérence.* — On peut obtenir une reproduction d'une médaille, d'un ornement, d'une planche gravée sans recourir au moulage. Il suffit de soumettre l'objet à l'action des bains, après l'avoir légèrement huilé ou plombaginé, pour éviter l'adhérence. On obtiendra en creux les reliefs de l'objet, et le moule pourra servir pour obtenir un dépôt qui sera la reproduction exacte de l'objet. Mais cette opération est difficile ; et l'on a recours, pour les objets de grande valeur, comme les planches gravées, à l'intermédiaire de l'argent. Un moule d'argent n'a jamais d'adhérence avec la planche de cuivre, et c'est lui que l'on soumet au bain de galvanoplastie pour en obtenir la reproduction.

3° *Dépôt sur un objet non métallique destiné à lui rester uni.* — Les statuettes en plâtre, les fleurs, les fruits, les métaux, les vases en terre, peuvent recevoir un dépôt de cuivre ; mais, avant l'opération, on a dû avoir recours à un procédé de métallisation particulier aux choses très délicates. M. Oudry a fait une application bien plus importante de cette branche de la galvanoplastie, et qui consiste à recouvrir de cuivre d'énormes objets. Il vernit d'abord l'objet d'une couche de vernis gras, métallise ce vernis à l'aide de la plombagine et le soumet ainsi au bain de galvanoplastie. Il a obtenu par ce moyen des résultats admirables. C'est ainsi qu'il a pu protéger contre l'oxydation et revêtir de l'apparence du bronze des pièces monumentales exposées à l'air et à la pluie. Il n'est peut-être pas une seule des grandes voies, places ou squares de Paris, où ne se trouvent des spécimens de ce procédé. Les plus connus et les plus importants sont les fontaines, statues et lampadaires qui décorent la place de la Concorde, et les statues de la fontaine de la place Louvois.

4° *Dépôt sur un objet non métallique, destiné à être séparé de cet objet.* — C'est là le cas principal de la *galvanoplastie*, c'est-à-dire la reproduction d'un objet quelconque. Si l'on ne tient pas à conserver le modèle, on n'a qu'à le plonger dans le bain, après l'avoir stéariné ou plombaginé



avec soin, jusqu'à ce qu'il soit recouvert d'une couche de cuivre suffisante pour présenter de la consistance. On sépare alors, le plus souvent en le détériorant, le modèle, et l'on possède un moule résistant, inaltérable, qui permet d'obtenir autant de *fac-similés* que l'on voudra du modèle primitif. On peut même arriver, avec quelques soins, à reproduire d'une seule pièce un buste en plâtre et à lui substituer un buste identique en cuivre. Pour cela, on plonge le buste dans le bain, et quand il est recouvert de cuivre, on détruit le modèle, puis l'on se sert de l'enveloppe en cuivre comme du vase extérieur d'un élément Daniell, c'est-à-dire qu'on l'emplit de sulfate de cuivre, que l'on place au centre un diaphragme contenant de l'eau acidulée et une lame de zinc (*fig. 89*). Il se déposera à l'intérieur de ce moule de cuivre une couche de cuivre qui constituera une reproduction exacte du modèle.

Si l'on tient à conserver le modèle, on opère sur une empreinte aussi fidèle que possible obtenue à l'aide d'une matière plastique. Les substances le plus employées pour ce moulage sont la gutta-percha, et, quand les objets présentent des parties de difficile dépouille, la gélatine. Pour celle-ci, il suffit de verser sur l'objet la gélatine encore liquide et de démouler lorsqu'elle est refroidie. Pour la gutta-percha, on moule, soit à la main après avoir liquéfié la gutta-percha par la chaleur, soit au moyen de presses spéciales. Le moule obtenu, on le métallise, puis l'on procède comme dans les cas précédents; si l'objet n'a pu être moulé d'une seule fois, on fait autant de moules qu'il est nécessaire, puis, à l'aide de soudures, on réunit plus tard les différentes pièces obtenues.

Cette méthode ne peut donner que des résultats peu parfaits; aussi a-t-on recours aujourd'hui à un autre procédé, indiqué en 1841 par Parker, en Angleterre, puis perfectionné et appliqué par l'un des plus ingénieux et des plus persévérants inventeurs de notre époque, M. Lenoir. Ce procédé, appliqué en grand à l'industrie, notamment par la célèbre maison Christophle, a été décrit ainsi par un des savants qui ont écrit l'ouvrage le plus estimé sur cet objet, M. A. Roseleur :

« Le problème à résoudre était celui-ci : un modèle parfait étant donné, en tirer galvanoplastiquement, et d'un seul jet, un nombre indéfini d'épreuves, tellement identiques au type que l'œil le plus exercé, celui même de l'artiste, ne pût distinguer son œuvre propre de la reproduction. On va voir par quelle série de



Fig. 89.

GALVANOPLASTIE  
D'UN BUSTE.

moyens, plus ingénieux les uns que les autres, Lenoir est arrivé à la solution désirée. Prenons pour exemple une statue (*fig. A*, page 249). On commence par en faire, avec la gutta-percha, un moule à pièces dont les différents morceaux peuvent à volonté, et au moyen de repères, reproduire un creux parfait du modèle. Dans cet état, on commence à plombaginer avec soin tous les intérieurs du moule. D'autre part, avec du fil de platine, on ébauche une carcasse qui représente, *grosso modo*, mais sur des dimensions un peu restreintes, l'objet à reproduire B (*fig. à la page 249*). Cette carcasse devra être un peu plus petite que le moule, pour pouvoir être suspendue dans son intérieur sans qu'il y ait aucun point de contact. On comprend déjà que si, maintenant, on enferme la carcasse dans le moule reconstitué par ses diverses parties et bien métallisé par la plombagine, et qu'on introduise le tout dans le bain galvanoplastique, en reliant, par un conducteur, la surface intérieure du moule au pôle négatif de la batterie, pendant que la carcasse, qui ne doit toucher en aucun point la surface plombaginée, se reliera elle-même au pôle positif de cette même batterie, on comprend, dis-je, que la portion de bain qui remplit la cavité du moule va se décomposer, et que le cuivre viendra s'appliquer intérieurement à ce même moule pour en reproduire les plus imperceptibles détails. Il suffira donc, lorsque la couche sera convenablement épaisse, d'enlever la gutta-percha qui compose le moule pour trouver dessous une statue en ronde bosse, dont les travaux d'achèvement seront tout à fait insignifiants, sinon comme valeur artistique, du moins comme prix.

» Mais si les choses s'expliquent et se comprennent ainsi facilement par la théorie, elles ne sont pas d'une exécution pratique aussi commode, et on va voir de quelles précautions ingénieuses l'inventeur a dû s'entourer pour mener l'œuvre à bonne fin.

» D'abord, rien n'était plus difficile à constater, une fois le moule refermé sur la carcasse *anode*, que l'absence absolue de points de contact entre ces deux objets. Pour éviter sûrement ces contacts, M. Lenoir a eu l'idée de faire courir en spirale, sur toutes les parties externes de l'anode de platine, un fil de caoutchouc qui, par son épaisseur, s'opposait au rapprochement de la surface métallique et du fil de platine. Ce caoutchouc n'étant pas conducteur du fluide électrique, il importait peu qu'il vint toucher la surface plombaginée. La décomposition galvanique n'en marchait pas moins bien. Mais, malgré toutes ces précautions, il pouvait arriver que le dépôt de cuivre qui se formait à l'intérieur, prenant une épaisseur de plus en plus grande, et diminuant par suite petit à petit l'intervalle laissé primitivement entre l'*anode* et le *catode*, ces deux surfaces ne vinssent enfin à se toucher par un point, ce qui arrêtait immédiatement l'opération, sans que l'opérateur pût le constater à aucun signe extérieur. C'était là un inconvénient grave et qui, à lui seul, pouvait anéantir dans la pratique le procédé tout entier. On comprend en effet que, dans une même cuve renfermant un grand nombre de moules à reproduire, il suffisait qu'un contact s'établît entre les deux pôles (moule et carcasse) pour que toute l'électricité de la batterie, trouvant un chemin plus facile et meilleur conducteur que le bain qu'elle devait décomposer en le traversant, s'écoulât tout entière par

cette voie sans aucun profit pour l'opération. Pour obvier à cette éventualité si redoutable, M. Lenoir imagina le moyen suivant :

» Tous les moules d'un même bain sont maintenus dans le liquide par des crochets qui reposent sur une tringle et qui les prennent à l'extérieur sans avoir aucune communication avec la face plombagée. Quant à ces extérieurs, ils sont munis chacun d'un petit conducteur métallique qui se continue hors du bain par un fil de fer, fin comme un cheveu, et tous ces fils de fer se réunissent au pôle négatif de la pile. Quant aux attaches des carcasses de platine, elles sortent par la même ouverture que le conducteur de la partie plombagée, mais sans le toucher, bien entendu, et vont se relier au pôle positif de la même pile (*fig. D*, à la page 249). De cette organisation, il résulte qu'en l'absence absolue de points de contact entre les carcasses et les intérieurs de moule, le fluide électrique trouve un passage suffisant par l'ensemble des fils de fer qui relient les moules à la batterie; mais que si un seul point de contact vient à s'établir dans un des moules par le grossissement du dépôt, le circuit voltaïque se trouvant fermé par ce point, toute l'électricité prend alors cette route, et, comme elle est trop abondante pour la petite section du fil de fer, elle le rougit rapidement, le brûle avec éclat et le coupe. Il en résulte instantanément la cessation du travail galvanoplastique pour la pièce dont le fil est rompu, mais la reprise de ce même travail pour toutes les autres. De plus, l'opérateur sait immédiatement où il doit porter remède. Enfin, on comprend facilement que, la carcasse anode en platine restant tout à fait insoluble et ne pouvant réparer les pertes du bain à mesure que son cuivre se dépose, il en résultera bien vite que le moule ne contiendra plus que de l'eau acidulée par l'acide sulfurique du sel de cuivre. De là, la nécessité de laisser aux extrémités inférieures de la statue, sous la plante des pieds, par exemple, deux trous par lesquels le bain saturé de cuivre, et, par conséquent, plus dense, rentrera pour remplacer l'eau acidulée, plus légère, qui gagnera la surface de la cuve en s'échappant par le trou réservé au sommet de la tête, lequel sert aussi à donner passage aux deux conducteurs de l'anode et du moule (*fig. C*, à la page 249). Lorsque l'opération sera achevée, il suffira donc d'enlever le moule en gutta-percha, de faire sortir de force la carcasse anode, pour obtenir une statue à laquelle il faudra boucher trois trous, enlever quelques rébarbes aux coutures du moule, mais qui, dans les portions capitales, sera la reproduction rigoureusement exacte du modèle primitif. Aujourd'hui, ajoutons-le, on a substitué l'anode de plomb à l'anode de platine, ce qui permet de reproduire de grands objets sans immobiliser un capital considérable. »

Citons parmi les plus beaux exemples de galvanoplastie en ronde bosse, obtenus par ces procédés, la statue colossale de Notre-Dame-de-la-Garde, à Marseille, qui a 9 mètres de hauteur, et le groupe monumental qui surmonte l'Opéra de Paris, ouvrage exécuté par M. Christophle, qui a plus de 5 mètres de hauteur et a été reproduit d'après le modèle exécuté par M. Gumery, à l'aide d'une carcasse en plomb formant l'énorme anode inso-

luble qui suivait approximativement les sinuosités de la cavité formée par la réunion de moules en gutta-percha. C'est aussi par ce procédé qu'ont été reproduits tous les bas-reliefs de la colonne Trajane (1) en six cents sections, dont chacune a 1 mètre carré de surface environ, et aussi le grand bas-relief de 3<sup>m</sup>,60 de hauteur sur 2<sup>m</sup>,20 de largeur de l'arc de triomphe à Constantin. Au mois de juillet 1864, ces bas-reliefs obtenus en cuivre galvanique furent portés dans les salles du rez-de-chaussée du Louvre, pour y être déposés en permanence. Ce précieux travail, sorti de l'usine électro-métallurgique de M. Oudry, à Auteuil, près de Paris, a été exécuté sur des plâtres envoyés directement de Rome et moulés sur la colonne elle-même, en 1861 et 1862. Déjà plusieurs fois, et notamment sous les règnes de François I<sup>er</sup> et de Louis XIV, on avait essayé de transporter en France ces bas-reliefs, dont l'intérêt est inappréciable. Lors de la fondation de l'École française à Rome, on se fit envoyer des plâtres incomplets qui restèrent au château de Fontainebleau et s'y détruisirent peu à peu. La Convention voulut transporter la colonne elle-même et en orner la place Vendôme. Aucun de ces projets n'avait réussi : le succès était réservé à notre temps.

**GALVANOTYPIC.** — La *galvanotypie* est l'électro-chimie plus spécialement appliquée, avons-nous dit, aux clichés, aux planches gravées, et, en général à tous les objets qui sont destinés à transporter leurs empreintes sur d'autres corps par la pression. Autrefois, l'on tirait les épreuves d'une gravure sur bois sur le bois lui-même, de sorte qu'au bout de très peu de temps les contours s'émoussaient, le bois s'écrasait, et l'on était obligé de refaire la gravure. Aujourd'hui, on coule sur le bois de la gutta-percha, et l'on porte ce moule dans un bain de cuivre; le cliché obtenu est dressé au tour ou bien au rabot, fixé sur un bois d'épaisseur, et il est utilisé tout à fait comme une planche gravée sur cuivre. Si le dépôt est très lent, le cuivre est très dur, et l'on peut, sans usure apparente, tirer soixante à quatre-vingt mille épreuves, ce qui permet de donner à des prix infimes des reproductions de gravures qui autrefois auraient coûté fort cher (2).

Certains dessins veulent être reproduits avec la fidélité la plus rigoureuse, par exemple les timbres-poste, les billets de banque, etc. Un dessin qui serait fait d'après un modèle en différerait toujours par quelque point, et ne tromperait pas des yeux très exercés. Il faut que

(1) La colonne Trajane, à Rome, est construite en marbre blanc; sa hauteur est d'environ 50 mètres; son diamètre moyen de 4 mètres.

(2) Baillet, *l'Électricité* (Hachette).

l'administration puisse reproduire à volonté des épreuves entièrement identiques au modèle, et que le type, une fois arrêté, ne soit plus exposé à être refait. Voici comment on procède. Un timbre-poste a été buriné avec soin sur une plaque d'acier, et on a pressé sur cette plaque une lame de plomb qui a pris exactement la contre-épreuve. Cette lame de plomb forme la matrice des timbres-poste : c'est sur elle qu'il reste à opérer. On agit sur les premières reproductions comme sur le modèle primitif, et les secondes épreuves, assemblées en planches, servent à la gravure. Lorsque, par suite d'un long usage, une de ces planches est usée et déformée, on en fabrique une autre avec la reproduction ; on n'a donc que très rarement besoin de recourir à la matrice.

**ESSAI DES MINÉRAIS DE CUIVRE PAR L'ÉLECTRICITÉ.** — La méthode ordinaire d'essai des minerais de cuivre par la voie humide, due à M. Becquerel, est lente et compliquée, et exige toutes les ressources d'un laboratoire de chimie. Le journal *Scientific American* indique une méthode fort simple et suffisamment exacte pour les besoins de la pratique.

Après avoir choisi un échantillon du minerai, on le réduit en poudre dans un mortier de fer, et on tamise soigneusement cette poudre. On en prend une certaine quantité, qu'on met dans une soucoupe, et on en fait une espèce de pâte en la remuant avec quelques gouttes d'eau chaude. On ajoute alors de l'acide nitrique concentré. Quand la première réaction est achevée, on chauffe au bain-marie, en ayant soin d'opérer au grand air, et dès que le dégagement des fumées acides a complètement cessé, ce qui a lieu ordinairement au bout d'une demi-heure, on décante la solution acide, en ayant soin de ne pas troubler le résidu. En même temps, on ajoute un peu d'acide à ce résidu, qu'on laisse encore une demi-heure sur le bain-marie. Le liquide décanté a été également mis sur le bain-marie, de manière à subir une évaporation partielle. On le verse alors sur le résidu, et on évapore à siccité. On traite le résidu sec par l'acide sulfurique, et, quand la réaction est achevée, on ajoute un peu d'eau froide, puis de l'eau chaude, en remuant toujours le mélange. On laisse alors reposer la liqueur, de manière que les matières en suspension se déposent, et l'on filtre. Si l'on a bien opéré, tout le cuivre est contenu dans le liquide filtré. Il ne reste plus qu'à soumettre la dissolution acide de cuivre, ainsi obtenue, à l'action de la pile, pour obtenir le cuivre sous forme d'un dépôt métallique qu'il suffira de peser. L'action de la pile doit être continuée jusqu'à ce qu'une goutte de la dissolution, mise en contact avec une goutte d'eau ammoniacale sur une plaque de porcelaine blanche, ne donne aucune coloration bleue perceptible.

**PROCÉDÉ POUR RECONNAÎTRE LA PURETÉ DES HUILES D'OLIVE.** — En terminant, citons, entre diverses autres applications de la pile, une méthode curieuse, tout récemment publiée par M. le professeur Palmieri, le directeur bien connu de l'Observatoire du Vésuve, pour reconnaître la pureté des huiles d'olive. L'huile d'olive absolument pure est très mauvaise conductrice de l'électricité ; cette propriété va diminuant au fur et à mesure que l'huile est moins pure et s'altère. Les huiles de colza et de sésame, avec lesquelles on commet le plus ordinairement la fraude, sont au contraire assez bonnes conductrices. Il est vrai que les huiles de noix, de fèves, d'amandes douces, de noisettes ont la même conductibilité que l'huile d'olive ; mais, comme elles sont plus chères, il va sans dire qu'on n'a aucun avantage à s'en servir. Ce fait bien reconnu, M. Palmieri plonge les deux fils d'une petite pile sèche dans un vase renfermant l'huile à examiner, et relie ces fils à un électromètre très sensible, soit une boule de sureau suspendue à un fil, ou bien à un galvanomètre. Il est évident que si l'huile est conductrice le courant passera, et il passera d'autant mieux que l'huile offrira un écoulement plus facile à l'électricité ; en même temps, l'électromètre s'écartera d'autant plus de sa position normale ; si l'huile n'est pas conductrice, l'électromètre, au contraire, restera immobile. Le commerce tirera probablement un grand parti de cette méthode bien simple.

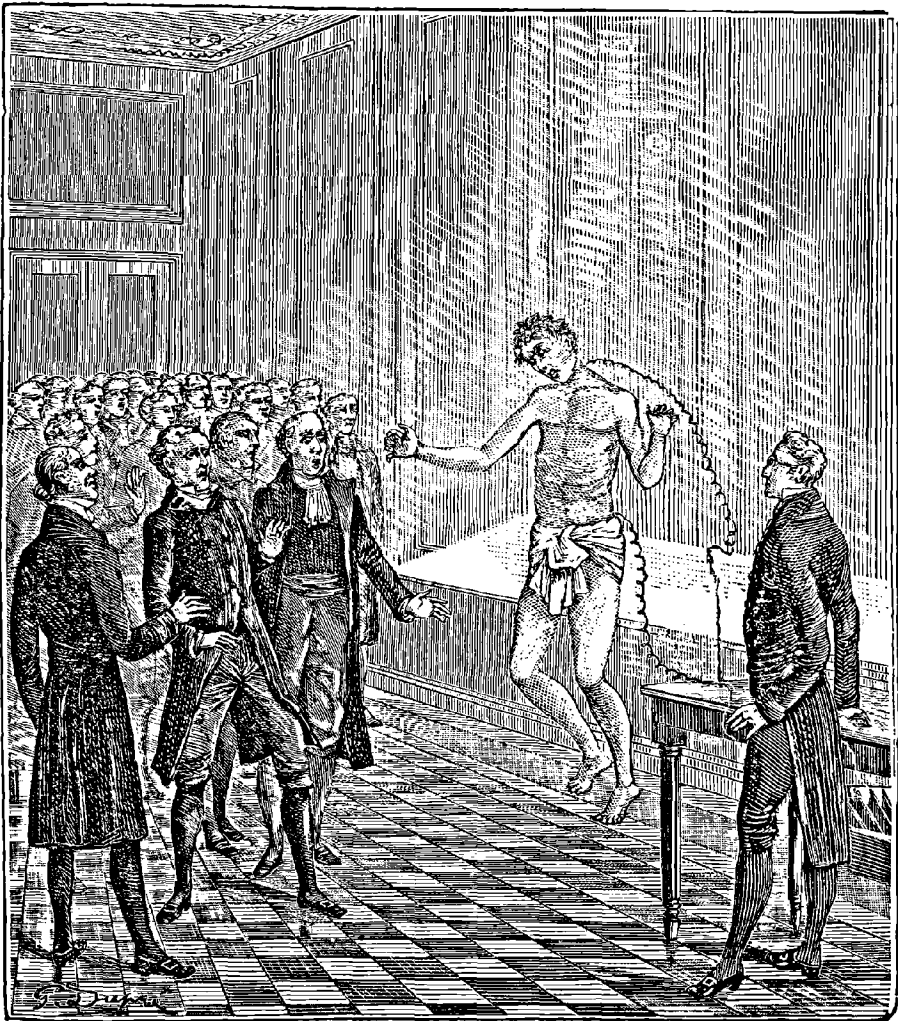
## CHAPITRE III

### EFFETS PRODUITS PAR LES COURANTS

**ACTION DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES VÉGÉTAUX.** — On doit à M. Becquerel des travaux importants sur le rôle des forces physiques dans l'étude des phénomènes physiologiques, question de l'ordre le plus élevé, attendu que les recherches ne tendent à rien moins qu'à nous initier aux mystères de la vie. L'électricité, à raison de son universalité d'action, dit-il (1), a été considérée par quelques personnes comme l'agent principal

(1) Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme.*

de la nature. Certes, si l'on s'en tenait seulement à la rapidité de son action, quand elle agit comme force physique ou comme force chimique, ainsi qu'aux effets caloriques, lumineux, magnétiques et autres qu'elle



Expérience d'Andrew-Uré sur un cadavre (page 259).

produit, on serait assez disposé à reconnaître en elle cette force, rapide comme la pensée, en vertu de laquelle le cerveau fonctionne. Mais si on se bornait à cette induction, on commettrait une grave erreur, attendu que, bien que l'électricité produise quelques effets qui sont les attributs

de la vie, rien ne prouve jusqu'ici que les forces vitales, sous l'empire de la volonté ou non soumises à cette volonté, aient réellement une origine électrique. Ce que l'on a de mieux à faire n'est donc pas de chercher si l'électricité est capable d'organiser la matière, car nos tentatives à cet égard seraient infructueuses; mais d'étudier les modifications qu'éprouvent les végétaux et les animaux quand les forces électriques agissent sur eux.

Sans entrer dans le détail des expériences sur cet objet, nous dirons que l'électricité exerce une influence remarquable sur la circulation de la sève; le courant qui passe par les branches et les feuilles produit des contractions lentes, successives, séparées par de grands intervalles; effets différents de ceux que présentent les animaux: les vaisseaux perdent la faculté de se contracter pour chasser la sève; mais il n'en résulte pas un désordre apparent dans l'organisme. Le courant agit en même temps et également sur le mouvement ascendant et le mouvement descendant; le sens du courant ne paraît établir aucune différence dans leur mode d'action. Si le courant provient d'une pile chargée avec de l'eau seulement, il faut employer un certain nombre de couples pour arrêter le mouvement de la lymphe. Quelques instants après, il recommence peu à peu sous l'influence du courant, et finit par acquérir la vitesse qu'il avait primitivement. En augmentant le nombre des couples, il y a un nouvel arrêt, et ainsi de suite jusqu'à ce que le courant ait assez d'intensité pour arrêter le mouvement de rotation pendant quelques heures. En rétrogradant, c'est-à-dire en diminuant successivement le nombre des couples, on remarque encore des arrêts et des reprises de mouvement. En opérant avec une pile plus fortement chargée, on observe des effets semblables. Le passage de l'électricité ne produit aucune désorganisation, puisqu'un temps plus ou moins long rend à la plante les facultés naturelles.

Nous avons vu (*Électricité statique*, page 123) les effets produits sur la végétation et la germination. Davy a avancé que le blé germait plus vite dans l'eau pure électrisée positivement que dans celle qui l'est négativement: cet effet est dû à ce que la graine étant, dans le premier cas, entourée d'une atmosphère d'oxygène, se trouvait dans les conditions voulues pour que la germination s'effectuât convenablement. Si l'eau n'est pas parfaitement pure, il se dépose au pôle positif des acides qui réagissent sur les graines, altèrent l'embryon et même le détruisent.

En dehors des effets électro-chimiques, on ne peut dire encore, d'une façon précise, si l'électricité intervient d'une manière quelconque dans les phénomènes de la vie végétale.



M. de Candolle a fait à ce sujet les réflexions suivantes dans sa *Physiologie végétale* :

« Ceux qui ont cherché à établir que le fluide électrique était l'agent de la vie, soit dans les animaux, soit dans les plantes, me paraissent encore loin d'avoir ébranlé l'idée générale du principe vital. D'un autre côté, la plupart se fondent sur des données vagues et générales qui sont presque entièrement dénuées de preuves, comme on peut s'en convaincre dans leurs ouvrages. De l'autre, en supposant que le fluide électrique ait une action appréciable, qu'est-ce qui le met en jeu ? Pourquoi agit-il dans les êtres vivants et cesse-t-il d'agir dans les êtres morts ? Peut-être la cause qui met en jeu cette action, si elle existe, est-elle le principe vital qui, en opérant des réactions chimiques, doit produire de l'électricité, laquelle peut intervenir dans les phénomènes de la végétation. »

**ACTION PHYSIOLOGIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES ANIMAUX.** — Quand Galvani publia ses curieuses expériences sur la susceptibilité des organes musculaires, toute l'Europe savante, avons-nous dit, crut un moment qu'on allait résoudre le grand problème, trouver l'*électricité vitale*. On multiplia les expériences, dans le but de démontrer qu'au moyen de l'électricité on pourrait reproduire les mouvements et les contractions dus à l'acte de la volonté. Galvani expérimenta d'abord sur une tête de bœuf récemment tué, avec une pile à colonne, composée de zinc et d'argent et chargée avec de l'eau salée. Une des oreilles fut mise en communication avec l'un des pôles, et l'autre avec le naseau; aussitôt les yeux s'ouvrirent, les oreilles se dressèrent, la langue s'agita et les naseaux s'enflèrent. En 1793, Larrey, Dupuytren, Richerand et d'autres chirurgiens, excitèrent des contractions musculaires sur des membres nouvellement amputés, à l'aide d'armatures composées de deux métaux superposés. En 1802, Galvani, de concert avec Aldini, son neveu, opéra, sur deux cadavres décapités à Bologne, une série d'expériences qui eurent un grand retentissement, et que tour à tour répétèrent Bichat, Vassali-Eudi, Rossi, Nysten, Guillotin, Mariani, Matteucci, etc. En 1818, le docteur Andrew Ure fit, à Glasgow, une expérience qui est demeurée célèbre, sur le corps de l'assassin Clysdale (*fig.* à la page 257). Cet homme, rapporte M. Figuiet, avait vendu son cadavre au docteur Ure. C'était un individu de trente ans, très vigoureux. Après l'exécution, il resta près d'une heure au gibet, suspendu et immobile, et il fut apporté à l'amphithéâtre de l'Université dix minutes après qu'on l'eut détaché de la potence. Un des pôles de la pile fut mis en communication avec la moelle épinière à la hauteur de la vertèbre *atlas*, l'autre pôle étant mis en contact avec le nerf sciatique. Un frisson sembla tout aussitôt parcourir son corps. En

disposant convenablement les conducteurs sur les muscles pectoraux du cadavre, on rétablit les mouvements respiratoires : la poitrine s'élevait et s'abaissait. Le poing du cadavre s'ouvrit, en dépit des efforts des opérateurs et son doigt semblait désigner les personnes qui l'entouraient. Les muscles de la face s'agitèrent horriblement et de manière à jeter l'épouvante parmi les assistants, dont plusieurs s'enfuirent frappés de terreur. On observait les mouvements musculaires les plus violents, les yeux ouverts et menaçants, le rire et la fureur contrastant sur la même face, la respiration même rétablie ; tout présentait dans le cadavre un exercice hideux des fonctions de la vie.

Ces expériences sont encore poursuivies de nos jours, et déjà de nombreuses applications ont été trouvées. Par le moyen de la pile, on peut obtenir des commotions aussi fortes et aussi vives que celles qui sont produites par la décharge d'une batterie électrique, et d'autant plus puissantes qu'elles sont continues, tandis que dans les batteries électriques elles sont instantanées, et d'autant plus intenses que la pile est composée d'un plus grand nombre de couples.

On peut tirer de la pile un grand avantage : celui de pouvoir distinguer la mort réelle de la mort apparente. Les inhumations précipitées ont souvent donné lieu à d'effrayantes méprises : on ne peut lire, sans frémir, l'ouvrage de Bruhier, écrit en 1710, sur l'incertitude des signes de la mort. Il rapporte avec détails 181 faits, et combien ne pourrait-on pas y ajouter ! Dans des ouvrages plus récents, entre autres celui de M. Lenormand, du docteur Crimotel de Tilloy, de M. Le Guéry, il est constaté que les progrès de la science n'empêchent pas encore les inhumations de vivants. Dans une pétition adressée aux Chambres, M. Le Guéry affirmait avoir connu, en quelques années, 46 cas d'individus qu'un hasard seul a sauvés d'un enterrement précipité, après constatation officielle de leur mort. M. le docteur Lenormand dit, dans son livre, que, dans l'espace de deux ans et demi, dix personnes réputées mortes ont été rappelées à la vie dans la ville de Berlin. Les auteurs qui ont étudié les signes caractéristiques de la mort ont tous reconnu que l'aspect cadavéreux de la face, le refroidissement et la lividité de la peau, la flexion des doigts, l'insensibilité aux brûlures et aux incisions, l'obscurcissement et l'effacement des yeux, l'absence de respiration et de vapeurs sortant de la bouche, etc., ne suffisaient pas pour établir la réalité du décès, puisque, d'une part, quelques-uns de ces signes ne se rencontrent pas toujours sur les cadavres, et que, d'un autre côté, on a pu les observer chez des individus qu'on est parvenu à rappeler à la vie. Cinq autres signes ont été regardés comme caractéristiques ; ce sont : l'absence des battements du cœur, la rigidité

des membres, la putréfaction, la coloration verte des parois abdominales, mais surtout l'absence de contractibilité des muscles sous l'influence du galvanisme. « L'épreuve par le galvanisme, dit M. Marc, membre de l'Académie de médecine, d'accord avec M. Nysten, est la plus sûre de toutes, et les corps ne devraient être portés en terre qu'après que la pile ou un appareil magnéto-électrique n'aurait plus d'effet sur eux. »

D'autres expérimentateurs ont eu l'idée de recourir à la commotion électrique pour mettre en jeu et en évidence les muscles de la face, et fournir, par là, un moyen d'anatomie vivante pour la physiologie et pour l'art. Comme les traits du sujet à soumettre aux épreuves ne montrent les contractions de leurs muscles que pendant la durée de l'électrisation, il était important de saisir et fixer les contractions en tableaux fidèles; M. Duchenne, entre autres, s'est donc adressé à la photographie pour obtenir ce résultat, et M. Tournachon jeune, le photographe bien connu, est parvenu à faire un album de tous les états de contractions musculaires de la face, en faisant poser le sujet devant son appareil au moment de la commotion. Cet album est fort intéressant, surtout quand on connaît la théorie des muscles de la face que M. Duchenne a déduite de ses observations, et dont nous croyons devoir donner une idée.

Elle consiste à diviser la face en grandes lignes qui commandent toutes les expressions de la physionomie et à subdiviser ces lignes en d'autres lignes plus particulières. Les muscles principaux sont le *frontal* ou *muscle de la surprise*, qui sert à élever les sourcils et qui occupe le front; l'*orbiculaire* ou *muscle de la réflexion*, qui sert à les abaisser et qui occupe les paupières; le *sourcilier* ou *muscle de la douleur*, qui occupe le sourcil et le ramène vers le milieu du front; le *pyramidal* ou *muscle de la méchanceté*, qui exprime la férocité et est placé à cheval sur la racine du nez; le grand et le petit *zygomatique*, qui sont situés sur la joue, à côté de la pommette, et donnent l'expression du rire et du pleurer, etc. C'est principalement sur un vieillard à figure hébétée et paralytique que l'inventeur a fait ses expériences; un jeune homme, qui s'était exercé à exprimer sur sa figure les expressions diverses des mouvements divers de l'âme, se trouvait d'accord avec la face du vieillard paralytique soumis à l'influence de l'électricité. Il y a là un sujet fécond d'études.

**MAGNÉTISME ANIMAL. MÉTALLOSCOPIE. EXPÉRIENCES DU DOCTEUR CHARCOT.** — Nous voulons seulement indiquer ici une question encore très obscure, des faits très discutés, mais qu'il est impossible de passer sous silence, tant à cause de l'importance du sujet que de la notoriété des savants qui s'occupent de l'étude de ces phénomènes. Dès les premières

découvertes électriques, dès les expériences d'électrisation de l'abbé Nollet dont nous avons parlé (*Électricité statique*, page 51), un grand nombre de médecins et de physiciens ont étudié avec soin et avec méthode l'action de l'électricité sur le système nerveux. Les expériences sont difficiles à faire, et le sujet est ardu, comme tout ce qui touche à la machine si complexe qu'on appelle le corps humain. Quelques résultats assez nets ont été obtenus, et l'électricité est considérée maintenant comme un agent thérapeutique, pouvant servir dans certaines conditions. Mais, il faut l'avouer, le charlatanisme s'est emparé de cette veine, et jamais rien de ce qui est contraire aux lois naturelles n'a été jusqu'ici constaté. Nous résumons, d'après les documents officiels et le compte rendu de M. Figuier (1), ce qui est scientifiquement observé, ce qui mérite l'examen, ce qui a nécessité l'intervention de l'Académie des sciences, laquelle, dans sa séance du 9 janvier 1882, sur la présentation par M. Bouley d'un mémoire de M. Dumont-Pallier, chirurgien à l'hôpital de la Pitié, à Paris, a nommé une commission composée de célébrités contemporaines : MM. Jamin, Bouley, Vulpian, E. Becquerel, Faye, Milne Edwards, afin de constater et d'étudier les derniers faits observés.

« *Tout arrive*, a dit Talleyrand. C'est aux événements de la politique et de l'histoire que le célèbre diplomate appliquait cet axiome consolateur; mais il est tout aussi vrai appliqué aux sciences, et surtout à la médecine. Là, *tout arrive*, il suffit d'attendre.

» Pendant la Renaissance, Paracelse vanta les vertus de l'aimant appliqué au traitement des maladies. Il prôna les vertus médicinales des matières magnétiques et répandit dans la médecine pratique l'usage des métaux. Le P. Kircher, le plus grand physicien de son temps, nous apprend que, d'après les conseils de Paracelse, on faisait au xvii<sup>e</sup> siècle, avec l'aimant, divers appareils tels que des anneaux que l'on portait au cou, aux bras et sur d'autres parties du corps, pour calmer les

(1) FIGUIER (Guillaume-Louis), célèbre écrivain et chimiste, né à Montpellier en 1819. Neveu d'Oscar Figuier, qui était professeur de chimie dans cette ville, il étudia sous lui et se fit recevoir docteur en médecine, docteur ès sciences et agrégé de l'École de pharmacie à Paris. Toutefois, il est moins connu comme savant que pour ses ouvrages de vulgarisation, que recommandent l'élégance de l'expression et l'exactitude des faits, avec un certain coloris pittoresque auquel ils empruntent beaucoup de charme. Parmi ses nombreux volumes, il faut citer l'*Exposition des principales découvertes* (1851-53, 3 vol.); l'*Histoire du merveilleux dans les temps modernes*, 4 vol.; l'*Année scientifique et industrielle* depuis 1836, et une foule d'autres publications destinées à la vulgarisation des sciences. On distingue particulièrement sa très curieuse *Histoire de l'alchimie*, où l'auteur penche pour la croyance alchimiste à la possibilité de décomposer et de recomposer l'or. Tous les ouvrages de M. Figuier sont empreints d'une philosophie élevée. Ses plus récents ouvrages : *Tableau de la nature*, 10 vol.; le *Lendemain de la mort ou la Vie future d'après la science*, 1 vol.; les *Vies des savants illustres*, 5 vol., sont, sinon supérieurs, au moins égaux aux précédents ouvrages de cet écrivain éminent.

M<sup>me</sup> Figuier, sa femme, est également un écrivain de mérite dont les romans ont un grand succès.

convulsions, pour guérir les douleurs et les maladies nerveuses. A la même époque, Van Helmont, dans son célèbre ouvrage de la *Cure magnétique des plaies*, adopta le principe fondamental de la médecine par les aimants. La cure des plaies par l'*onguent magnétique* lui paraît la chose du monde la plus facile à expliquer. Comme son contemporain Van Helmont, le célèbre Robert Fludd mettait au service de la *médecine des métaux* son érudition, sa science et ses talents variés. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, le P. Hell, professeur d'astronomie à Vienne, s'adonnait à la *médecine des aimants*. Il fabriquait de petites pièces aimantées, auxquelles il attribuait des vertus spécifiques pour le traitement des maladies. En 1774, Mesmer (1), qui préluait alors à la création de sa doctrine, fit la connaissance du P. Hell. Il exécuta avec lui plusieurs essais pour le traitement des maladies par les pièces aimantées et produisit des effets manifestes dans le traitement des maladies nerveuses. Frappé des guérisons dont il avait été le témoin et l'auteur, et trouvant dans ces faits la démonstration de ses théories astronomiques et de la justesse des idées des médecins du moyen âge, quant à la sympathie des plantes et des métaux avec le corps humain, Mesmer établit à Vienne une maison de santé, dans laquelle il traitait les malades par l'aimant et l'électricité, et il y obtint des succès incontestables. Ajoutons cependant que Mesmer fit infidélité à la médecine des aimants. Il prétendit s'affranchir des appareils du P. Hell, et ne songea plus qu'à la doctrine dont on lui doit la création. Cette doctrine, il l'appela *le magnétisme animal*, dénomination qui prouve bien que le *magnétisme*, c'est-à-dire l'aimant ou l'aimantation appliquée à l'économie animale, était la base de son système médical. Seulement le magnétisme n'existait plus, dans la doctrine de Mesmer, que comme un mot, et comme un mot sans signification, sans justification, puisqu'il bannissait l'aimant de sa pratique médicale. Il conservait le mot et supprimait la chose.

» Telle est l'origine de la dénomination du *magnétisme animal*, qu'il est d'autant plus nécessaire de rappeler que, depuis un siècle, on l'a employée mille fois, sans savoir à quelle idée elle se rattache.

» Pendant que le P. Hell fabriquait en Allemagne des aimants curatifs, un médecin des États-Unis, Elisah Perkins, poursuivant l'étude des effets des métaux sur les corps vivants, construisait ce qu'il appelait le *tracteur métallique*, instrument composé d'une tige de deux pouces et demi de long, résultant de l'assemblage de

(1) MESMER (Frédéric-Antoine), médecin allemand (1734-1815), s'établit d'abord à Vienne; il y eut quelques difficultés qui le forcèrent à venir à Paris en 1778, où il excita un prodigieux enthousiasme. Il réunissait chez lui, autour d'un baquet magnétisé, un grand nombre de malades qu'il devait guérir par des passes magnétiques. Il eut de nombreux partisans auxquels il vendit cher son secret. En 1784, une commission de savants, nommée par le gouvernement et parmi lesquels figuraient Darcey, Franklin, Bailly, Lavoisier, A.-L. de Jussieu, fut chargée d'examiner la nouvelle doctrine, et ceux-ci, par l'organe de Bailly, déclarèrent que Mesmer produisait des effets surprenants, mais ils les attribuèrent à l'imagination ou à l'imitation; toutefois de Jussieu ne partagea pas l'opinion de ses collègues et fit un rapport à part, très favorable. A la suite de ce jugement, Mesmer quitta la France en emportant l'argent de ses souscripteurs, passa en Angleterre, puis retourna mourir en Allemagne. On est forcé de reconnaître qu'il fut quelque peu charlatan et qu'il s'est montré fort avide; mais l'importance de sa découverte du magnétisme animal semble être aujourd'hui hors de doute. Il a laissé quelques ouvrages relatifs à cette découverte.

divers métaux. Mais, en dépit des efforts du P. Hell, de Mesmer et de Perkins, à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, la *médecine des métaux* tomba dans une déconsidération générale. Elle fut reléguée par les savants et les écoles médicales au rang des vieilles utopies indignes du plus léger examen.

» Voilà cependant que de nos jours un observateur consciencieux, M. le docteur Burq, ramène sur la scène du monde scientifique cette même *médecine des métaux*, et qu'un médecin en renom, un membre de l'Académie de médecine, un professeur de la Faculté, M. le docteur Charcot, réssuscite, sans le vouloir, le magnétisme animal, avec le cortège tout entier de ses phénomènes les plus divers et jusque-là les plus contestés.

» Commençons par la *métallothérapie* ou *burquisme*.

» C'est en 1848, à l'hôpital Cochin, que la *métallothérapie* fit entendre ses premiers vagissements. Le docteur Burq y débuta par des armatures en cuivre appliquées sur la surface du corps de certains malades, afin d'étudier l'action de ces plaques sur les régions qui avaient perdu leur sensibilité normale. Bientôt il put constater que ces plaques de cuivre ramenaient la sensibilité là où elles étaient appliquées, et de plus il remarqua que les mêmes malades, qui avaient perdu souvent les forces musculaires des mêmes régions, avaient recouvré leur force physiologique après l'application de ces plaques. Dans la même année (juillet 1849), le choléra asiatique faisait de nombreuses victimes à Paris. M. Burq essaya l'usage des plaques de cuivre pour modifier l'un des symptômes les plus pénibles du choléra, les crampes des cholériques. Le succès fut complet. Néanmoins, l'épidémie une fois passée, on oublia vite les services rendus par M. Burq, et il ne fut plus question des plaques métalliques. Mais leur inventeur continua ses recherches à l'hôpital de la Salpêtrière, à l'hôpital Cochin et ailleurs. De nouvelles expériences devaient lui révéler des faits dont l'importance ne devait être acceptée que bien longtemps après leur constatation. Cette découverte était que les malades de troubles nerveux, guéris par la méthode nouvelle, ne l'étaient pas tous par le même métal ; que tel malade recouvrait la sensibilité et la force musculaire par l'application de plaques d'acier, d'argent, d'or ou de zinc. Chaque malade avait donc ce qu'on pourrait appeler une *aptitude métallique* ; et le docteur Burq trouva le moyen de déterminer cette aptitude.

» Comment expliquer cette action si curieuse des plaques métalliques sur le réveil de la sensibilité, et surtout cette indifférence de prime abord si extraordinaire dans les propriétés respectives des divers métaux vis-à-vis des malades. On avait bien émis l'idée que les phénomènes observés étaient le résultat d'actions électriques ; mais quel courant électrique peut bien donner l'or si inattaquable par les acides ? Et c'est précisément l'or qui semblait le plus généralement efficace. Cette action prédominante de l'or trompa au début les médecins. On avait sans doute un peu trop oublié la *théorie du contact* de Volta (page 208). Il suffit de mettre la peau en contact avec un métal, même inoxydable, pour engendrer un courant électrique. Est-ce vrai ? Il existe, pour le constater, un appareil bien commode : le *galvanomètre*. On appliqua sur le bras droit d'un *hémi-anesthésique* (malade privé de la faculté de sentir dans



Le Baquet de Mesmur.





une partie seulement du corps) des plaques d'or vierge : l'aiguille du galvanomètre s'arrêta à 3°; on recommença avec de l'or monnayé qui renferme du cuivre : l'instrument marqua 12°. Ainsi, le simple contact des plaques d'or sur la peau détermine la production d'un courant électrique, dont l'intensité varie de 3° à 12°, selon le titre du métal. Est-ce bien ce flux électrique très faible qui agit si énergiquement sur la sensibilité? Quoi de si simple à vérifier? On fit agir directement sur la partie anesthésiée un courant électrique de même intensité produit par une pile faible. Tous les phénomènes se reproduisirent. Identité d'action : dès lors on ne put douter que le courant électrique ne fût la cause des faits constatés. On peut, en effet, obtenir identiquement les mêmes résultats, soit par l'application des métaux, soit par le passage d'un courant électrique. Mais l'influence électrique admise, pourquoi cette aptitude particulière de chaque métal, selon le malade? Les effets électriques de chaque métal étant d'une énergie variable, l'expérience prouve que la sensibilité ne revient que selon l'influence d'un courant plus ou moins faible, selon le sujet.

» Ainsi est-il démontré que l'application des métaux, découverte par le docteur Burq, peut ramener la sensibilité générale et spéciale; que les métaux agissent en produisant des courants électriques; que la nature du métal actif révèle au médecin, et d'emblée, la force électrique qu'il doit employer pour ramener la sensibilité. Le métal joue le rôle d'un indicateur précieux. Enfin un fait expérimental important a été découvert en même temps par la Commission elle-même chargée de vérifier les premiers faits : le déplacement, le transfert de la sensibilité. On peut transporter à volonté, chez les hémianesthésiques, par l'application de plaques métalliques, la sensibilité d'un coude sur l'autre, par exemple, d'une moitié de la langue sur l'autre, etc.

» Passons aux expériences de M. le docteur Charcot (*fig.* à la page 273), telles que les a exposées M. le docteur A. Cartoiz :

» La presse, dit-il, s'est occupée dans ces derniers temps d'expériences et de démonstrations sur le somnambulisme et le magnétisme faites par M. le docteur Charcot à la Salpêtrière. Depuis plusieurs années, l'éminent professeur a inauguré, en dehors de son enseignement officiel, une série de leçons cliniques sur les maladies nerveuses dont son service est si abondamment pourvu. Ces leçons, qui ont lieu chaque dimanche à neuf heures et demie, dans une salle de plus en plus insuffisante pour le grand nombre d'auditeurs, portent, comme je viens de le dire, sur la démonstration des principaux types de névrose, épilepsie, hystérie, ou de maladies nerveuses proprement dites, paralysie agitante, lésions cérébrales, etc. Le champ est des plus vastes, les sujets ne manquent pas malheureusement, et ce cours obtient auprès des étudiants le succès le plus légitime.

» Cette année, le professeur a touché quelques-unes des questions les plus délicates de la pathologie nerveuse, questions dont l'interprétation difficile, malaisée, a donné lieu à des controverses sans nombre, et qui se relie à un ordre de faits largement exploités, et souvent avec un succès prodigieux, par les charlatans de tous les âges et de tous les pays. Le merveilleux, ou tout ce qui paraît l'être, a toujours sur la foule crédule un attrait puissant; il en a eu, et, qui plus est, il en aura tou-

jours, d'autant plus aisément qu'il trouve au service de sa vulgarisation, de sa propagation, des croyants, les uns de bonne foi, les autres se faisant sciemment les apologistes et les apôtres de la supercherie. Les adeptes du spiritisme, des tables tournantes, etc., n'ont pas cessé d'exister.

» ... Déjà, à propos d'une jeune fille dont l'état singulier avait soulevé dans la presse des polémiques ardentes, on avait fait connaître un certain nombre de manifestations nerveuses étranges et dépendant toutes, en résumé, de l'hystérie ; M. Bourneville, et avant lui M. Parrot, avaient prouvé que la stigmatisée de Louvain avait eu des prédécesseurs et qu'elle ne différait des malheureuses atteintes de la même maladie que par le bruit qui se faisait autour d'elle. M. Charcot a montré dans son cours que certaines hystériques peuvent, sous des influences variables, tomber dans un état de somnambulisme et de catalepsie, et que, dans certains cas, ces accès peuvent être provoqués avec la plus grande facilité. Il a été facile aux assistants de contrôler la véracité de ces faits, qui ont été reproduits publiquement à la Salpêtrière, et dont nous allons essayer de résumer le tableau.

» Une malade est placée devant un foyer de lumière intense, de lumière électrique, le regard fixé sur ce foyer. Au bout de quelques instants (quelques secondes à quelques minutes), la malade devient immobile, l'œil fixe, frappée de catalepsie. Les membres sont souples et gardent l'attitude qu'on leur donne. Dans cet état, la physionomie de la malade reflète en quelque sorte les expressions des gestes : c'est ainsi que la figure se contracte, s'assombrit, si l'on fait à la malade une attitude de menace ; au contraire, la physionomie devient souriante et ouverte, si l'on joint les deux mains sur les lèvres comme pour envoyer un baiser. En dehors de ces modifications du masque facial sous l'influence de certaines attitudes, la malade reste impassible, fixe, insensible au monde extérieur, transformée en véritable statue. Cet état dure aussi longtemps que l'œil fixé sur le foyer lumineux est impressionné par cet agent. Si alors, à un moment donné, on vient à interrompre brusquement l'impression des rayons lumineux, soit au moyen d'un écran, soit plus simplement en fermant les paupières du sujet, la catalepsie fait place à un état de léthargie, de somnambulisme, de sommeil provoqué. Ce changement est aussi brusque que la suppression de l'agent excitateur. La malade tombe à la renverse, le cou tendu, la respiration sifflante, avec un hoquet léger, les yeux convulsés, avec un ensemble de symptômes qui se rapprochent des débuts de l'attaque hystéro-épileptique. Si on interpelle vivement la malade plongée dans cet état léthargique, on la voit se lever, s'avancer vers la personne qui l'a interpellée, exécuter divers mouvements combinés, tels que l'écriture, la couture, etc. Et cependant, à ce moment, la malade est toujours dans l'anesthésie la plus absolue, les yeux convulsés, les paupières fermées ou demi-closes. Bien plus, c'est là qu'on voit se révéler les symptômes invoqués par les magnétiseurs et qualifiés de somnambulisme ; la malade peut répondre *parfois* aux questions qu'on lui pose ; il semble même que, dans certains cas, l'intelligence soit plus excitée. Il n'est pas besoin d'une lumière ; le son produit par un diapason, une cloche, peut provoquer l'apparition de ces crises. M. Charcot a fait installer dans son laboratoire un diapason

monstre qui donne des vibrations intenses, profondes : il suffit de placer la malade sur la caisse vibrante pour qu'au second ou troisième coup imprimé au diapason, elle tombe en catalepsie. A coup sûr, voilà des faits qui tiennent du merveilleux ; mais ce n'est pas tout. Disons d'abord que cet état léthargique, somnambulique, si l'on veut, cesse aussi subitement qu'il est apparu, et cela avec la plus grande facilité ; il suffit, par exemple, de souffler sur le visage du sujet. La léthargie s'efface, il y a une apparence de convulsion légère, et la malade sort de son rêve sans le moindre souvenir de ce qui s'est passé.

» Ces deux états, catalepsie et léthargie, peuvent, en quelque sorte, exister simultanément, et c'est là, à notre avis, un des points les plus curieux des expériences de M. Charcot. La malade étant en catalepsie, comme dans le premier cas dont nous avons parlé, l'expérimentateur peut à son gré déterminer une héli-léthargie et une héli-catalepsie, c'est-à-dire que la moitié du corps sera cataleptique, tandis que l'autre moitié sera léthargique, et cela aussi bien d'un côté que de l'autre, d'une façon tout à fait indifférente. Il suffit pour cela de provoquer la crise léthargique unilatéralement en obturant un œil, en supprimant l'influence lumineuse sur la rétine du côté que l'on veut rendre léthargique. Ce côté (le gauche, par exemple) n'a plus les propriétés du côté droit, de conserver dans les membres une attitude quelconque.

» Ces faits bien observés, bien et judicieusement expérimentés, ont certes un intérêt considérable. Des effets curatifs ont été obtenus dans le domaine des paralysies et de certaines contractures anormales. M. Charcot, en mettant en contact le bras d'une malade de la Salpêtrière avec un diapason en état de vibration, détermine dans ce bras une contracture persistante. S'il approche alors un aimant à distance du bras resté normal, ce bras entre lui-même en contracture, en même temps que le bras précédemment contracturé se relâche. C'est ce phénomène que l'on a désigné sous le nom de *transfert*, qui a lieu dans le domaine de la sensibilité comme dans celui de la motricité, et qui a été découvert, ainsi que nous l'avons dit en parlant de la *métallothérapie*, par la commission chargée d'étudier les expériences du docteur Burq. Les aimants sont appelés ainsi à reparaitre sur la scène du monde médical. On est ainsi conduit à répéter, sous forme de conclusion, le mot de Talleyrand, que nous avons cité comme introduction à cet exposé : *Tout arrive!* »

**APPLICATION DES COURANTS A LA THÉRAPEUTIQUE.** — M. Mascart, rapporteur du jury de l'Exposition internationale d'électricité, tenue à Paris en 1881, remarquait avec regret que l'art médical ne paraît pas encore en mesure de profiter des ressources que lui offre la science de l'électricité. En effet, l'emploi de cet agent comme moyen thérapeutique n'a pas répondu jusqu'ici aux espérances des expérimentateurs. Cependant on ne peut nier que, dans certains cas, l'électricité ne produise des résultats avantageux, surtout s'il s'agit de stimuler un organe qui ne fonctionne pas normalement. Il faut toutefois, lorsqu'on veut appliquer

les courants, agir prudemment, examiner le tempérament du malade, et juger si le mal résultant de ce remède énergique ne sera pas plus redoutable que le mal actuel. On doit choisir ensuite le genre de courants qu'on emploiera, car tous les courants n'ont pas exactement les mêmes propriétés, et surtout on doit en graduer l'action. Généralement, on fait usage des *courants induits*, dont nous parlerons ci-après, et nous décrirons alors les appareils médicaux usités. Quand l'on emploie les courants de la pile, afin d'obtenir, en même temps que la secousse musculaire, certains effets chimiques sur le sang ou sur les organes, on prend le plus souvent la pile de Pulvermacher (page 210). D'autres fois, on recherche une série de commotions douces et continues, et l'on se sert d'une pile ordinaire. Les deux pôles sont placés aux extrémités des nerfs à électriser ; ils sont appliqués sur la peau au moyen de bandes serrées ou de compresses mouillées, de façon que l'électricité pénètre dans l'organe par une assez large surface. Le contact peut ainsi être maintenu pendant longtemps.

**EFFETS CALORIFIQUES.** — Un courant électrique en traversant un fil métallique produit sur celui-ci les mêmes effets qu'une batterie électrique ; le fil s'échauffe, rougit, se fond ou se volatilise, selon qu'il est plus ou moins long ou d'un diamètre plus ou moins grand. L'iridium et le platine, qui résistent aux feux de forge les plus ardents et dont la fusion est une opération métallurgique excessivement difficile (*Chaleur*, page 397), fondent au passage du courant. Le charbon est le seul corps que, jusqu'à présent, n'a pu fondre la pile ; cependant, dans des expériences qui sont restées fameuses, Despretz a ramolli du charbon, et lui a fait présenter des traces, faibles, il est vrai, mais non équivoques de fusion.

M. Becquerel s'est livré à des travaux suivis, relatifs à la chaleur développée par le passage d'un courant à travers les fils métalliques, et il a établi les quatre lois suivantes, qu'il nous suffira d'énoncer :

1° *La quantité de chaleur développée est en raison directe du carré de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné.*

2° *La quantité de chaleur est en raison directe de la résistance du fil au passage de l'électricité.*

3° *Quelle que soit la longueur du fil, si le diamètre est constant, et s'il est traversé par le même courant, l'élévation de la température est la même dans tout le fil.*

4° *Pour une même quantité d'électricité, l'élévation de la température en différents points du fil est en raison inverse de la quatrième puissance du diamètre.*

**EFFETS LUMINEUX. — ARC VOLTAÏQUE.** — Ce fut Humphry Davy qui fit les premières recherches sur la lumière électrique. L'incandescence des fils métalliques produite par la pile l'avait surtout frappé; plus d'une fois il s'était demandé s'il n'y aurait pas moyen de prolonger cette incandescence. « Si l'on s'opposait à la combustion! se disait-il. Je tenterai l'expérience dans le vide. » Cette idée lui sourit d'autant plus que,

dans la production de l'étincelle qui jaillissait, d'une manière continue, entre les deux rhéophores, il avait remarqué la résistance qu'oppose l'air au passage du courant. Il ne s'agissait plus que de construire un appareil. Mais Davy avait constaté que la puissance lumineuse de l'étincelle augmente, d'une manière notable, quand on joint les extrémités des fils conducteurs au moyen de substances susceptibles de se désagréger. Il résolut donc d'adapter des cônes de

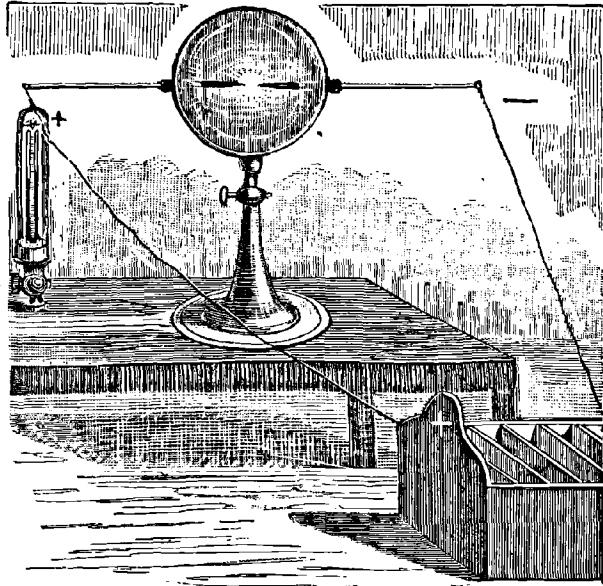


Fig. 90. — PREMIER ESSAI DE LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.

charbon aux extrémités des rhéophores. L'expérience eut lieu en 1801.

L'appareil se composait (*fig. 90*) d'un ballon de verre, placé sur la platine d'une machine pneumatique et fermé au moyen d'un robinet. Sur les côtés du ballon sont deux tiges métalliques, glissant à frottement dans des boîtes en cuir, de manière à pouvoir être rapprochées ou écartées selon les cas. De petits cônes de charbon de bois léger sont adaptés aux extrémités des tiges. Ces charbons ont été éteints dans un bain de mercure, ce qui a augmenté leur conductibilité, car des globules de métal ont pénétré dans leurs pores. Une batterie galvanique se trouve dans le voisinage : elle se compose de plusieurs piles à auges réunissant 2,000 éléments de 4 à 5 décimètres carrés. C'est cette fameuse batterie construite par la société royale de Londres. Les deux cônes de charbon furent mis en contact; puis il fit communiquer l'une des tiges avec le pôle positif de la pile, et l'autre avec le pôle négatif. Le courant traverse le fil conducteur,

et les points de contact brillent les premiers d'un vif éclat : peu à peu les points lumineux se propagent et la lumière devient éclatante. En éloignant les deux cônes l'un de l'autre, la lumière ne s'éteindra pas ; mais il se produira entre eux comme un ruban de feu. Ce qu'il y avait de remarquable dans cette expérience, c'est que la lumière la plus éblouissante était produite sans qu'il y eût combustion. En effet, les cônes de charbon étant placés dans le vide ne pouvaient être altérés dans leur substance ; leur forme seule était changée ; ils ne brûlaient pas, ils se volatilisaient ; il y avait transport des particules du charbon positif sur le charbon négatif. Une sorte de cône s'amasse au charbon négatif, tandis que le charbon positif se creuse d'une cavité, dont la forme semble reproduire celle de la matière transportée au pôle opposé. Cet arc lumineux, appelé *arc voltaïque*, ne doit donc pas être confondu avec la série d'étincelles obtenue en rapprochant deux corps électrisés d'une façon opposée ; c'est un véritable circuit conducteur formé de particules volatilisées, transportées d'un pôle à l'autre et faisant partie d'un même circuit.

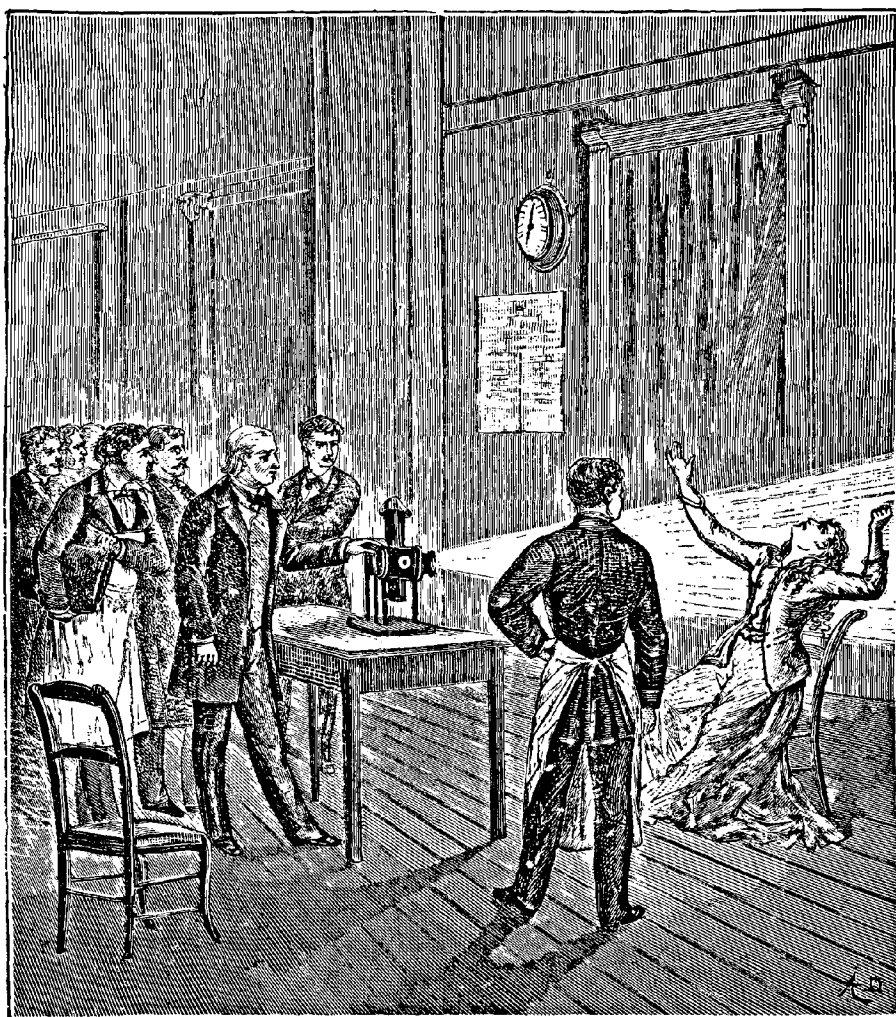
Cette expérience, qui devait conduire à l'*éclairage électrique*, fut souvent répétée alors avec d'imperceptibles variantes ; mais la question, pour passer dans le domaine de l'industrie, avait besoin d'abord qu'on découvrit un corps moins facilement combustible que le charbon de bois, et ce fut en 1840 seulement que Foucault proposa de lui substituer le charbon de cornue, beaucoup plus dur. Un autre inconvénient subsistait encore : c'était le défaut de continuité de lumière, qui s'éteignait par suite de l'usure des charbons et leur éloignement. On était obligé de pousser l'un des charbons à la main pour permettre au courant de franchir leur intervalle. Ce ne fut qu'en 1848 que l'on parvint à vaincre ces difficultés. Nous en parlerons ci-après.

## CHAPITRE IV

### ÉLECTRO-MAGNÉTISME

**HISTORIQUE.** — On donne le nom d'*électro-magnétisme* à cette partie de la physique qui a pour objet l'étude des actions réciproques des courants sur les aimants et des aimants sur les courants. Nous dirons d'abord, d'après M. Hoeffler, l'histoire de cette admirable découverte.

Après s'être d'abord attachés à différencier le magnétisme de l'électricité, les physiiciens s'efforcèrent, par un revirement soudain, d'identifier ces deux actions. L'aimant passait pour une « pyrite ferrugineuse saturée



Expériences de M. le docteur Charcot, à la Salpêtrière (page 267).

de fluide électrique, » opinion que Marat combattit dans ses *Recherches sur l'électricité*. Le P. Cotte, le fameux curé de Montmorency, ami de J.-J. Rousseau, affirmait l'identité entre les deux fluides : Cigna, Lacépède et d'autres abondaient dans le même sens ; d'autres, au contraire, parmi

lesquels Van Swinden et surtout Mussenbroek, s'efforçaient de montrer le manque complet d'analogie entre eux. Dalibard, dans les observations ajoutées à la traduction qu'il nous a donnée des lettres de Franklin, affirme avec confiance que « le magnétisme n'est qu'un effet de la matière électrique, et que le fluide magnétique n'est autre que le fluide électrique. » Franklin combattit vivement cette opinion, et déclare, dans une lettre datée du 10 mars 1773, adressée à Barbeu-Dubourg, que « ces deux puissances n'ont aucun rapport l'une à l'autre ». Dalibard, Buffon, rappelant que les pôles des aiguilles des boussoles changent de pôles sous l'influence de la foudre, que les croix métalliques des églises sont souvent converties en aimants, que le tonnerre, en tombant dans des magasins de fer, y produit des phénomènes d'aimantation considérable, procédèrent à des expériences que répétèrent Wilson et Franklin, sans se rendre à l'évidence, et la question fut, pour ainsi dire, abandonnée.

Depuis la découverte de l'électricité dynamique, la question était entrée dans une phase nouvelle. La pile, en fixant à ses deux bouts les deux électricités opposées, figurait en quelque sorte les pôles d'un aimant. Ritter (1) porta l'analogie jusqu'à l'identité, en établissant que la pile est un véritable aimant, que sa polarité est une polarité magnétique, et que les fluides contraires du magnétisme et de l'électricité doivent avoir la même notation. Cependant beaucoup de physiciens n'adoptèrent pas cette manière de voir. Ces dissidences intéressantes n'arrêtèrent pas l'élan donné. Muncke et Gruner essayèrent, quoique vainement, d'obtenir, à l'aide de batteries magnétiques d'une grande puissance, des effets analogues à ceux de la pile voltaïque. En 1802, une expérience de M. Romagnosi, de Trente, suivant celles de Mojon, d'Aldini et d'autres, montre que déjà l'on connaissait l'action d'un courant voltaïque. On savait aussi que la foudre était, comme l'étincelle électrique, capable d'aimanter le fer, d'y détruire ou d'y renverser la polarité magnétique. Malheureusement, la plupart des physiciens avaient adopté l'opinion de Van Marum, qui regardait ces phénomènes comme produits par le choc et la secousse électriques. Ørsted lui-même croyait simplement à une identité d'origine de l'électricité et du magnétisme.

Comment Ørsted (2) parvint-il à la découverte qui a immortalisé son

(1) RITTER (Jean-Guillaume), physicien et médecin allemand (1776-1810), a laissé de nombreux travaux relatifs à l'électricité. Les recherches qu'il entreprit avec le duc de Gotha lui ouvrirent les portes de l'Académie de Munich, en 1804. Il croyait, non seulement au magnétisme animal, mais encore à la seconde vue, à la baguette divinatoire, etc. Volta lui-même prit part aux savantes discussions que soulevèrent les expériences de Ritter.

(2) ØRSTED (Jean-Christian), professeur de physique à Copenhague (1778-1851), a publié un grand nombre d'ouvrages dont le dernier : *l'Esprit dans la nature*, a eu un grand succès. C'est seu-



nom? Dans les expériences de physique qu'il faisait un jour de l'hiver de 1819 à 1820, un fil de platine, rendu incandescent par la conjonction des pôles d'une puissante pile voltaïque, passait, par hasard, au-dessus d'une aiguille aimantée qui se trouvait près de la pile. Cette aiguille offrit tout à coup, au grand étonnement des assistants, des oscillations étranges, des alternatives d'attraction et de répulsion, qu'on ne pouvait attribuer qu'à l'action du fil conjonctif. Telle fut la véritable origine de la découverte de l'*électro-magnétisme*. Ørsted essaya plus tard de montrer qu'il y avait été conduit par ses idées théoriques, par l'influence prévue que les deux élec-

tricités contraires auraient, au moment de leur combinaison, exercée sur l'aiguille magnétique. Mais rien ne prouve la vérité de cette assertion; il est probable, au contraire, que ni lui ni ses auditeurs n'ont saisi d'abord la portée du phénomène qui s'était révélé à eux. L'expé-

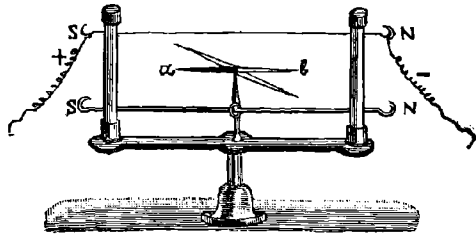


Fig. 91. — EXPÉRIENCE DE ØRSTED.

rience fut recommencée dans la même année 1820, par J. Tobie Mayer, devant l'Académie des sciences de Göttingue, et par M. de La Rive, le 11 septembre, devant l'Académie des sciences de Paris. Mais elle ne franchit pas le cercle des savants, parce qu'on s'était imaginé que, pour réussir, il fallait une pile très puissante, et, par conséquent, très dispendieuse, tandis qu'on devait bientôt apprendre que des disques de zinc et de cuivre d'un diamètre peu considérable suffisaient.

**EXPÉRIENCE D'ØRSTED. LOIS D'AMPÈRE.** — On répète cette expérience en plaçant deux fils conducteurs SN (*fig.* 91) dans la direction du méridien magnétique, l'un au-dessus, l'autre au-dessous d'une aiguille aimantée *ab*, mobile sur un pivot vertical; l'aiguille déviara de sa position d'équilibre dès qu'un courant passera, et elle tendra à se placer perpendiculairement à lui; le pôle austral déviara vers l'ouest, si le courant supérieur va du sud au nord; vers l'est, si le courant inférieur va également du sud au nord; vers l'est, si le courant supérieur va du nord au sud; vers l'ouest, si le courant inférieur va du nord au sud. La déviation de l'aiguille est d'autant plus prononcée que l'intensité du courant est plus grande; il y a en effet l'action du courant qui tend à mettre l'aiguille en croix avec lui-même,

lement en juillet 1820 qu'il fit paraître le mémoire intitulé : *Experimenta circum effectum conflictus electrici in arcum magneticum*, par lequel il faisait connaître la découverte qui l'a rendu célèbre.

et l'action de la terre qui tend à la ramener à sa première direction; c'est sous l'action de ces deux forces contraires que l'aiguille prend une position intermédiaire, faisant avec la première direction un angle d'autant plus grand que l'intensité du courant est plus grande.

La loi générale qui préside à ces déviations a été établie par Ampère (1), en 1820, en définissant la droite et la gauche du courant, définition connue sous le nom du *Bonhomme d'Ampère*. Il suppose un observateur placé dans le fil que parcourt le courant, de manière qu'ayant toujours la face tournée vers l'aiguille, le courant le traverse des pieds à la tête. D'après cette définition, la *loi d'Ampère* peut se résumer en cette proposition : *Dans l'action directrice des courants sur les aimants, le pôle austral est constamment dévié à la gauche des courants.*

**GALVANOMÈTRE.** — Cet instrument, connu également sous les noms de *rhéomètre* ou de *multiplicateur*, sert à reconnaître l'existence, la direction et l'intensité des courants les plus faibles. L'invention en est due à un physicien allemand, Schweigger, peu de temps après la découverte d'Ørsted; c'est une application importante de l'action des courants sur les aimants : par la déviation de l'aiguille on constate l'existence du courant; par le sens de cette déviation, on connaît sa direction, et, par l'angle de déviation, on en mesure l'intensité. Il suffit de multiplier l'action des courants pour avoir une déviation sensible et de diminuer la résistance de la terre.

Le premier galvanomètre, celui de Schweigger, dont d'ailleurs Ampère avait posé le principe, mais en se servant d'un seul fil, consiste en un cadre rectangulaire de bois (*fig. 92*), sur lequel s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie dans toute sa longueur, afin d'isoler latéralement les circuits les uns des autres, et dont les extrémités sont en rapport avec le

(1) AMPÈRE (André-Marie), célèbre physicien français (1775-1836), d'abord professeur de mathématiques et de physique à Bourg, puis à Lyon, entra comme répétiteur d'analyse à l'École polytechnique en 1805, puis fut successivement nommé membre de l'Institut, professeur de physique au Collège de France, inspecteur général. Mathématicien éminent dans ses nombreux mémoires sur les probabilités, le calcul des variations, la mécanique rationnelle; digne successeur des Galilée et des Pascal pour sa découverte de l'électro-dynamique; philosophe profond, cherchant dans l'étude de son être les bases d'une nouvelle méthode psychologique; littérateur distingué, poète, aimant les poètes anciens, Ampère ajoutait à toutes ces grandes qualités de l'esprit les qualités du cœur et un ardent patriotisme. Ajoutez à cela une bonhomie vraiment naïve, qui l'avait fait surnommer le La Fontaine de la science. Outre de nombreux mémoires, Ampère a publié un *Essai sur la philosophie des sciences*. Malheureusement, ses écrits sont dispersés dans différentes publications. Il y a lieu d'espérer que l'Institut donnera quelque jour une édition complète des œuvres d'un de ses membres les plus illustres. — Son fils AMPÈRE (Jean-Jacques-Antoine), poète et érudit, membre de l'Académie française, flotta toute sa vie entre la science et la poésie, sans se décider suffisamment pour l'une d'elles (1800-1864).

courant que l'on doit observer. Une aiguille aimantée  $ab$  est, ou suspendue à un fil, ou mobile sur un pivot dans un plan horizontal. Le rectangle  $qxyz$  a été placé, avant le passage du courant, dans le plan du méridien magnétique. Si l'on examine les actions des quatre côtés du rectangle, on voit qu'elles tendent toutes à porter le pôle austral du même côté, c'est-à-dire en avant. Il en sera de même si l'on fait faire au circuit plusieurs tours; l'aiguille se trouvera soumise ainsi à une action notablement plus forte.

Dans ce galvanomètre, l'action de la terre est par trop prépondérante; l'appareil manque donc de sensibilité. Nobili le perfectionna. Il fit agir le circuit non plus sur une seule aiguille, mais sur un système de deux aiguilles superposées (fig. 93), ayant leurs pôles contraires tournés du même côté; ces aiguilles devenant *astatiques*, c'est-à-dire que le magnétisme de l'une et de l'autre se détruit réciproquement. Ces aiguilles sont disposées de telle sorte que l'une ne peut tourner sans l'autre. L'aiguille  $ab$ , placée dans l'intérieur du cadre, reçoit l'influence du circuit  $mno pq$ ; mais toutes les parties de ce circuit n'influencent pas également l'aiguille  $a'b'$ . En effet, d'après la loi du *bonhomme d'Ampère*, la partie  $no$  tend à pousser le pôle  $a'$  en avant, tandis que les trois autres parties  $mn$ ,  $op$  et  $pq$  le poussent en arrière.

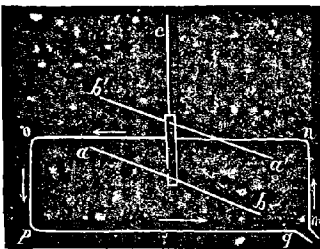


Fig. 93.

GALVANOMÈTRE DE NOBILI.

A cause de la distance moindre,  $mo$  prédomine, et conséquemment l'action finale du circuit complet est d'imprimer à  $a'b'$  une déviation dans le même sens que  $ab$ , laquelle augmente l'action du courant. En effet, si les deux aiguilles sont rigoureusement de même force, de même longueur, et placées dans le même plan, les actions contraires, agissant sur les pôles  $a$  et  $b'$  en même temps que sur les pôles  $b$  et  $a'$ , se neutralisent complètement, et l'action de la terre sera annulée; mais si la force de l'une des aiguilles est quelque peu que ce soit supérieure à celle de l'autre, la terre les dirige en vertu de la différence de son intensité, indiquant ainsi la plus petite résistance que l'on puisse chercher; de sorte qu'en enroulant un nombre suffisant de circuits du fil, une déviation se produit, appréciable au passage des plus faibles courants.

Ruhmkorff a construit un *galvanomètre* extrêmement sensible. Il se

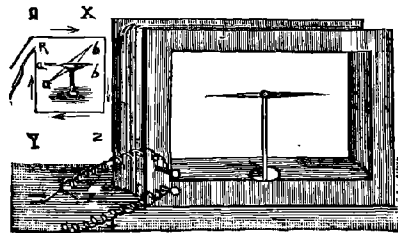


Fig. 92.

GALVANOMÈTRE DE SCHWEIGER.

compose (fig. 94) d'un support D en cuivre, autour duquel s'enroule un fil de même métal, recouvert de soie afin d'isoler les divers circuits ; sur ce support est un cadran horizontal gradué, dont le zéro correspond à un diamètre parallèle à la direction du fil. Le cadran porte deux graduations, l'une à droite, l'autre à la gauche du zéro, mais a seulement 90 degrés. Au milieu, un support soutient un fil très fin de cocon, au moyen d'un système astatique de deux aiguilles *ab* et A, la première au-dessus du cadran et la

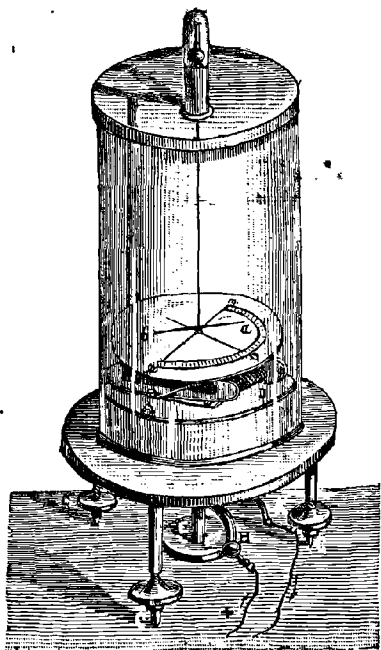


Fig. 94.

GALVANOMÈTRE DE RUHKORFF.

seconde tournant dans le même circuit. Ces aiguilles, réunies entre elles par un fil de cuivre sans pouvoir dévier l'une sans l'autre, ne doivent pas cependant supporter identiquement la même intensité magnétique, c'est-à-dire ne doivent pas être rigoureusement *astatiques*, car un courant, quelque faible qu'il fût, les mettrait toujours en croix avec lui, et toute comparaison entre les intensités des divers courants deviendrait impossible.

Les tiges courbes K et H qui communiquent, par-dessous l'appareil, avec les extrémités du circuit, reçoivent les conducteurs qui transmettent le courant que l'on veut observer. Les vis C servent à placer l'appareil bien verticalement, de sorte que le fil de suspension corresponde exactement au centre du cadre autour duquel s'enroule le fil. Enfin un bouton E transmet le mouvement au support D et au cadran, qui sont mobiles sur un axe

vertical, afin que les fils du circuit puissent être placés dans la direction du méridien magnétique s'il est nécessaire de mouvoir l'appareil.

On désigne quelquefois ce galvanomètre sous le nom encore de *galvanomètre de Nobili*, parce qu'il est construit sur l'emploi du système astatique dû à ce physicien ; on l'appelle aussi *galvanomètre différentiel*, parce qu'il permet de comparer l'intensité de deux courants différents.

A cause de son extrême sensibilité, cet instrument est un des plus précieux de la physique, parce qu'il peut servir non seulement à reconnaître la présence des courants les plus faibles, mais encore à constater exactement leur direction et leur intensité. C'est avec lui que Becquerel a pu démontrer la présence de l'électricité dans toutes les combinaisons chi-

miques et déterminer les lois qui les régissent. Nous avons vu le parti que Melloni, Laprévostaye, Desains, Tyndall, en ont tiré dans l'étude de la chaleur rayonnante (*Chaleur*, page 484).

**LOIS DES ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS.** — L'action directrice des courants sur les aimants est démontrée par l'expérience d'Ørsted. L'intensité de cette action directrice varie avec la distance, et en vertu du nombre d'oscillations que fait l'aiguille aimantée sous l'influence d'un courant rectiligne. Savart et Biot ont énoncé ainsi les lois qui régissent cette intensité :

1° *L'intensité de la résultante des actions directrices de toutes les parties d'un courant sur une aiguille aimantée est en raison inverse de la distance.*

2° *Elle s'exerce dans tous les sens et à travers toutes les substances non magnétiques.*

L'action directrice des courants sur les aimants est réciproque. Après qu'Ørsted eut indiqué celle-ci, Ampère pensa qu'un aimant fixe devait diriger un courant mobile. L'expérience confirma cette pensée. Nous verrons ci-après comment s'expliquent, par la théorie d'Ampère, ces actions réciproques entre les aimants et les courants.

**DÉCOUVERTE D'AMPÈRE. — ÉLECTRO-DYNAMIQUE.** — Huit jours après que M. de La Rive, dans la séance hebdomadaire du lundi 11 septembre 1820, eut répété l'expérience d'Ørsted devant l'Académie des sciences, Ampère montra comment, abstraction faite de l'aiguille aimantée, deux fils métalliques parcourus par des courants électriques, peuvent agir l'un sur l'autre par attraction et par répulsion.

L'étude de ces actions constitue une branche de l'électricité dynamique connue sous le nom d'*électro-dynamique*. Elle présente différents cas, suivant que les courants sont parallèles ou angulaires, rectilignes ou sinueux. Ampère en a établi les lois.

Les expériences de l'illustre savant n'échappèrent point aux critiques, souvent dictées par la jalousie. « On ne voulut d'abord voir, dit Arago, dans les attractions et les répulsions des courants, qu'une modification à peine sensible des attractions et des répulsions électriques ordinaires, connues depuis le temps de Dufay. Sur ce point, la réponse de notre confrère fut prompte et décisive. Rappelant un fait connu depuis longtemps, à savoir que deux corps semblablement électrisés s'écartent l'un de l'autre dès le moment qu'ils se sont touchés, Ampère fit remarquer que le contraire avait lieu dans son expérience, où deux fils, traversés par

des courants semblables, restaient attachés comme deux aimants, quand on les amenait au contact. Il n'y avait rien à répliquer à cette argumentation démonstrative. »

Une autre objection, qui embarrassait plus sérieusement Ampère, était ainsi formulée : « Deux corps qui, séparément, ont la propriété d'agir sur un troisième, ne sauraient manquer d'agir l'un sur l'autre. Les fils conjonctifs de la pile agissent sur l'aiguille aimantée (découverte d'Ersted) ; donc deux fils conjonctifs doivent s'influencer réciproquement (découverte d'Ampère) ; donc les mouvements d'attraction et de répulsion

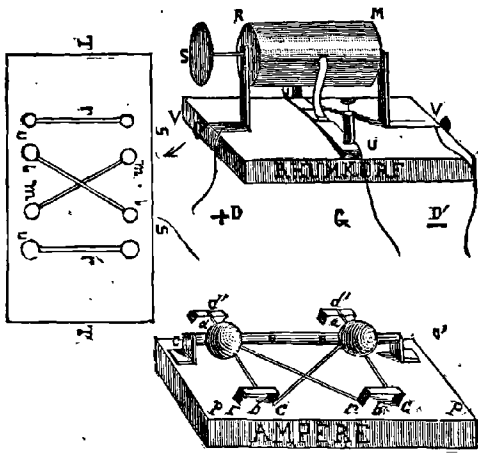


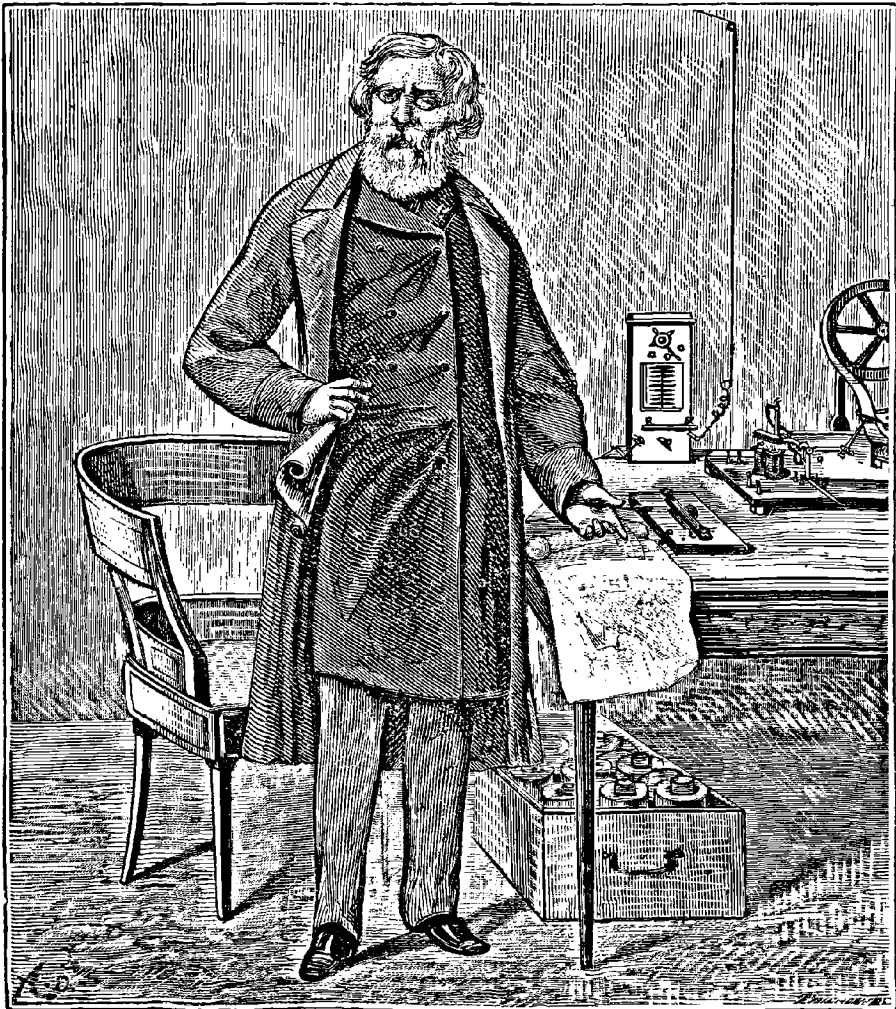
Fig. 95. — COMMUTATEURS.

qu'ils éprouvent quand on les met en présence l'un de l'autre sont des déductions, des conséquences nécessaires de l'expérience du physicien danois ; donc on aurait tort de ranger les observations d'Ampère parmi les faits primordiaux qui ouvrent aux sciences des voies nouvelles. » Ampère répondait en défiant ses adversaires de déduire des expériences d'Ersted le sens de l'action mutuelle de deux courants électriques, lorsque Arago leur posa ce dilemme : « Voici deux clefs en

fer doux : chacune d'elles attire cette boussole. Si vous ne prouvez pas que, mises en présence l'une de l'autre, ces clefs s'attirent ou se repoussent, le point de départ de toutes vos objections est faux. » Dès ce moment, ajoute Arago, les objections furent abandonnées, et les *actions réciproques des courants électriques* prirent définitivement la place qui leur appartenait parmi les plus belles découvertes de la physique moderne.

**INTERRUPTEURS ET COMMUTATEURS.** — Dans les expériences dont nous allons parler, on a quelquefois besoin d'interrompre les courants électriques et de changer leur sens ; on se sert alors d'appareils appelés *interrupteurs* et *commutateurs*. Il y en a de bien des formes. Voici celui d'Ampère ; les courants sont établis en faisant plonger dans du mercure des tiges métalliques. On pratique dans une table TT' (fig. 95) deux rainures rr' de quelques millimètres de profondeur et quatre cavités semblables vv' tt', communiquant diagonalement par des lames de cuivre

*W*, *mm'*, qui sont séparées au point de croisement par une substance isolante. Ces cavités et les deux rainures, après avoir été mastiquées, pour que le bois humide ne puisse donner issue à une partie du courant, sont rem-



SAMUEL FINLEY BREESE MORSE.

plies de mercure. Si on plonge le fil positif de la pile dans la rainure *r*, et le fil négatif dans la rainure *r'*, le courant n'aura pas lieu tant qu'on n'établira pas une communication métallique entre chacune des deux rainures et l'une des cavités. Soient *SS'* deux lames de platine destinées à transmettre le cou-

rant dans l'appareil électro-dynamique; la lame S peut devenir positive ou négative, suivant que la cavité  $r$  communique avec  $t$ , et  $r'$  avec  $t'$ , ou bien quand  $r$  communique avec  $v$ , et  $r'$  avec  $v'$ . Dans le premier cas, le courant suit la direction  $rtSS't'r'$ ; dans le second, il va de R en  $v$ , puis traverse la lame  $ll'$ , et ensuite va de  $b'$  en  $bt$  et de  $v'$  en R'. Or rien n'est plus simple que d'établir ou d'interrompre toutes ces communications au moyen d'une bascule BB' en bois, qui peut tourner autour d'un axe  $ad'$ , s'ajustant dans des trous  $oo'$ . On adapte sur cette bascule quatre arcs conducteurs en métal  $b\ b'\ d\ d'$ ; en l'élevant ou l'abaissant convenablement, on change les communications. Quand les arcs  $b$  et  $b'$  sont abaissés,  $r$  et  $v$  communiquent par l'intermédiaire de  $rbc$ , et  $r'$  avec  $v'$  au moyen de  $r'b'c'$ . Quand les arcs  $d$  et  $d'$  sont, au contraire, abaissés, la communication est établie entre  $r$  et  $t$  et  $r'$  et  $t'$  par l'intermédiaire des arcs.

Le second commutateur est dû à M. Ruhmkorff (*fig. 95*). Il se compose d'un cylindre MR en ivoire dont la surface est composée de deux parties isolantes et de deux parties conductrices en cuivre. Les pôles de la pile communiquent aux boutons V V' qui touchent aux montants métalliques entre lesquels le cylindre se meut. Les fils qui doivent recevoir le courant sont attachés aux boutons U et U' en relation avec deux tiges qui frottent contre la surface du cylindre. Les parties métalliques qui sont à la surface du cylindre étant en relation, l'une avec un des montants, l'autre avec l'autre montant, on comprend aisément qu'à l'aide du bouton S, on pourra interrompre le circuit de la pile, ou bien faire passer l'électricité dans un sens ou dans l'autre dans le fil GG'.

**ACTIONS MUTUELLES DES COURANTS ÉLECTRIQUES.** — Deux fils métalliques, traversés par des courants, s'attirent ou se repoussent selon la direction réciproque des courants qui les parcourent. Voici les lois qui régissent ces actions mutuelles :

1° *Deux courants parallèles et allant dans le même sens s'attirent.*

2° *Deux courants parallèles et allant en sens contraire se repoussent.*

Pour le démontrer, on partage le circuit que parcourt le courant en deux parties, l'une fixe et l'autre mobile (*fig. 96*). La première se compose de deux colonnes de cuivre DE, HL, placées verticalement sur une tablette : en faisant communiquer l'électrode positif P d'une pile de Bunsen avec le pied D de la colonne DE, le courant la traverse, va au fil A, et de là à une petite capsule B contenant du mercure. A partir de là commence la partie mobile du circuit, qui consiste dans un fil de cuivre dont une extrémité s'appuie au moyen d'un pivot au milieu de la capsule B, et dont l'autre plonge dans une capsule C, d'où le courant s'élève dans la



colonne LH, qui communique par son sommet H avec l'électrode négatif N de la pile. Par la disposition des flèches, on voit que le courant qui traverse les colonnes et celui qui parcourt le circuit mobile vont en sens contraire. Or, aussitôt que ce courant existe, le circuit, très mobile autour de son pivot, s'éloigne des colonnes, et, après quelques oscillations, se met en croix avec sa position première. Ainsi apparaît la répulsion entre le courant ascendant dans les colonnes et le courant descendant dans le circuit, et la seconde loi est démontrée.

La première se vérifie à l'aide du même appareil, en substituant au circuit précédent un autre circuit disposé de manière que le courant, étant ascendant dans les colonnes, le soit aussi dans les deux branches du circuit. En écartant d'abord celui-ci, on le voit revenir vivement vers les colonnes dès que passe le courant.

3° *Deux courants rectilignes, dont les directions forment entre elles un angle quelconque, s'attirent lorsque tous les deux s'approchent du sommet de l'angle et se repoussent lorsqu'ils s'en éloignent.*

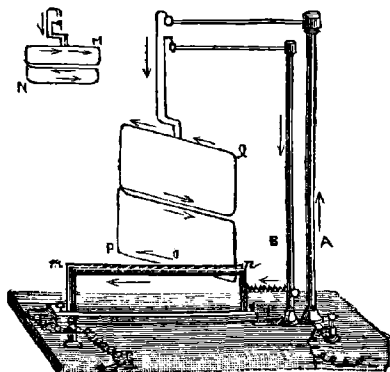


Fig. 97.

LOIS DES COURANTS ANGULAIRES.

Or, le circuit mobile étant disposé de façon que son plan forme un angle avec le multiplicateur, et que le courant du sommet de l'angle se

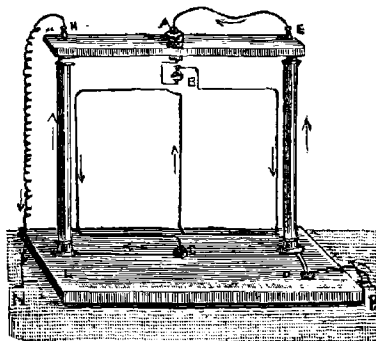


Fig. 98.

LOIS DES COURANTS PARALLÈLES.

4° *Deux courants rectilignes, dont les directions forment entre elles un angle quelconque, se repoussent si l'une se dirige vers le sommet de l'angle tandis que l'autre s'en éloigne.*

Pour démontrer ces deux lois, on se sert d'un appareil (fig. 97) composé d'un plateau sur lequel on place un petit châssis de bois *mn*, autour duquel s'enroule plusieurs fois un fil assez gros dans lequel passe le courant, de façon à multiplier son action sur le circuit mobile PQ qui est astatique. Le courant entre par le pied de la colonne A,

sépare dans les deux fils, on observe, au moment où passe le courant, que l'angle  $POm$  diminue, ce qui démontre l'attraction entre les deux courants. Au contraire, si, au circuit  $PQ$ , on substitue  $MN$ , et que l'on maintienne ensuite les deux courants contraires en relation avec le sommet de l'angle  $POm$ , on voit que cet angle augmente ; ce qui démontre la répulsion des deux courants.

5° *L'action d'un courant sinueux est la même que celle d'un courant rectiligne d'une longueur de projection égale, c'est-à-dire commençant et finissant aux mêmes extrémités.*

Pour démontrer cette loi, il suffit de disposer un courant mobile autour d'un axe vertical, près d'un rhéophore vertical formé d'une portion rectiligne que le courant parcourt, par exemple, en montant, et d'une partie sinueuse qui suit le courant en descendant. Le courant mobile reste insensible devant le courant fixe, parce que l'action de la partie sinueuse est rigoureusement égale et contraire à celle de la partie rectiligne.

#### ACTION DIRECTRICE DES COURANTS LES UNS SUR LES AUTRES. —

1° *Un courant défini mobile, qui s'approche d'un courant fixe indéfini, est sollicité à se mouvoir dans une direction parallèle et opposée à celle du courant fixe, et, si le courant mobile s'éloigne du courant fixe, il est sollicité à se mouvoir dans une direction parallèle, mais dans le même sens.*

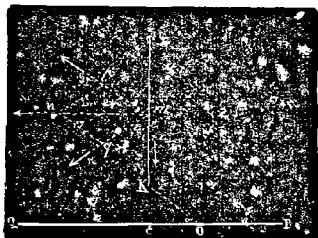


Fig. 98.

En conséquence des lois des courants angulaires, on peut facilement déterminer l'action du courant rectiligne  $PQ$  (*fig.* 98) fixe et indéfini, sur un autre courant mobile  $KH$ , perpendiculaire à sa direction. Soit alors  $OK$  la perpendiculaire commune à  $KH$  et à  $PQ$ , laquelle est nulle si les deux lignes  $PQ$  et  $KH$  se touchent. Le courant  $PQ$  se dirigeant de  $Q$  vers  $P$ , considérons le cas où  $KH$  s'approche de  $PQ$ . Suivant la loi des courants angulaires, la portion  $QO$  de  $PQ$  attire  $KH$ , en supposant que ces courants se dirigent tous deux vers le sommet de l'angle formé par leurs directions. La partie  $PO$  de  $PQ$  repousse au contraire  $KH$ , parce que ces deux courants sont en sens opposé par rapport au sommet de l'angle. Représentant par  $mp$ ,  $mq$  les deux forces, l'une attractive, l'autre répulsive, qui sollicitent le courant  $KH$ , forces évidemment d'intensité égale, puisque tout est symétrique des deux côtés du point  $O$ , ces deux forces se confondront en une seule  $mn$  (*Notions préliminaires*, page 64), qui tend à pousser

le courant KH parallèlement au courant PQ et dans un sens contraire. Dans le cas où le courant mobile s'éloigne, la démonstration est analogue, et, en généralisant, on énonce le principe ci-dessus.

De là s'ensuit que si l'on a un courant vertical mobile autour d'un axe parallèle à sa direction, un courant quelconque horizontal aura pour effet de faire tourner celui-ci jusqu'à ce que le plan de l'axe soit parallèle au courant horizontal, en maintenant le courant vertical en relation avec son axe, dans la direction d'où vient le courant horizontal ou dans celle où il se dirige, selon qu'il sera descendant ou ascendant, c'est-à-dire selon qu'il s'approchera ou s'éloignera du courant horizontal.

De là on déduit encore qu'un système de deux courants verticaux, tournant simultanément autour d'un axe vertical, est dirigé par un courant horizontal dans un plan parallèle à celui-ci, si ces courants sont l'un ascendant, l'autre descendant; mais qu'il ne reçoit aucune direction si les deux courants verticaux sont tous les deux ascendants ou descendants.

2° *Un courant rectangulaire ou circulaire, mobile autour d'un axe vertical et placé au-dessus ou au-dessous d'un courant fixe horizontal et indéfini, prend toujours une position d'équilibre stable dans un plan parallèle au courant fixe et dans un sens tel que la partie du courant mobile la plus rapprochée du courant fixe marche dans la même direction que lui.*

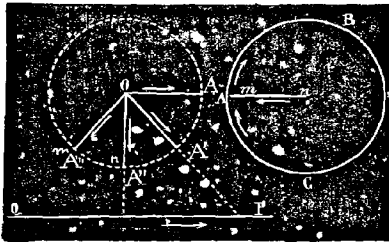


Fig. 100 et 101.

En effet, la portion QY (fig. 99) exercera son attraction non seulement sur la portion YD (*loi des courants angulaires*), mais encore sur la verticale AD (*loi des courants perpendiculaires*), et comme la même action se vérifie évidemment entre la portion PY et les portions CY et BC, il en résulte la démonstration de la loi.

**ROTATION DES COURANTS LES UNS PAR LES AUTRES.** — Les attractions et les répulsions qu'exercent mutuellement les uns sur les autres les courants angulaires peuvent se transformer facilement en mouvement circulaire continu. Soient un courant OA (fig. 100), mobile autour du point O

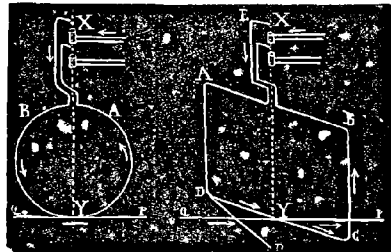


Fig. 99.

sur un plan horizontal, et PQ un autre courant indéfini également horizontal. Ces deux courants se dirigeant dans le sens des flèches, il est clair que, dans la position OA, le courant mobile est attiré par PQ. Arrivé en OA', il est attiré par la portion NQ et repoussé par PN. De même, dans la position OA'', il est attiré par MQ et repoussé par PM, et ainsi de suite; d'où résulte un mouvement de rotation dans le sens de A A' A'' A'''... Si, au lieu d'être dirigé de O en A, le courant l'avait été de A en O, il est facile de voir que la rotation aurait été effectuée en sens contraire. Si, les deux

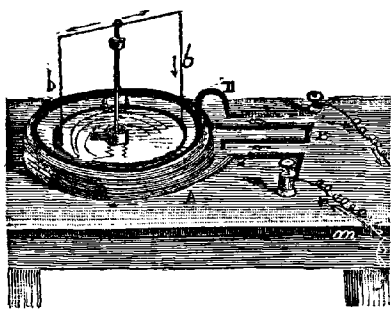


Fig. 102.

ROTATION D'UN COURANT VERTICAL  
PAR  
UN COURANT HORIZONTAL CIRCULAIRE.

courants étant horizontaux, le courant fixe est circulaire au lieu d'être rectiligne, son effet sera également de produire un mouvement continu de rotation. Soient deux courants placés dans un plan horizontal, l'un ABC (fig. 101) fixe et circulaire, l'autre *mn* rectiligne et mobile autour du centre *n*. Ces courants étant dirigés dans le sens des flèches, ils s'attirent en l'angle *nAC*, parce que tous deux se dirigent vers le sommet; en *nAB*, au contraire, ils se repoussent parce qu'alors un des courants se dirige vers le sommet et

se sépare de l'autre. Ces deux effets concourent pour faire tourner le fil *mn* d'une façon continue dans le sens ACB.

Un courant circulaire horizontal, qui agit sur un courant rectiligne vertical, lui communique un mouvement de rotation. Pour le démontrer, on se sert de l'appareil suivant (fig. 102), composé d'un vase circulaire de cuivre autour duquel s'enroule une lame A de même métal, recouverte de soie ou de laine et parcourue par un courant fixe; au centre s'élève une colonne de laiton *a*, terminée par une capsule pleine de mercure, dans laquelle plonge un pivot qui soutient un fil de cuivre *bb*, recourbé à ses extrémités en deux branches verticales, lesquelles se soudent à un anneau de cuivre très léger qui entre dans l'eau acidulée du vase. Lorsque le courant d'une pile entre par le fil *m*, il traverse la lame A, d'où, après de nombreux circuits autour du vase, il passe dans la lame B, et de là, par-dessous le vase, à la partie inférieure de la colonne *a*; continuant ensuite, il parcourt les fils *bb*, l'anneau de cuivre, l'eau acidulée et les parois du vase, jusqu'à ce qu'il retourne à la pile par la lame D. Le courant agissant ainsi, le circuit *bb* et l'anneau de cuivre se mettent à tourner en sens contraire du courant fixe, mouvement qui certainement dépend

de l'action du courant circulaire sur celui des branches verticales  $bb$ , comme cela se déduit facilement des lois des courants angulaires, en sachant que la branche  $b$  à droite est attirée en avant par la partie A du circuit fixe, et que la branche  $b$  à gauche l'est en sens contraire, par la partie opposée. Quant à l'action du courant circulaire sur la partie horizontale du circuit  $bb$ , elle concourt évidemment à la faire tourner dans le même sens; mais, à cause de la distance, elle peut être négligée.

Ces mêmes mouvements de rotation, que les courants produisent les uns sur les autres, sont aussi imprimés par eux sur les aimants, ainsi que Faraday l'a démontré le premier. Il se servait d'un appareil qui consiste en une large éprouvette de verre B (*fig. 103*), presque entièrement pleine de mercure, au milieu de laquelle on introduit un aimant de 0<sup>m</sup>,20 environ de largeur, ce qui élève de quelques millimètres la surface du liquide. Cet aimant  $ab$  est lesté à sa partie inférieure par un petit cylindre de platine  $p$ ; à son extrémité supérieure est ajustée une capsule de cuivre avec du mercure, à laquelle arrive le courant par une petite tige C. A mesure que le courant arrive par la colonne A, il passe dans l'aimant, de là dans le mercure, puis sort par la colonne D en imprimant à l'aimant un mouvement de rotation autour de son axe, avec une rapidité qui dépend de sa puissance magnétique et de l'intensité du courant.

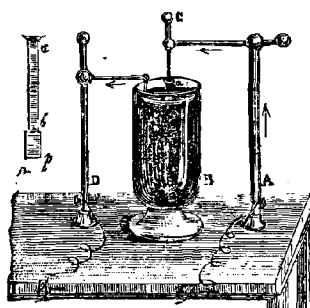


Fig. 103,

ROTATION DES AIMANTS  
PAR LES COURANTS.

L'action des courants sur les aimants est réciproque; Faraday l'a encore prouvé le premier par l'expérience suivante. Sur un support maintenu par des vis fixes se dresse une colonne de cuivre  $bD$  (*fig. 104*), isolée par un contact de morfil, et le long de laquelle, à une hauteur plus ou moins grande, s'élève un tube métallique formé d'un faisceau aimanté  $AB$ ; au haut de la colonne est une petite capsule de mercure, où plonge une pointe d'acier à laquelle est fixé un circuit  $EF$  de cuivre, dont chaque extrémité supporte une pointe d'acier  $pq$ , qui pénètre dans un vase circulaire contenant du mercure. L'appareil ainsi disposé, on fait passer un courant par la colonne  $b$ , qui va en D, bifurque dans les deux branches E, F, pénètre dans le mercure par les pointes d'acier  $pq$ , et se dirige par le plateau M, qui est en cuivre, à la colonne  $a$ , pour retourner à la pile. Si l'on relève alors le faisceau aimanté, le circuit mobile  $EF$  a un mouvement rapide de rotation, dans un sens ou dans un autre, selon qu'il est soumis à l'action du pôle austral ou du pôle boréal de l'aimant.

La rotation des aimants par les courants et des courants par les aimants est expliquée par la théorie du magnétisme d'Ampère, que nous donnerons ci-après. On peut remplacer l'aimant, dans l'expérience, par un *solénoïde* ou un *électro-aimant*; et alors les deux colonnes qui partent du pied de l'appareil sont disposées pour recevoir le courant qui doit parcourir le solénoïde ou l'électro-aimant.

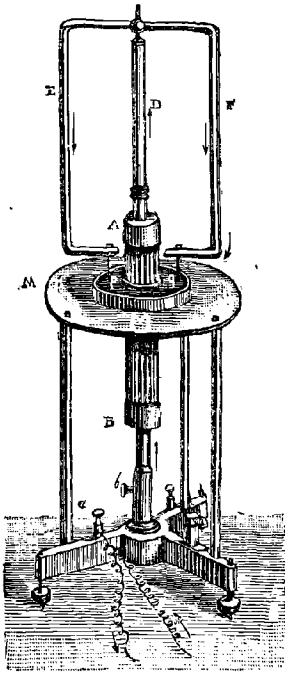


Fig. 104.

ROTATION DES COURANTS  
PAR LES AIMANTS.

dante à l'est, et d'un courant rectiligne allant du nord au sud; et comme, en ramenant le fil le long des spires on obtient un courant rectiligne allant du sud au nord, les actions se détruisent, et il ne reste plus que les actions des courants circulaires, c'est-à-dire celles d'un *solénoïde*.

1° Lorsqu'un fil rectiligne, traversé par un courant, est tendu horizontalement au-dessus ou au-dessous d'un solénoïde mobile, et parallèlement à sa longueur, on voit le solénoïde tourner sur lui-même et venir se placer dans un plan perpendiculaire au fil rectiligne, de manière que, dans la moitié supérieure ou inférieure de chacun des cercles ou des spires du solé-

**SOLÉNOÏDES.** — On donne le nom de *solénoïdes* (du grec *solè*, tuyau; et *eidos*, forme) à un appareil imaginé par Ampère, et se composant (fig. 105) d'un fil de cuivre couvert de soie, à travers lequel on fait passer un courant électrique; le fer est roulé en hélice ou spirale et ramené suivant l'axe de l'hélice, afin de neutraliser l'effet de l'obliquité de chaque tour de spirale. Dans un solénoïde, le courant arrive par l'un des bouts du fil, suit le contour hélicoïdal et revient en ligne droite le long de l'axe. Chaque spire équivaut à un cercle coupé en un point et dont les deux extrémités ont été légèrement écartées, de sorte que le courant produit le même effet que si, après avoir parcouru un cercle vertical, il avait suivi un fil horizontal joignant les deux extrémités de la spire. Le courant parcourant l'ensemble des spires est donc assimilable à la réunion d'une série de courants circulaires, ayant dans la position d'équilibre leur branche descen-

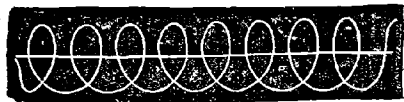
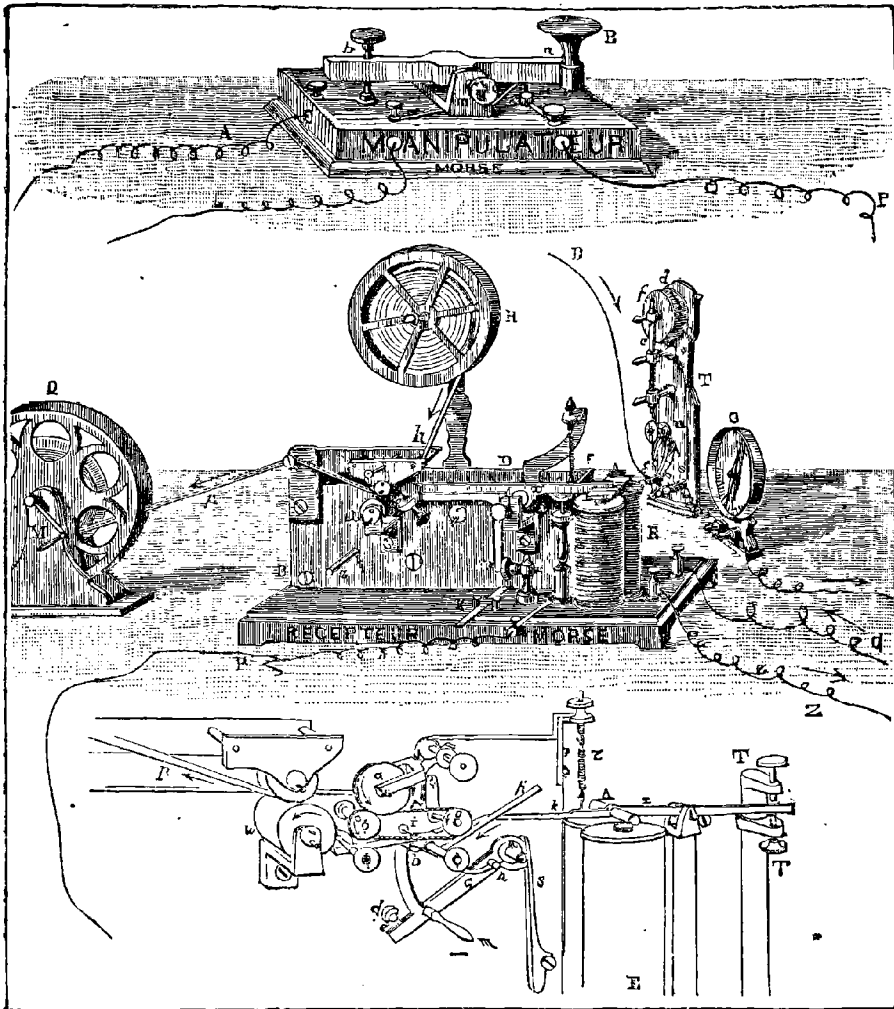


Fig. 105. — SOLÉNOÏDE.

noïde, le sens du courant soit le même que celui du courant fixe. Ce fait est la conséquence de l'action des courants rectilignes fixes sur les courants rectangulaires et circulaires.



Télégraphe Morse (page 308).

2° Si, au lieu de placer un courant horizontalement au-dessus ou au-dessous d'un solénoïde mobile, on approche de l'une de ses extrémités un courant vertical très puissant, on observe que cette extrémité de solénoïde est attirée ou repoussée, selon que le courant qui circule dans les

parties du solénoïde les plus rapprochées du courant vertical est de même sens que lui ou de sens contraire.

3° Si l'on suspend un solénoïde à l'appareil dont nous nous sommes servi (*fig. 97*) parcouru par un courant, et qu'on l'abandonne à l'action de la terre, il se place dans le méridien magnétique, comme le ferait un barreau aimanté; en effet, chaque spire agissant comme un courant circulaire se place perpendiculairement au méridien magnétique, et chaque courant étant dirigé de la même manière, le solénoïde lui-même suit la direction que prendrait l'aiguille aimantée. C'est pourquoi on nomme

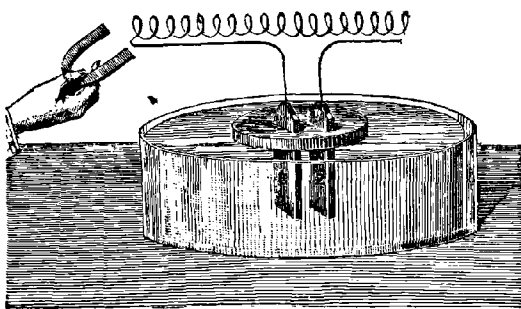


Fig. 108. — SOLÉNOÏDE MOBILE.

également *pôle austral* du solénoïde l'extrémité qui se dirige vers le nord, et *pôle boréal* celle qui se dirige vers le sud.

4° Entre les solénoïdes et les aimants, il se manifeste identiquement les mêmes phénomènes d'attraction et de répulsion qu'entre deux aimants; c'est-à-dire que les

pôles de même nom se repoussent et que les pôles de nom contraire s'attirent. De même, les actions mutuelles entre deux solénoïdes sont analogues à celles qui se manifestent entre deux aimants; il se produit aux extrémités les mêmes effets d'attraction et de répulsion. On démontre facilement ces lois par l'expérience suivante :

On soude les extrémités d'un solénoïde, respectivement à une lame de cuivre et à une lame de zinc, portées par une plaque de liège (*fig. 106*). Si l'on fait flotter cet appareil sur de l'eau acidulée, on aura un solénoïde mobile en activité. En effet, la pile est constituée par l'eau et les lames de cuivre et de zinc, et le courant va du cuivre au zinc en traversant toutes les spires du solénoïde. Si l'on approche alors de ce solénoïde mobile, soit un autre solénoïde, soit un aimant tenu à la main, on voit aussitôt les pôles de même nom se repousser, tandis que les pôles de nom contraire s'attirent.

**THÉORIE D'AMPÈRE.** — Se fondant sur cette analogie entre les solénoïdes et les aimants, l'illustre Ampère a imaginé une ingénieuse théorie au moyen de laquelle tous les phénomènes magnétiques rentrent dans le domaine de l'électro-dynamique. En calculant les actions exercées par un élément de courant sur un solénoïde, ou sur une suite de courants circulaires



dont les plans sont perpendiculaires à une ligne droite ou courbe, Ampère a été conduit à ce résultat, que toutes les actions se réduisent à deux forces dirigées suivant des perpendiculaires aux plans passant par les extrémités du solénoïde et par l'élément. Ces forces, en outre, sont en raison inverse du carré des distances qui séparent l'élément de courant et ces extrémités.

D'après cela, Ampère, au lieu de supposer que le magnétisme est dû à l'action de deux fluides particuliers, attribue les phénomènes auxquels il donne naissance à des courants électriques qui se meuvent autour des particules des corps; il suppose qu'autour de chaque molécule d'un corps magnétique existe un petit courant circulaire; ces petits courants ont des directions quelconques; ils sont faciles à déplacer dans le fer doux, où ils changent à chaque instant de situation; mais, dans l'acier, la force coercitive s'oppose à ces déplacements.

Ces courants existeraient donc dans tous les corps sensibles à l'action du magnétisme : dans les corps à l'état naturel, les courants électriques circuleraient dans tous les azimuts possibles autour des molécules, et l'effet de l'aimantation serait de donner à ces courants des directions tendant toutes à devenir parallèles, et dont les actions sur les courants extérieurs expliqueraient les attractions et les répulsions. Ampère ajoute même dans un mémoire :

« Parmi les différentes manières dont on peut se représenter la disposition des courants électriques circulaires autour des particules des métaux susceptibles d'aimantation, soit avant de l'acquérir, soit après avoir été aimantés, une des plus simples consiste à considérer chaque particule comme une petite pile de Volta, dont les courants, entrant par une extrémité et sortant par l'extrémité opposée, reviennent à travers l'espace environnant. »

Dans l'hypothèse d'Ampère, un aimant ne serait donc pas un seul solénoïde, mais une réunion de solénoïdes parallèles, dans lesquels les actions mutuelles des courants circulaires pourraient modifier la disposition de leur plan, de façon que leur parallélisme ne soit pas complet; il résulterait de là que les centres d'action ne seraient pas situés aux extrémités, mais à peu de distance.

La théorie des deux fluides magnétiques (*Magnétisme*, page 149), brillamment soutenue par Poisson, était simple et expliquait les faits connus antérieurement à l'électro-magnétisme; mais la découverte d'Ørsted ayant ouvert un nouveau champ aux physiciens, la théorie d'Ampère, quoique plus compliquée, a ramené tout à l'action d'un même agent et a conduit ce

physicien à la théorie de l'action des courants les uns sur les autres. Jusqu'à présent, cette dernière est celle qui comprend le plus grand nombre de faits et à laquelle on doit s'arrêter. Du reste, les phénomènes d'*induction*, dont nous parlerons ci-après, viennent donner de nouvelles preuves à l'appui de l'hypothèse d'Ampère (1).

**ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS.** — Dans toutes les expériences magnétiques anciennes, on avait considéré la terre comme se comportant ainsi que le ferait un gros aimant. On devait donc croire qu'elle agirait aussi à la manière des aimants sur des courants électriques. Mais l'expérience d'Ørsted ne justifiait pas cette croyance. C'était une lacune qu'Ampère vint combler.

« Pendant plusieurs semaines, raconte Arago, les physiciens nationaux et étrangers purent se rendre en foule dans un humble cabinet de la rue des Fossés-Saint-Victor, et y voir avec étonnement un fil conjonctif de platine qui s'orientait par l'action du globe terrestre. Qu'eussent dit Newton, Halley, Dufay, Æpinus, Franklin, Coulomb, si quelqu'un leur eût annoncé qu'un jour viendrait où, à défaut d'aiguille aimantée, des navigateurs pourraient se diriger en observant des courants électriques, des fils électrisés ? L'action de la terre sur un fil conjonctif est identique, dans toutes les circonstances qu'elle présente, avec celle qui émanerait d'un faisceau de courants ayant son siège dans le sein de la terre, au sud de l'Europe, et dont le mouvement s'opérerait, comme la révolution diurne du globe, de l'ouest à l'est. »

Ainsi, d'après la belle découverte d'Ampère, le globe terrestre est, non plus un aimant, mais une vaste pile voltaïque, donnant lieu à des courants dirigés dans le même sens que le mouvement diurne. « Grâce à ce coup d'éclat d'un génie, s'écrie le savant M. Quet (2), le mystère du magnétisme est dévoilé, et un nouveau fait primitif a surgi de la science. »

Les actions exercées par la terre sur les courants se démontrent expérimentalement. La première de ces actions, celle qui a pour effet de donner une direction aux courants, peut se formuler ainsi :

*1° Tout courant vertical mobile autour d'un axe qui lui est parallèle tend à se placer, sous l'influence de l'action directrice de la terre, en un plan perpendiculaire au méridien magnétique, et, après quelques oscilla-*

(1) BECQUEREL, *Traité d'électricité et de magnétisme*.

(2) QUET (Jean-Antoine), physicien français, né à Nîmes en 1810, inspecteur général de l'enseignement secondaire, membre de l'Institut.

tions, il se maintient à l'est de l'axe de rotation, quand il est descendant, et à l'ouest quand il est ascendant.

2° Tout courant horizontal mobile autour d'un axe vertical, soumis à l'influence de l'action de la terre, accomplit un mouvement de rotation continu de l'est à l'ouest, en passant par le nord si le courant horizontal s'éloigne de l'axe de rotation, et de l'ouest à l'est quand il se dirige vers lui.

3° Tout courant fermé et mobile autour d'un axe vertical, soumis à l'influence de l'action de la terre, se place dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, de telle sorte que, s'il est descendant, il se dirige à l'est de son axe de rotation pour un observateur qui regarde le nord, et à l'ouest s'il est montant.

**AIMANTATION PAR LES COURANTS.** — Arago constata le premier que les courants pouvaient produire l'aimantation; mais ce fut Ampère qui précisa nettement les conditions de succès dans cette opération et la nature des pôles obtenus. Il se servit pour cela d'un appareil appelé *héllice magnétisante*, composée d'un fil revêtu d'une matière isolante et contourné sur un tube de verre dans lequel on place l'aiguille à aimanter. Le courant passe dans l'héllice, agit sur les courants des particules et les amène à être parallèles à lui-même, c'est-à-dire parallèles entre eux et de même sens. On voit donc qu'un aimant doit se produire, cet aimant est durable si le corps possède une force coercitive. Les hélices employées (fig. 107) sont dites : *dextrorsum* (a), si le fil est enroulé de gauche à droite, et alors le pôle austral se trouve à l'extrémité par laquelle le courant sort; *sinistrorsum* (b), si l'enroulement a lieu de droite à gauche, et le pôle austral se trouve à l'extrémité par laquelle le courant entre. Si on enroule le fil dans un sens et dans l'autre (c), l'aiguille aura autant de *points conséquents* qu'il y a de sens dans l'involution.

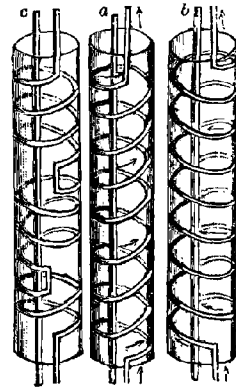


Fig. 107. — HÉLICES  
MAGNÉTISANTES.

**ÉLECTRO-AIMANTS.** — C'est encore à Arago que l'on doit, en 1820, la première observation de l'action d'un courant sur le fer doux; l'aimantation se produit, mais persiste seulement pendant le passage du courant. Dès que le courant passe, le fer est aimanté; aussitôt que le circuit est interrompu, le fer revient à l'état naturel. Il suffit pour cela que le métal soit très pur; la fonte et l'acier, plus difficiles à aimanter, conservent toujours des traces de magnétisme. Ce fait fut immédiatement appliqué à des usages pratiques, et l'on construisit des *électro-aimants*.

Pour obtenir un puissant électro-aimant, il suffit d'enrouler autour d'un barreau de fer doux, et toujours dans le même sens, un fil de métal recouvert de soie ou de coton et dans lequel on fait passer un courant électrique : le fil agit comme une hélice, et le fer s'aimante en présentant des

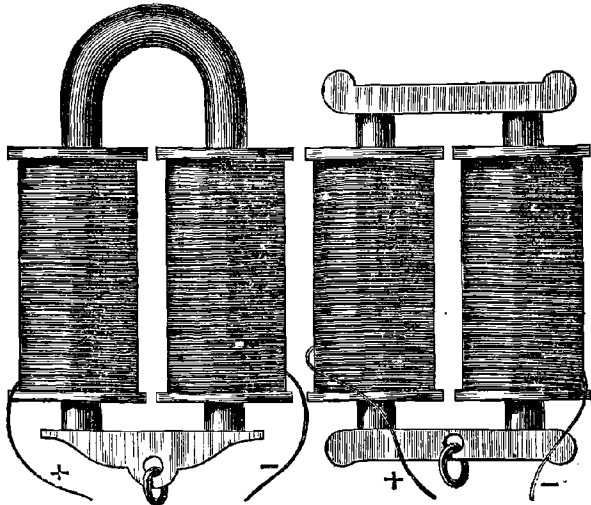


Fig. 108. — ÉLECTRO-AIMANTS.

pôles contraires aux deux extrémités. Si l'on prend, au lieu d'une barre de fer droite, une barre de fer recourbée en fer à cheval et qu'on enroule le fil en sens inverse autour des deux branches, on a un aimant, d'autant plus commode pour montrer les effets de l'électricité que les deux pôles sont plus rapprochés l'un de l'autre. La figure 108 représente deux électro-aimants en fer à cheval : l'un formé avec une barre de fer courbé, l'autre avec deux électro-aimants rectilignes, mais qui sont fixés solidement à une traverse de fer doux. Ceux de cette seconde forme offrent plus de facilité et de régularité de travail. La puissance d'un électro-aimant dépend : 1° de l'intensité du courant qui le traverse; 2° du nombre des tours qui l'enroulent; 3° des dimensions et des qualités du fer. Toutefois, il y a une limite après laquelle le nombre des tours de fil n'influe plus sur l'aimantation.

D'ailleurs, malgré les travaux de Lentz, de Jacobi, de Nickler, etc., on n'est pas encore bien fixé sur les rapports de ces diverses influences sur l'aimant.

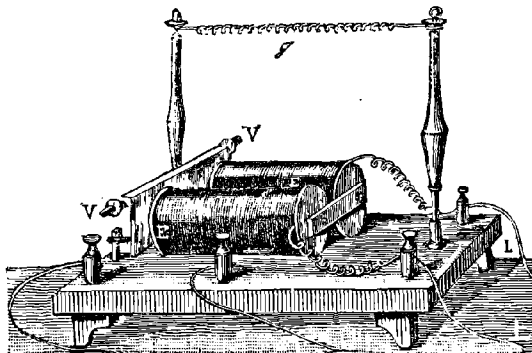


Fig. 109. — ÉLECTRO-AIMANTS DES TÉLÉGRAPHES.

Nous consacrons le chapitre suivant à quelques-unes des nombreuses applications des électro-aimants, et particulièrement aux télégraphes.

**MAGNÉTISME RÉMANENT.** — Poggendorff a donné le nom de *magnétisme rémanent* à une faible aimantation que conserve l'électro-aimant quand cesse le passage du courant; quelque faible qu'elle soit, elle peut être assez forte pour maintenir au contact les armatures. Cet effet produit peut être fâcheux, quoiqu'il suffise de détacher l'armature maintenue par le magnétisme rémanent pour que celui-ci disparaisse presque complètement. C'est pour obvier à cet inconvénient que l'on se sert, dans les télégraphes, d'électro-aimants munis d'un *ressort antagoniste*. Devant l'électro-aimant EE (fig. 109) et à une petite distance se trouve une plaque A de fer bien pur, légère et très mobile autour de l'axe VV': c'est l'armature; *g* est un *ressort antagoniste* qui s'oppose faiblement à son mouvement et tend toujours à la ramener dans sa position normale. Quand le courant passe, venant de LL', la plaque de fer est attirée et vient se coller sur le fer à cheval; quand le courant ne passe plus, la tige revient, sous l'action du ressort, à sa première position.

**MOUVEMENTS VIBRATOIRES ET SONORES PRODUITS PAR LES COURANTS.** — Lorsqu'on aimante une tige de fer doux par le passage d'un fort courant électrique, et qu'on la désaimante ensuite rapidement par la suppression du courant, cette tige produit un son. Ce son est dû à un allongement et à un raccourcissement du métal sous l'influence de l'électricité, mouvements qui produisent des vibrations engendrant un son plus ou moins aigu. Nous avons vu (*Acoustique*, page 778) que les sons ne sont perceptibles par notre oreille que lorsque le nombre des vibrations surpasse 32 vibrations par seconde; si donc l'on établit et l'on interrompt plus de seize fois en une seconde les courants qui parcourent un électro-aimant, les vibrations sonores transmises à l'atmosphère engendrent des sons auxquels on a donné le nom de *musique galvanique*.

Ce fut en 1838, que deux physiciens américains, MM. Henry (1) et

(1) HENRY (Joseph), physicien américain dont le nom est populaire aux États-Unis (1797-1878). Pauvre, n'ayant reçu qu'une instruction primaire, il devint successivement, à force de travail, professeur à l'université d'Albany, professeur de philosophie naturelle à *Princeton-College*, président de l'Association nationale pour l'encouragement des sciences, président de l'Académie, etc. Il produisit le premier appareil magnéto-électrique, et eut une grande part dans la découverte du télégraphe Morse. Il a publié un livre intéressant sur l'*Électricité et le magnétisme*.

Page, découvrirent ces curieux phénomènes, en même temps que M. Delezenne les constatait en France. Wertheim construisit sur ce principe une sorte de harpe éolienne. De La Rive augmenta l'intensité des sons qu'avaient su produire ses prédécesseurs en employant de longs fils métalliques qui étaient soumis à une certaine tension et qui traversaient l'axe de bobines d'induction entourées d'un fil métallique isolé.

Voici cette expérience, qui plus tard reçut une application importante dans l'invention du *téléphone*. On opère à l'aide d'un courant électrique discontinu qui permet aux vibrations moléculaires du fer de se répéter à des intervalles égaux, en fixant la tige en fer à une table d'harmonie, ou bien en employant un diapason monté sur une table d'harmonie,

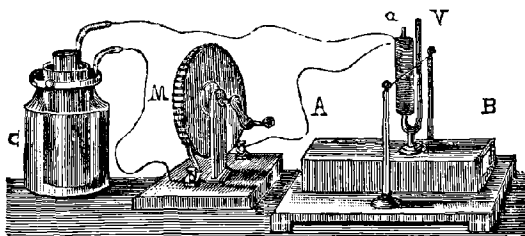


Fig. 110. — EXPÉRIENCE DE M. DE LA RIVE.

au lieu d'agir à l'aide d'une tige en fer. On peut disposer l'expérience en plaçant autour d'une des branches du diapason une hélice qui ne le touche pas (*fig. 110*). On interpose alors dans le circuit voltaïque un interrupteur à main M, composé d'un disque

en verre dont la circonférence est formée de parties alternativement conductrices et non conductrices, et d'un fil conducteur qui touche continuellement la circonférence, et l'on entend alors un son continu et assez fort.

Si l'on mesure la hauteur du son produit dans une barre de fer placée au milieu d'une hélice parcourue par des courants discontinus, on trouve que ce son est dû à des vibrations longitudinales semblables à celles que le frottement ferait naître.

Quand on transmet directement des courants électriques au travers des tiges de fer ou des fils de ce métal, on remarque également une production de son; ainsi, lors du passage de l'électricité dans le fer, comme dans le cas où l'électricité circule autour de ce métal et l'aimante, les vibrations sonores peuvent se produire. Il faut, pour que le son soit bien pur, que le fil ait une tension suffisante; au delà d'une certaine limite, l'aptitude des fils de fer doux à rendre les sons diminue.

Les changements moléculaires qui ont lieu dans le fer aimanté ont été rendus sensibles par les expériences de M. Grove, qui montrent qu'une armature en fer doux éprouve une élévation de température de

## TÉLÉGRAPHE DE MORSE

LETTRES					
a	— — — — —	i	— —	r	— — — — —
d	— — — — —	j	— — — — —	s	— — — — —
b	— — — — —	k	— — — — —	t	— — — — —
c	— — — — —	l	— — — — —	u	— — — — —
d	— — — — —	m	— — — — —	v	— — — — —
e	—	n	— — — — —	w	— — — — —
é	— — — — —	o	— — — — —	x	— — — — —
f	— — — — —	ó	— — — — —	y	— — — — —
g	— — — — —	p	— — — — —	z	— — — — —
h	— — — — —	q	— — — — —	ch	— — — — —

PONCTUATION	
Point	— — — — —
Point-virgule	— — — — —
Virgule	— — — — —
Deux points	— — — — —
Point d'interrogation	— — — — —
Alinéa	— — — — —
Point d'exclamation	— — — — —
Apostrophe	— — — — —
Trait d'union	— — — — —
Barre de division (°/°)	— — — — —
Parenthèse	— — — — —
Souligné	— — — — —

CHIFFRES					
1	— — — — —	4	— — — — —	7	— — — — —
2	— — — — —	5	— — — — —	8	— — — — —
3	— — — — —	6	— — — — —	9	— — — — —

Le zéro a deux signes — — — — — ou — — — — —

SIGNAUX DE SERVICE	
Signal préliminaire d'attaque	— — — — —
Indiquer un collationnement	— — — — —
Bien compris	— — — — —
Répétez	— — — — —
Erreur ou pas compris	— — — — —
Attente	— — — — —
Parlez	— — — — —
Finale d'une transmission	— — — — —

Tableau des signaux employés dans le télégraphe de Morse (page 308).

plusieurs degrés quand on l'aimante et qu'on la désaimante successivement à l'aide d'un aimant extérieur. Les métaux autres que le fer, le nickel et le cobalt, ne donnent lieu à aucun changement moléculaire de cette nature, ni à aucun son appréciable.

## CHAPITRE V

## APPLICATIONS DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

**TÉLÉGRAPHIE. — HISTORIQUE.** — Le nom de *télégraphe* est formé du grec *télé*, de loin, et *grapho*, j'écris. C'est un appareil au moyen duquel on transmet à de grandes distances des nouvelles, des avis ou des ordres, à l'aide de signaux correspondant à des lettres de l'alphabet, à des mots ou à des chiffres. Dès la plus haute antiquité, les hommes, si avides de communications avec leurs semblables, ont cherché à diminuer les distances et ont imaginé une sorte d'écriture aérienne. Les pyramides d'Égypte, la tour de Babel étaient, suivant quelques auteurs, des postes télégraphiques. Clytemnestre, dit le poète, apprit le triomphe des Grecs et la prise de Troie, par des feux allumés sur le mont Ida, et répétés de montagne en montagne. Pendant l'expédition de Xerxès, une ligne de sentinelles établie d'Athènes à Suse, apportait en quarante-huit heures au monarque des messages de son empire. Polybe fait mention d'un certain Cléoxène, qui avait inventé une méthode par laquelle, au moyen de bâtons plus ou moins élevés, disposés de certaines façons et donnant les lettres de l'alphabet, on pouvait transmettre les nouvelles. César nous apprend que les Gaulois savaient se servir de signaux de feu pour communiquer entre eux, et lui-même dut une grande partie de ses succès à la rapidité de ses opérations, obtenue par des moyens analogues. Au moyen âge, divers signaux étaient également employés ; mais aucun ne permettait des communications étendues et claires. Amontons, le premier parmi les modernes, profitant des essais des anciens et des découvertes plus récentes, imagina un nouveau mode de communications télégraphiques : il proposait d'employer les lunettes d'approche pour apercevoir de loin les signaux, et diminuer le nombre des postes nécessaires. En même temps, il substituait les chiffres aux caractères alphabétiques, ce qui permettait de simplifier de beaucoup la quantité des signes. Mais sa découverte ne fut considérée que comme un jeu ingénieux, et ne fut pas appliquée.



Un siècle plus tard, après de longs essais infructueux, Chappe (1) imagina son télégraphe aérien, qu'il proposa à la Convention nationale, le 1<sup>er</sup> avril 1793. Cette assemblée ordonna qu'on en fit immédiatement l'essai. Le 24 juillet de la même année, elle adopta le système avec acclamation et enthousiasme, et décréta l'établissement immédiat d'une ligne télégraphique entre Paris et Valenciennes. Cette ligne fut inaugurée le 30 novembre 1794, par l'annonce d'une victoire, la prise de Condé sur les Autrichiens (*fig.* à la page 305); la Convention, en séance, répondit immédiatement : *L'armée du Nord a bien mérité de la patrie!* Cinq grandes lignes furent aussitôt établies autour de Paris; celle de Calais avec 27 postes; de Lille avec 22; de Strasbourg avec 46; de Brest avec 80. Ce télégraphe, qui a rendu de grands services, se composait d'un long châssis, garni de lames à la manière des persiennes, tournant autour d'un axe et fixé sur un mât qui lui-même roule sur un pivot, et est maintenu à la hauteur de 10 pieds par des jambes de force, de manière à rendre visibles tous les mouvements de la machine. Aux deux extrémités du châssis sont deux ailes mouvantes, moitié moins longues, et dont le développement s'effectue en divers sens. On a cent signaux parfaitement prononcés, qui représentent des figures ou lettres dont la valeur est déterminée. La manœuvre de ce télégraphe se faisait sans peine et avec célérité; c'est à l'aide de bons télescopes et de pendules à secondes que se faisaient les observations et que se communiquaient les avis d'une extrémité à l'autre, souvent sans que les observateurs intermédiaires pussent pénétrer le sens de la missive. On recevait des nouvelles de Calais en 3 minutes, de Lille en 2 minutes, de Strasbourg en 6 minutes, de Toulon en 20 minutes, de Brest en 8 minutes. Malheureusement, il était nécessaire qu'il fit jour; il fallait que le ciel fût pur, et bien souvent, dans certaines saisons, le directeur d'un télégraphe qui, la lorgnette à la main, traduisait la dépêche, la laissait inachevée en la terminant par cette phrase mélancolique : *interrompue par le brouillard!* De plus, le gouvernement réservait le télégraphe à son propre usage, et le public ne pouvait s'en servir.

La pensée d'appliquer l'électricité à une correspondance télégraphique naquit dans les esprits dès que l'on eut connaissance des phénomènes électriques. Un anonyme de Renfrew décrit un système de son invention, dans une lettre datée du 1<sup>er</sup> février 1753, et publiée dans un journal anglais;

(1) CHAPPE (Claude), neveu de l'abbé Jean CHAPPE D'AUTEROCHE, astronome, membre de l'Académie des sciences (1722-1769), était lui-même fils d'un astronome, abbé et physicien distingué (1763-1805). Il avait été nommé ingénieur de la télégraphie en France, et ce titre se transmit d'abord à ses frères, qui l'avaient aidé dans ses recherches, puis dans sa famille, jusqu'à ce qu'un des gouvernements suivants vint le retirer.

en 1760, Lesage de Genève en exécuta un, composé d'autant de fils qu'il y a de lettres ; chaque fil aboutissait à une tige portant un électroscope à balle de sureau, qui était repoussé dès que l'on touchait l'autre bout du fil avec un bâton de cire électrisée. Lhomond en 1787, Bettancourt en 1787, Reiser en 1794, Salva en 1796 en proposèrent également, tous fondés sur les propriétés de l'électricité statique, et conséquemment impraticables. En 1811, Sœmmering, de Munich, utilisant la pile de Volta, décrivait un télégraphe fondé sur la décomposition de l'eau que l'on produisait, à distance, dans différents vases représentant les lettres de l'alphabet et les dix chiffres. Mais ce procédé présentait beaucoup de difficultés dans la pratique, tant par la complication qui résultait de l'emploi de plus de trente fils conducteurs que par l'incertitude de la réaction chimique ainsi provoquée à une grande distance. Pour réussir, il fallait pouvoir substituer à toute action chimique un véritable effet mécanique.

Dès qu'Ørstedt, puis Ampère, eurent découvert les lois de l'électromagnétisme, les physiciens voulurent appliquer ces découvertes à la télégraphie. Ampère indique ainsi une sorte de télégraphe électro-magnétique :

« Autant d'aiguilles aimantées que de lettres de l'alphabet qui seraient mises en mouvement par des conducteurs, qu'on ferait communiquer successivement avec la pile, à l'aide de touches de clavier qu'on baisserait à volonté, pourraient donner lieu à une correspondance télégraphique, qui franchirait toutes les distances et serait aussi prompte que l'écriture et la parole pour transmettre la pensée. »

Sweigger, ayant remarqué que la déviation de l'aiguille aimantée augmentait avec le nombre des tours du fil conducteur auquel était soumise cette aiguille, fonda sur ce fait un nouveau système de télégraphe électrique ; Schilling et Alexander tentèrent de le construire industriellement en Russie ; mais leurs appareils étaient forcément composés d'un trop grand nombre de fils électriques, et il était presque impossible de les faire fonctionner d'une façon régulière.

Ce fut en 1832 que Morse (1), retournant de France en Amérique

(1) MORSE (Samuel Finley Breese), inventeur américain (1791-1872), était peintre de portraits ; il vint en Angleterre pour y pratiquer son art ; mais il l'abandonna bientôt pour se livrer à des travaux mécaniques. Ce fut en 1832 qu'il commença à s'occuper de télégraphie. En 1858, une commission internationale, siégeant au ministère des affaires étrangères, à Paris, admit le principe d'une rémunération collective en faveur de M. Morse. Dans une seconde séance, qui a eu lieu le 23 août, les représentants des puissances qui avaient pris part à la première réunion, au mois de mai, s'étant trouvés unanimes sur le caractère équitable d'une telle mesure, ils ont décerné collectivement à M. le docteur Morse une somme de 400,000 francs, à titre de gratification honorifique et comme récompense toute personnelle de ses utiles travaux.

sur le navire le *Sully*, imagina, dit-on, définitivement la télégraphie électrique; mais ce ne fut qu'en 1838 que son invention fut publiée, et au mois de mai 1844 que fut inaugurée, aux États-Unis, entre Washington et Baltimore, la première ligne télégraphique, qui, par son premier télégramme, annonça l'élection de James Polk à la présidence. Déjà, en 1837, à Munich, M. Steinhell avait établi, sur une longueur de 5 kilomètres, un télégraphe qui n'avait réussi qu'à moitié; et, en Angleterre, en 1838, sur le chemin de Londres à Birmingham, M. Wheatstone avait imaginé un télégraphe particulier, dit télégraphie à cadran, peu employé depuis à cause de la complication de son mécanisme. Depuis ce temps, le nombre des inventeurs en télégraphe est incalculable; il y eut plus de cinquante systèmes proposés, et encore il ne faut pas comprendre dans ce nombre les perfectionnements de ces systèmes. La France n'a suivi que bien lentement, et bien après l'Angleterre, l'exemple qui lui était donné; tandis qu'au delà de l'Océan, les fils électriques traversaient hardiment les forêts et les savanes immenses, de timides essais étaient faits dans notre patrie, le long des chemins de fer; et ce n'est qu'en 1859 qu'on a démolì, à Paris, les trois derniers appareils qui restaient de la télégraphie aérienne, sur les deux tours de l'église Saint-Sulpice et de Saint-Eustache, et encore cette démolition, cette suppression de la télégraphie aérienne, fut-elle accompagnée de vifs regrets.

« C'est une grande faute, disait M. l'abbé Moigno, dans son *Traité de télégraphie*, que de supprimer entièrement la grande œuvre de Chappe, pour établir partout et exclusivement la télégraphie électrique. Que l'on aie à soutenir une nouvelle guerre civile ou une invasion quelconque avec la seule télégraphie électrique; que l'on aie à suivre les opérations d'une grande armée, soit qu'elle avance ou qu'elle recule! Avec la télégraphie aérienne, de jour et de nuit, on suivra les dépêches de clocher en clocher, de poste en poste; les communications avec les foyers d'insurrection et le théâtre de la guerre ne seront pas interrompues; mais que peut-on attendre des fils électriques dans de pareilles circonstances? Des ivrognes, des vagabonds, des réfractaires, des banqueroutiers frauduleux, des criminels de toute nature, les hommes qu'une préoccupation politique agite, sont autant d'agents de destruction auxquels ne saurait résister la télégraphie électrique. »

« Un seul homme, disait un autre écrivain, en un seul jour, sans qu'on puisse l'en empêcher, pourra couper tous les fils télégraphiques aboutissant à Paris, et, en vingt-quatre heures, couper sur dix points tous les fils d'une même ligne, sans être arrêté, sans même avoir été aperçu par des gardiens, qu'une distance de plusieurs kilomètres sépare. La télégraphie aérienne, au contraire, a ses tours, ses tourelles, ses cabanes au moins, munies d'une muraille et d'une porte

gardée à l'intérieur par un homme vigoureux, armé de deux fusils de munition, etc., etc.

Sur six cents insurgés, la moitié acceptera avec une joie secrète la mission d'aller couper les fils du télégraphe électrique, tandis que l'attaque froide, triste et obscure d'une simple porte en chêne, derrière laquelle se trouvent un ou deux hommes dont l'assassinat doit entrer dans la prévision des assaillants, inspirera toujours un tel effroi, que, sur ces mêmes six cents hommes, il ne s'en trouvera pas deux qui veuillent exécuter une pareille entreprise. »

**THÉORIE DES TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.** — La théorie générale des *télégraphes électriques* repose sur la propriété des *electro-aimants* d'acquérir et de perdre instantanément leur aimantation aussitôt qu'ils sont soumis à l'influence d'un courant ou qu'ils cessent de l'être. Veut-on, par exemple, établir une télégraphie électrique entre Paris et Versailles : plaçons à Paris une pile en action ; étendons jusqu'à Versailles le fil conducteur de la pile où il sera enroulé autour d'une lame de fer doux. Le fluide électrique circulant autour de cette lame l'aimante aussitôt ; et si l'on place au-devant d'elle un disque de fer, ce disque sera attiré et viendra se coller contre l'aimant. Si l'on interrompt le courant électrique en supprimant la communication du fil conducteur avec la pile, la lame de fer cessera immédiatement d'être aimantée et reviendra à son état naturel. Pour se porter vers l'aimant, la pièce de fer a-t-elle eu à vaincre un petit *ressort antagoniste*. ce ressort ramènera la pièce de fer à sa position primitive, dès que le courant sera interrompu ; et chaque fois que l'on établira ou que l'on interrompra le courant, la pièce de fer sera portée en avant, puis repoussée en arrière. On peut donc, par l'influence d'un courant électrique sur le fer, exercer à travers l'espace un effet d'attraction et de répulsion, et à travers toutes les distances mettre un levier en mouvement.

Un système quelconque de télégraphie électrique se compose donc de quatre parties principales : 1° une *pile*, 2° un *conducteur*, 3° un *manipulateur*, 4° un *récepteur*.

On sait que la *pile* est l'instrument destiné à produire le courant électrique.

Le *conducteur* consiste en un fil de fer galvanisé, soutenu, pour la télégraphie aérienne, par des poteaux en bois qui sont plantés de distance en distance de 50 mètres chacun. A quelques mètres au-dessus du sol, sont fixés sur ces poteaux des supports isolants en porcelaine ou en terre cuite, ayant généralement la forme d'anneaux, et dans lesquelles passent les fils. Les conducteurs placés sous terre ou au sein des mers doivent être

recouverts d'une couche isolante de gutta-percha. Le *manipulateur* est l'appareil à l'aide duquel on règle l'emploi du courant électrique en ouvrant ou en fermant le circuit à volonté, pour produire à l'autre extrémité de la ligne le mouvement de va-et-vient nécessaire à la transmission des signaux. Le *récepteur* renferme l'électro-aimant et son levier, ainsi que le mécanisme destiné à la formation des signaux; c'est l'appareil qui reçoit la dépêche transmise et sur lequel on lit chaque signal envoyé.

Il va sans dire que chaque poste est double, et contient une pile, un manipulateur et un récepteur pour permettre l'échange des dépêches entre deux stations.

*Remarque.* — Nous disions que le fil conducteur va rejoindre l'électro-aimant : on pourrait supposer la nécessité d'un second fil retournant à la pile afin de former un circuit complet. Mais l'expérience a démontré que le fil de retour est inutile, et qu'il suffit pour établir le courant de faire communiquer avec le sol, d'un côté, le pôle négatif de la pile, et de l'autre, l'extrémité du fil après son passage à travers l'électro-aimant. Pour mieux assurer la communication avec le sol, on termine donc les fils par deux plaques métalliques que l'on enfonce dans la terre humide, ou mieux encore dans un puits.

Ces principes posés, il nous suffira de présenter au lecteur l'ensemble de quelques-uns des différents systèmes adoptés aujourd'hui, en essayant d'en faire comprendre seulement les principes essentiels. Nous renvoyons aux traités spéciaux pour le détail des mécanismes qui ne sauraient intéresser que des gens du métier.

**TÉLÉGRAPHE BRÉGUET.** — Le télégraphe Bréguet, *télégraphe à cadran*, est en usage dans toutes les compagnies de chemin de fer ; il sert aussi à relier entre eux les chefs-lieux de canton. Son apprentissage est facile, c'est ce qui a généralisé son emploi (*fig. 111*).

Le *récepteur*, dans ce système, se compose d'un cadran portant 26 divisions qui sont les lettres de l'alphabet et un signe final. Une aiguille se déplace devant ces divisions et s'arrête aux lettres convenables : le travail de l'employé consiste à noter successivement chaque lettre pour en former les mots ; la fin des mots est marquée par le signe final. L'armature A est formée par une plaque double, animée d'un mouvement de va-et-vient par les actions successives de l'électro-aimant et du ressort antagoniste. Par l'intermédiaire d'une tige *l* et d'un levier coudé *c*, ce mouvement alternatif est transmis à une tige *i*, qui se meut devant une roue dentée, et remplit le même office que l'*ancree d'échappement* des pendules ordinaires. La roue

dentée est sollicitée par un mouvement d'horlogerie, renfermé entre deux plaques : elle tournerait d'un mouvement continu si la tige  $i$  ne l'arrêtait en heurtant les dents. Avec cet arrêt elle ne peut se mouvoir que si la tige se déplace sous l'action de l'électro-aimant. La roue dentée est double : elle est formée de deux roues accouplées, égales, solidaires, et placées de telle sorte que les dents de l'une correspondent aux vides de l'autre. Quand la tige  $i$  se déplace, elle dégage une dent de la première roue ; et le couple se met à tourner ; mais la seconde roue vient aussitôt rencontrer

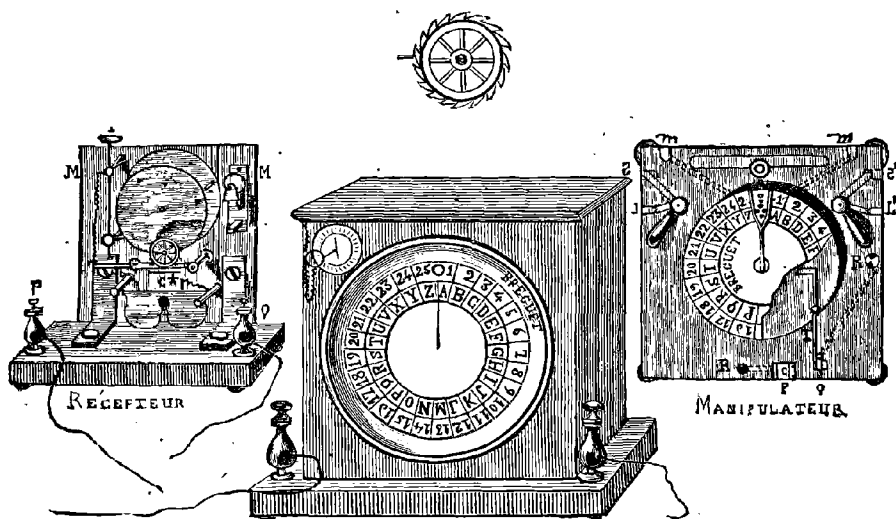


Fig. 111. — TÉLÉGRAPHE A CADRAN.

la tige  $i$ , et le mouvement s'arrête. A un nouveau déplacement de la tige, le couple de roues marchera de la moitié d'une dent et ainsi de suite. L'aiguille du cadran est portée par ces deux roues et se déplace avec elles ; elle parcourt une lettre quand la tige se déplace une seule fois ; il faut donc 26 déplacements de la tige pour un tour complet.

Le *manipulateur* proprement dit, comprenant les ressorts  $r$  et  $r'$ , les languettes métalliques  $LL'$ ,  $mm'$ ,  $CD$ , se trouve sur un socle en bois ; l'appareil est réuni par  $OL$  avec le fil de la ligne se rendant à la station de droite. C'est sur les lames  $S$  et  $S'$  que reposent les ressorts  $r$  et  $r'$  quand l'appareil ne fonctionne pas. Ces lames communiquent par des fils avec la sonnerie ; elles sont d'ailleurs métalliquement en rapport avec les axes  $O$  et les ressorts  $r$  et  $r'$ . Si on lance un courant dans la ligne de l'une des stations voisines, la sonnerie en avertit ; on transporte alors le ressort  $r$  sur  $m'$ , si le courant vient de la station de droite ; ce courant suit une

PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Premier télégraphe aérien inauguré devant Condé le 30 novembre 1794 (page 299).





lame métallique qui est représentée en ponctué sur la figure, arrive à un cercle, métallique aussi, placé au centre du manipulateur, et se rend de là par la tige T et le ressort  $l$  à la plaque de cuivre Q qui est elle-même en relation avec la borne R. Cette dernière communique par un fil récepteur à la station. Si la dépêche doit être transmise sans intermédiaire de la station de droite à celle de gauche, les deux ressorts  $r$  et  $r'$  sont amenés sur CD, et les deux fils de ligne sont reliés entre eux. Devant ce mécanisme est un cadran portant les lettres de l'alphabet et une croix comme signe final. Une manette M se meut sur le cadran; un cercle métallique, relié par des lames de cuivre aux plaques  $m$  et  $m'$ , est au-dessous de lui; ce cercle porte une rainure dans laquelle glisse une goupille fixée à un levier coudé mobile autour de l'axe  $a$ ; la grande branche T de ce levier est terminée par une lame d'acier  $l$  qui vient buter alternativement sur les buttes Q et P suivant que la goupille se trouve dans l'une des portions concaves ou convexes de la rainure. C'est ainsi que la manette étant sur la croix ou sur une lettre du rang pair, le courant qui arrive par R ne peut passer, mais si la manette porte sur une lettre de rang impair,  $l$  touchant alors P, le courant traverse T, arrive en  $m'$  sur lequel repose le ressort  $r'$  et est lancé par L' dans le fil de la ligne. Pour transmettre une lettre, on porte rapidement la manette de la croix sur cette lettre, on s'arrête un instant, puis l'on porte la manette sur la lettre suivante, et ainsi de suite. Quand le mot est fini, on revient à la croix.

En très peu de temps, n'importe qui, un employé quelconque, est mis au courant de la manœuvre de cet appareil; c'est pourquoi, dans les compagnies de chemins de fer, où le premier venu peut être appelé, dans certaines circonstances, à se servir du télégraphe, on le conserve; malheureusement, les signaux qu'il donne sont fugitifs; les erreurs ne peuvent être contrôlées; aussi donne-t-on la préférence, partout où cela est possible, à l'appareil Morse.

**TÉLÉGRAPHE MORSE.** — L'appareil de Morse, dont l'emploi est aujourd'hui à peu près général, sert aux relations de toutes les villes d'une certaine importance. Toutefois, il faut avouer qu'il a été perfectionné à ce point qu'on ne lui a laissé, pour ainsi dire, de ce qu'il était d'abord, que son nom. C'est surtout M. Digney (1) qui l'a amené au plus haut point de perfectionnement et lui a apporté les dispositions nouvelles, simples et pratiques, qui l'ont fait adopter par tous les pays.

(1) DIGNEY (J.-D.), savant constructeur français (1819-1880) auquel on doit de nombreux appareils de physique.

Ce télégraphe, dit *télégraphe écrivant*, transmet des signes conventionnels, mais qui restent imprimés, et les dépêches peuvent être soumises à un collationnement qui permet de rectifier les erreurs commises. Ces signes représentent les lettres de l'alphabet par des combinaisons de points et de traits séparés par des blancs (*Tableau*, page 297).

Comme tous les télégraphes, cet appareil se compose d'un *récepteur* et d'un *manipulateur*. Le récepteur (*fig.* à la page 289) comporte une boîte BD renfermant un mouvement d'horlogerie au moyen duquel tournent deux roues R et Q. Autour de la roue supérieure est enroulée une longue bande de papier *ph* qui, après avoir passé entre deux cylindres, mus par le mouvement d'horlogerie, s'enroule de nouveau autour de la roue R, au moyen de la manette M. A droite de cette boîte BD est un électro-aimant E dans lequel passe le courant transmis par la pile. Enfin sur la paroi antérieure de la boîte sont les différentes pièces destinées à écrire sur la bande de papier. Au-dessus de l'électro-aimant est un levier horizontal *k*, mobile autour d'un point *x*, et dans lequel est fixée une armature de fer doux A, qui est attirée au passage du courant et abaisse aussi le levier, mais qui est relevée par un ressort en spirale *r*, immédiatement après que le courant est interrompu. A l'extrémité de l'appareil sont deux vis TT, qui présentent entre elles une séparation plus ou moins grande, servant à régler l'amplitude des oscillations du levier ; et, à l'autre extrémité du levier, en *i*, est une pointe qui est la pièce écrivant. Dans le télégraphe Morse proprement dit, le levier *k* finissait en poinçon, qui, en donnant à chaque oscillation un coup sec sur le papier formait une empreinte ; mais, outre que cette empreinte était parfois peu marquée, elle exigeait, pour être produite, une certaine force et conséquemment un courant intense. C'est pourquoi on a remplacé ces empreintes par des traits noirs ou bleus. En *a* est une petite roue recouverte d'étoffe que l'on a soin de conserver toujours imprégnée d'encre. Au moyen d'un mouvement d'horlogerie, une chaîne sans fin s'enroulant sur deux petites poulies *oo'*, touche la roue *a*, et passe un peu au-dessus du papier ; mais quand le courant passe, l'armature A est attirée, le levier *k* s'abaisse, et la pointe *i* appuie sur la petite chaîne et la fait toucher le papier. A mesure que celui-ci se déroule, la petite chaîne forme ainsi sur lui des points ou des traits, selon le temps que dure le contact. Depuis quelques années, MM. Bouis et Pouget-Maisonneuve ont supprimé cette roue à encre qui souvent séchait, ou prenait trop d'encre, et ont remplacé le papier ordinaire par une bande de papier imprégné de cyanure jaune de fer et de potassium. Ce sel étant décomposé par le courant de la pile toutes les fois qu'il passe en travers du papier, les traits et les points sont marqués en bleu dès qu'il y a contact du poinçon *i*.

Le *manipulateur* consiste (*fig.* à la page 289) en une tablette d'acajou qui sert de support à un levier métallique *ab*, mobile en son centre sur un axe horizontal, et dont l'extrémité *a* est maintenue élevée par un ressort, de sorte qu'il faut appuyer sur le bouton B, en bois ou en ivoire, pour que le levier touche la pièce *x* appelée l'*enclume*. Enfin sur la tablette sont trois boutons en communication, le premier avec le fil P qui vient du pôle positif de la pile de la station, le second avec L qui est le fil de la ligne, et le troisième avec A qui aboutit au *récepteur* de la station.

Ceci connu, il faut considérer deux cas : 1° Si le manipulateur est disposé pour recevoir un télégramme d'une station éloignée, l'extrémité *b* du levier reste abaissée, de façon que le courant arrivant par le fil de ligne L, puis montant dans la pièce métallique *m*, puisse passer par le fil A qui le conduira au *récepteur*; et 2° s'il s'agit de transmettre un télégramme, on appuie sur le bouton B de sorte que le levier se trouve en contact avec l'*enclume x*; alors le courant de la pile de la station, qui arrive par le fil P, monte dans le levier, passe par la pièce métallique *m*, et de là, dans le fil de ligne L, qui le conduit à la station vers laquelle est dirigée le télégramme. Alors un point ou un trait est marqué au récepteur, selon le temps que le bouton B est abaissé ou levé : un simple choc sur le bouton B, un point; si le contact est prolongé, un trait.

**PARAFoudre.** — Quand le temps est à l'orage, l'atmosphère est, pour ainsi dire, entièrement imbibée d'électricité; le courant qui traverse les fils entraîne avec lui une quantité parfois très considérable d'électricité atmosphérique, qui suit le fil conducteur et arrive jusque dans le poste. Quelquefois la foudre, en éclatant dans l'air, rencontre le fil télégraphique et le suit jusqu'au bout, comme elle suit la chaîne d'un paratonnerre. Arrivée au poste, elle peut occasionner les plus graves désastres, et même foudroyer les employés. Et ces accidents sont d'autant plus redoutables que le plus souvent l'orage est lointain et que rien ne pouvait faire prévoir un sinistre. Lorsqu'un orage est signalé sur une ligne, tous les fils venant de cette ligne sont *mis à terre*, c'est-à-dire que l'électricité s'écoule sans passer par les appareils. Lorsque l'orage n'est pas très violent, on se contente des *parafoudres*. Ce sont simplement deux disques de cuivre *d* et *f*, portant des dents vis-à-vis les unes des autres, mais ne se touchant pas (*fig.* à la page 289) : le disque *d* est en communication avec la terre par le moyen d'une plaque de métal fixée derrière la tablette qui soutient le *parafoudre*, et se trouve aussi sur le passage du courant. La foudre, suivant le fil de ligne L, entre dans l'appareil par la partie inférieure de la tablette, à gauche, y subit l'influence du commutateur *n* qui la conduit à un bouton *c*,

d'où elle se dirige au disque  $f$  par une tige métallique située à droite de la tablette : là, l'électricité agit par influence sur le disque  $d$  et jaillit sans danger par les pointes sur celles garnissant l'appareil. De plus l'électricité dynamique, sur laquelle les pointes n'ont pas d'influence, continue son chemin ; du disque  $f$ , elle passe dans un fil très fin de cuivre, isolé dans un tube de verre  $e$ , qui est fondu si le courant est intense et l'électricité n'arrive pas dans les appareils, ou du moins y arrive en moindre quantité, ce qui diminue les dangers. De ce tube  $e$ , le courant peut encore descendre dans un fil placé au bas de la tablette, et, de là, dans un petit

galvanomètre  $G$ , qui, par la déviation de l'aiguille, indique si le courant passe par les appareils.

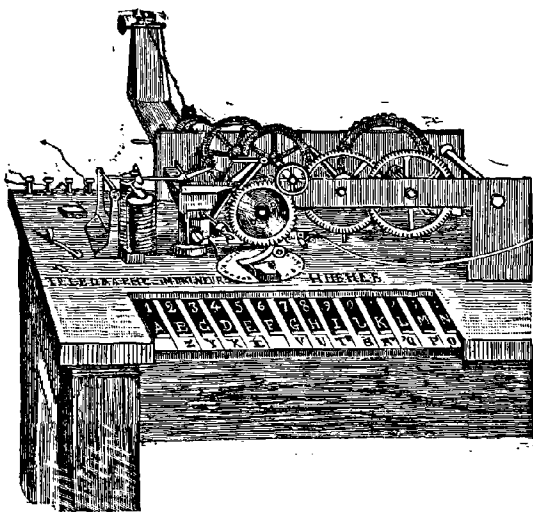


Fig. 112. — APPAREIL HUGHES.

**AUTRES SYSTÈMES DE TÉLÉGRAPHES.** — Nous citerons, d'après M. de Parville (1), quelques autres systèmes de télégraphes dignes d'appeler l'attention.

*Appareil Hughes.* — On se sert de l'appareil Hughes dans toutes les grandes villes et dans les principaux bureaux télégraphiques de

France. On gagne beaucoup en vitesse avec lui ; on transmet environ 1,700 mots par heure, presque le triple du système Morse, et les dépêches sortent de l'appareil tout imprimées en caractères typographiques. Elles le sont non seulement à l'arrivée, mais encore au départ, ce qui facilite singulièrement le contrôle. En principe, l'appareil peut se concevoir sans difficulté (fig. 112). Une roue verticale, sur la circonférence de laquelle sont gravées en relief les lettres de l'alphabet, et une bande de papier qui se déroule à sa portée et peut, en s'approchant au moment voulu, prendre l'empreinte d'une lettre quelconque, tel est le système. Pour le faire fonctionner, il suffit d'appuyer sur les touches d'une sorte de clavier dont la division correspond à celle de la roue des types ; chaque touche abaissée détermine l'impression de la lettre qu'elle représente. Pour obte-

(1) *Causeries scientifiques*, 1878. Exposition (Rothschild, éditeur).

nir ce résultat, on fait tourner synchroniquement les organes similaires des deux postes en relation. De part et d'autre, les deux appareils inscrivent en même temps la dépêche. L'appareil Hughes permet donc de livrer au destinataire la dépêche telle qu'elle est sortie de l'appareil. On évite, grâce à lui, les pertes de temps de traduction nécessaire dans le Morse et les erreurs sont bien moins à craindre. Mais il exige dans son manquement une certaine habileté, et dans sa conduite une connaissance exacte de son mécanisme compliqué ; aussi nécessite-t-il un long apprentissage. On ne l'emploie que dans les postes où le nombre des dépêches est assez considérable pour légitimer l'usage d'un appareil rapide et la présence d'employés déjà expérimentés. Dans certains grands bureaux, où les dépêches abondent, la rapidité de transmission acquiert une importance exceptionnelle. Aussi a-t-on cherché encore à gagner du temps en scindant le travail. On a eu l'idée de faire composer d'avance les dépêches au départ par des mains habiles et de les faire transmettre ensuite automatiquement en profitant de toute la vitesse dont l'appareil est susceptible.

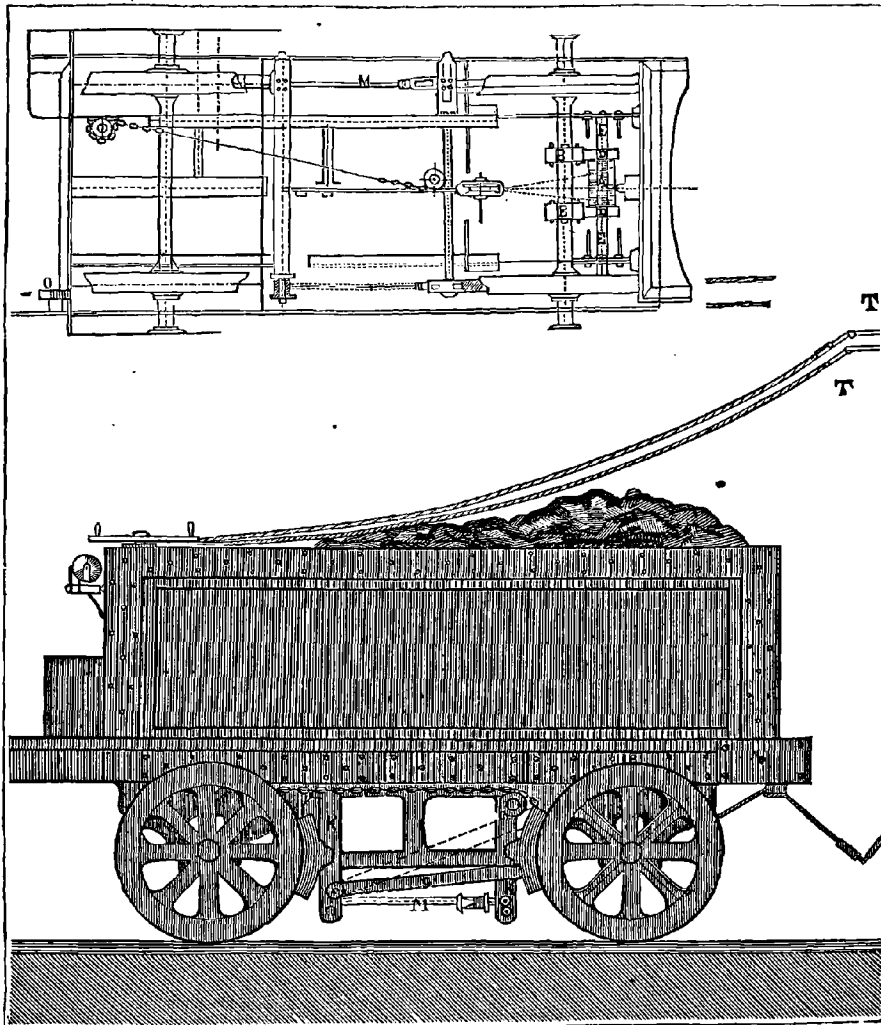
*Appareil Wheatstone.* — La transmission automatique avait, du reste, été déjà employée pour le télégraphe Morse. Dans le système anglais de Wheatstone, on peut expédier jusqu'à 2,500 mots à l'heure. A l'aide d'un *perforateur*, l'employé produit dans une bande de papier des trous ronds disposés de façon à reproduire le trait, le point, etc. Cette bande est placée sur le transmetteur. Elle est entraînée mécaniquement et passe sous deux tiges verticales animées d'un mouvement alternatif de va-et-vient rapide. Chaque fois que ces tiges pénètrent dans un trou, il y a contact métallique et un courant passe. A l'arrivée, le courant pousse une molette encrée contre la bande de papier qui se déroule, et les signaux se tracent comme dans le Morse ordinaire. Par suite de cette division du travail, on peut alimenter sans cesse de dépêches l'appareil transmetteur et l'utiliser au maximum de vitesse. Ce maximum dépend d'ailleurs, surtout, de l'état de la ligne.

*Télégraphes autographiques.* — Les télégraphes autographiques ont pour but la reproduction d'une dépêche, d'un dessin fait sur une feuille de papier spécial. On dépose sur l'appareil et au poste de départ un dessin, une lettre, etc., dessin et lettre se reproduisent sur l'appareil du poste d'arrivée. On obtient, au moyen de ces appareils, un *fac-similé* exact des caractères tracés. Malgré la sûreté que ce système de transmission peut offrir pour les transactions commerciales, il ne paraît pas avoir été adopté par le public. On avait mis en service deux de ces appareils, le télégraphe Caselli et celui de Meyer, entre Paris et Lyon ; ils ont été peu à peu abandonnés. Il fallait écrire avec une encre spéciale sur un papier

métallique ; en outre, le prix d'une dépêche étant élevé, il n'en a pas fallu davantage pour que l'on renonçât à faire usage des premiers télégraphes autographiques. Ils semblent, en effet, ne pouvoir être appliqués que dans des circonstances spéciales, quand il y a un grand intérêt à reproduire le *fac-similé* d'une dépêche ; par exemple, en cas de guerre, il est bon que les ordres soient transmis dans toute leur intégrité. Le télégraphe autographique de M. d'Arincourt, qui est portatif et relativement commode à manier, pourrait sans doute être utilisé avantageusement par les officiers d'état-major.

**TÉLÉGRAPHIE MILITAIRE.** — Les premiers essais de télégraphie militaire, en France, remontent à la guerre d'Italie, et même à la conquête de la grande Kabylie en 1857. Le maréchal Randon annonça, par un télégraphe installé à la suite de son quartier général, la conquête des premiers rameaux du Djurjura. En 1859, le service télégraphique relia sans cesse le quartier général à la France. Au même moment, la Prusse, l'Autriche, etc., commençaient aussi à organiser leur télégraphie militaire et la mirent à l'essai pendant la guerre du Holstein. En France, on poursuivit de nouveaux essais ; on construisit un nouveau matériel, qui fut expérimenté avec succès au camp de Châlons, pendant le printemps de 1868. Les piles employées sont les piles Marié-Davy et Leclanché, formées de dix éléments réunis dans une même boîte ; le fil est en cuivre rouge de 1<sup>mm</sup>,6 de diamètre, formé de quatre fils très fins, tordus en cordelette. Cette âme est enfermée dans plusieurs enveloppes successives de coton et de gutta-percha ; le tout est recouvert de toile caoutchoutée. La conductibilité de ce câble est très grande ; il résiste très bien à la tension et à l'écrasement ; au camp de Châlons, les batteries d'artillerie et la cavalerie ont constamment passé sur ce câble, sans lui causer le moindre dommage. On enroule sur des bobines une longueur de 2 kilomètres de câble, et l'on dispose ces bobines dans des voitures-poste. Chaque voiture renferme à l'avant un compartiment spécial où se trouvent les appareils télégraphiques, manipulateur et récepteur Morse. A l'aide d'une brouette, on procède au dévidage du fil que l'on place dans le fossé de la route ou à travers champs. S'il s'agit de lignes de réserve, on pose le fil sur des poteaux, plantés à 80 pas environ les uns des autres, dans des trous faits par les soldats. Pendant la dernière guerre franco-allemande, comme le matériel spécial était tombé au pouvoir de l'ennemi, on ne put guère juger de la bonté du système. A Paris, on avait monté très ingénieusement, dans les petits omnibus de la Compagnie du chemin de fer d'Orléans, des postes à trois directions. En résumé, quand il s'agit de relier

des corps d'armée, la télégraphie militaire est rapidement établie, et dans de suffisantes conditions de solidité et de commodité; mais il ne semble pas que ce système soit praticable quand il s'agit de relier des avant-postes



Frein Achard (page 322).

ou d'établir des correspondances entre des réserves et des reconnaissances : c'est trop compliqué.

Le matériel des Allemands, dont on a beaucoup parlé, n'est pas supérieur au nôtre; leurs appareils de campagne sont même plus lourds et moins

portatifs. Lorsqu'il s'agit, au contraire, de petites lignes volantes aux avant-postes, ils ont un système très simple et qui mérite d'être indiqué. Ils suppriment toute pile et tout appareil; ils ne se servent que d'un fil terminé à un bout par une lame de zinc et à l'autre par une lame de cuivre. On plonge, à chaque extrémité de ligne, la plaque dans le sol, et il en résulte un courant très faible, il est vrai, mais suffisant pour être utilisé. Dans le circuit, on a interposé à l'arrivée et au départ un petit galvanomètre. En faisant dévier à la main l'aiguille à la station de départ, le même dérangement se reproduit à la station d'arrivée. A l'aide de

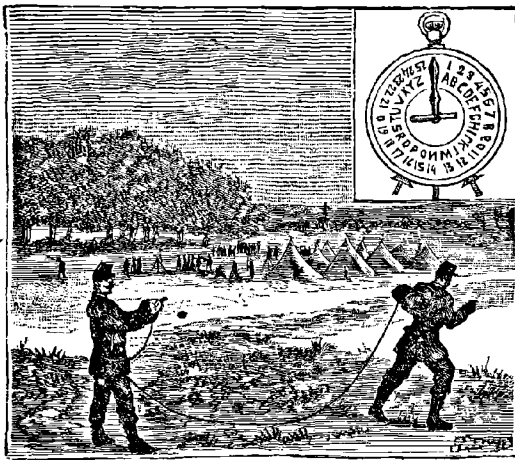


Fig. 113. — TÉLÉGRAPHE MILITAIRE TROUVÉ.

mouvements plus ou moins brusques de l'aiguille du galvanomètre, on peut reproduire des signaux analogues à ceux de Morse et correspondre. En sorte qu'avec un seul fil et des plaques enterrées en guise de pile, on a tout un système télégraphique suffisant pour les petites distances.

Signalons l'ingénieux petit télégraphe militaire de M. Trouvé, également mis en expérimentation pendant

le siège de Paris. Ce télégraphe se compose (*fig. 113*) d'un cadran mobile en papier, sur une face duquel se trouvent des lettres et des chiffres, et sur l'autre des lettres en regard desquelles on a laissé un emplacement destiné à recevoir des mots choisis, ce qui permet d'envoyer une dépêche, soit par lettres, soit par chiffres, soit par mots, et avec les mots aussi vite qu'avec la parole. En effet, l'aiguille que porte le cadran, mue par l'électricité, s'arrête sur les lettres ou sur les mots, selon que le cadran est retourné dans un sens ou dans l'autre. Dans son télégraphe, M. Trouvé a deux fils conducteurs, d'une part parce qu'on est moins sujet à avoir des déviations dans le courant, et de l'autre parce que ces fils permettent de correspondre même en marchant. Ces fils, réunis en un seul câble et isolés entre eux par une triple enveloppe de gutta-percha et de coton, sont enroulés sur une bobine et portés par un homme sur un crochet, à la manière d'un sac de soldat. Quant à la pile, il fallait en créer une qui, avec une force électro-motrice suffisante, ne fût, dans aucun cas, susceptible de se briser et qu'on pût porter comme un fardeau. La pile de M. Trouvé est formée



d'un couple de zinc et de charbon renfermé dans un étui en caoutchouc durci, fermant hermétiquement. Le zinc et le charbon n'occupant que la moitié supérieure de l'étui, l'autre moitié est occupée par le liquide excitateur, une solution de bisulfate de mercure. Tant que l'étui conserve sa position ordinaire, le sommet en haut, le fond en bas, l'élément ne plonge pas dans le liquide ; il n'y a ni production d'électricité, ni dépense par conséquent. Mais, dès que l'étui est renversé, le couvercle en bas, le courant naît et se continue tant que le liquide n'est pas épuisé. Cette disposition permet d'avoir une pile hermétique, parce que l'espace réservé, non seulement fait éviter l'usure de la pile en pure perte, mais sert encore à loger le gaz qui, vu le peu de compressibilité des liquides, déterminerait des pressions et par suite des fuites, et même la rupture de toute pile hermétique disposée de toute autre façon.

Ce système pourra, par sa simplicité même, rendre des services dans une foule de circonstances. M. Trouvé est parvenu à donner au petit électro-aimant de son télégraphe une sensibilité et une rapidité de fonctionnement remarquables. Un électro-aimant de 5 décigrammes peut s'aimanter et se désaimanter 4,500 à 5,000 fois par seconde.

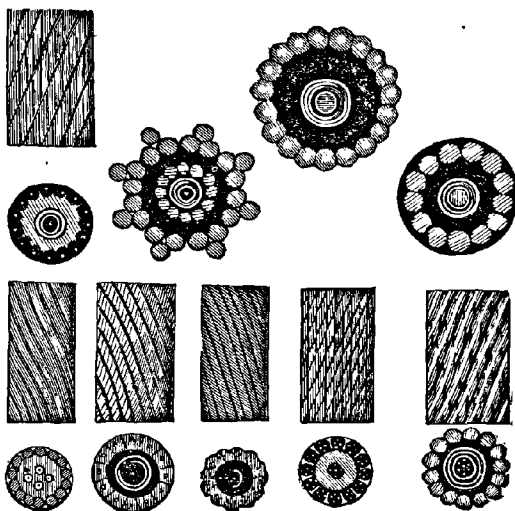


Fig. 114. — CABLES SOUS-MARINS.

**TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE.** — L'idée des lignes sous-marines est due, paraît-il, à M. Wheatstone, qui, en 1840, présentait un projet de télégraphe entre Douvres et Calais ; mais ce fut un Français, M. Brett, qui, en 1849, exécuta ce dessein. Depuis cette époque, la télégraphie sous-marine a pris de prodigieux développements, et toutes les mers renferment aujourd'hui dans leurs profondeurs des fils qui portent, avec la rapidité de la foudre, les pensées de toutes les nations civilisées.

Un câble sous-marin se compose (*fig. 114*) d'un conducteur formant en quelque sorte l'âme du câble ; ce sont des fils de cuivre tressés ensemble, de manière à ne former qu'un seul fil. Au début, un seul câble renfermait plusieurs conducteurs, dont chacun avait une destination par-

ticulière. Aujourd'hui, à la suite des études de la commission anglaise, on préfère ne placer qu'un seul conducteur dans chaque câble. Ce fil de cuivre est composé généralement de cinq petits fils tressés ensemble; de sorte que, si l'un d'eux vient à se briser, la communication télégraphique ne soit pas interrompue. Puis l'âme du câble est entourée de matières isolantes. Ordinairement, on se sert de la *Chatterton's composition*, mélange de gutta-percha, de goudron de bois et de résine, qui a la propriété d'adhérer au fil de cuivre. On applique sur celui-ci plusieurs couches de cette matière; puis au-dessus on met encore une série de couches isolantes, soit seulement de caoutchouc durci, soit de caoutchouc alternant avec le composé de Chatterton. Enfin, pour protéger le câble et le préserver des chocs et des accidents, on enveloppe le tout, d'abord de chanvre goudronné fortement tassé, et ensuite d'une série de gros fils d'acier. Le premier câble transatlantique de 1858 pesait environ 620 kilogrammes par kilomètre; celui de 1865 pesait 982 kilogrammes; mais celui de 1866 est beaucoup plus léger.

Avant la réussite, bien des personnes doutaient de la possibilité de transmettre des signaux à de grandes distances. Comment le fil se comporterait-il quand les courants électriques y seraient lancés? Son isolement serait-il suffisant? La force du courant serait-elle assez forte pour parvenir sans perturbation d'un bout à l'autre de l'immense ligne sans relais? Ces craintes, d'abord justifiées, n'ont plus de raison d'être depuis les savants travaux de MM. Faraday, Wheatstone, Guillemin, Gaugain (1), Siemens, qui ont tous contribué à la solution de cette question importante. Cependant l'exploitation d'un câble marin offre encore aujourd'hui des difficultés sérieuses et des inconvénients nombreux. L'électricité ne chemine pas dans un fil conducteur comme une flèche douée d'une vitesse analogue à celle de la lumière. C'est un flux, comme une série de vagues, qui avance, avec une vitesse incomparable, il est vrai, mais par ondes successives. Un petit effet, imperceptible d'abord, se révèle aux instruments les plus délicats; puis l'effet grandit, l'onde prend de l'ampleur, le conducteur se charge et le courant devient manifeste, même pour un instrument grossier. Quand on demande avec quelle vitesse l'électricité franchit le câble

(1) GAUGAIN (Jean-Mothés), élève de l'École polytechnique; il prit part en 1831, avec une grande partie de ses camarades, à la manifestation républicaine à laquelle donna lieu l'enterrement du général Lamarque; pour ce fait, il ne lui fut pas permis d'entrer dans les services publics, après les examens. Ingénieur civil, il dirigea divers établissements métallurgiques en France et en Belgique. Connu du monde savant dès 1831, pour ses remarquables travaux relatifs à l'électricité, il ne trouva jamais aucun appui, n'eut jamais ni fonctions publiques ni traitement, et n'eut d'autre aide dans ses travaux que sa fille qui, ne voulant pas le quitter, refusa de se marier et lui consacra sa vie tout entière. L'Académie des sciences lui décerna tous les ans le prix Geguer, afin de faciliter ses travaux (1810-1830).

transatlantique, la réponse ne saurait être précise. La première petite vague arrive de l'autre côté de l'Océan à peu près au même moment que le courant est lancé dans le câble; la vague sensible aux appareils met plus de temps; le premier effet d'une impulsion électrique se fait sentir à l'extrémité de 1,450 milles marins du câble en 7 ou 8 millièmes de seconde; mais l'arrivée du courant sensible exige bien 1 à 2 dixièmes de seconde. Lorsqu'un fil est chargé, l'embarras est de le décharger. L'électricité ne s'évanouit pas instantanément à l'extrémité du câble, si bien que, pour envoyer des signaux rapidement, on se trouve immédiatement arrêté par cette difficulté : annuler la vague électrique qui court dans le câble. En effet, en lance-t-on une seconde, elle se confond avec la première, et aucun effet bien net ne se produit à l'extrémité. Il faudrait attendre, entre chaque signal, que le conducteur fût déchargé. On a craint longtemps que ce mode de propagation ne rendît d'une lenteur désespérante les transmissions à grande distance. On a combiné, dans ces dernières années, des artifices ingénieux qui ont permis d'annuler la charge de la ligne, de manière à ne laisser parvenir à chaque fermeture du courant qu'une onde extrêmement petite, mais distincte. Contrairement à ce que l'on pourrait supposer, la pile dont on se sert pour franchir 4,000 kilomètres doit être excessivement faible. Si on employait une pile un peu forte, le conducteur ne se déchargerait pas en temps utile, et tous les signaux se confondraient. L'impulsion transmise est si petite que l'appareil qui reçoit le signal doit être très délicat. Aussi ne se sert-on pas des appareils récepteurs ordinaires. L'onde fait dévier à l'arrivée une simple aiguille aimantée (*fig. 115*), et de la nature de la déviation on déduit le signal. La lecture des dépêches se fait depuis quelques années dans une chambre obscure avec le galvanomètre. L'aiguille porte un petit miroir; une lampe projette un rayon sur le miroir; chaque déviation de l'aiguille entraîne le déplacement du rayon réfléchi sur un écran blanc muni d'une échelle graduée. A la position plus ou moins écartée vers la droite ou vers la gauche du point brillant correspond une lettre. L'employé lit le télégramme ainsi imprimé en traits de feu. Les déviations réelles de l'aiguille ne dépassent pas 6 à

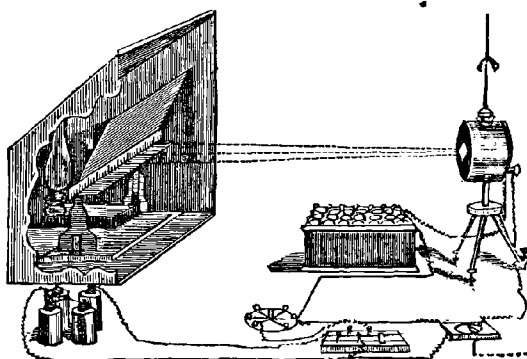


Fig. 115. — TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE.

8 millimètres ; à l'aide du rayon réfléchi qui les amplifie, elles deviennent très sensibles sur l'écran, et, avec un peu d'habitude, on lit couramment ce curieux alphabet. D'autres inconvénients, tournés, il est vrai, en partie par M. Varley, résultent de l'influence sur le câble des courants d'induction et des courants produits par les orages magnétiques. Il arrive des cas où les transmissions sont indéchiffrables ou même impossibles. Enfin le câble est d'une construction complexe et d'une pose difficile ; son poids facilite les ruptures ; à la plus petite fissure de l'enveloppe, le métal s'oxyde rapidement sous l'influence du courant électrique et de l'eau de mer, et c'est là une nouvelle cause d'accidents. Enfin, en cas de rupture, on ne peut guère déterminer qu'à un mille près le point du câble qui a cédé, et l'opération du relevage d'un câble lourd est toujours hasardeuse. Par ces diverses raisons, les transmissions électriques sous-marines actuelles ne sont pas considérées comme le dernier mot de la télégraphie à grande portée.

En terminant, nous mentionnerons deux nouveaux systèmes télégraphiques présentés à l'Exposition d'électricité en 1881, par M. Menuisier, et qui ont vivement frappé l'attention.

Le premier est destiné à l'échange des dépêches entre navires en courses. L'inventeur propose d'établir en mer un réseau télégraphique et postal absolument comme sur terre. Cette conception hardie consiste à greffer, sur les câbles sous-marins, des bouées restant au niveau de flottaison. Il affirme avoir trouvé le moyen de rendre ces bouées résistantes aux plus violentes tempêtes. Le second appareil est un appareil de communication télégraphique permanente entre les trains en marche, et entre eux et les gares. L'avenir seul peut éclairer sur la valeur de ces projets ; mais l'étude seule du problème indique une solution possible dans un certain temps.

**APPAREILS DE SURETÉ SUR LES LIGNES DE CHEMINS DE FER. — BLOC-SYSTEM. — SIFFLET D'ALARME. — FREIN ACHARD. —** Une question qui préoccupe extrêmement les esprits est celle d'empêcher, sur les voies ferrées, ces épouvantables collisions qui plongent trop souvent les populations dans le deuil. L'électricité étant l'agent sur lequel il faut compter le plus, nous dirons quelques mots des appareils dont l'adoption semble devoir être la meilleure garantie de sécurité pour les voyageurs.

Nous commencerons par parler du *Bloc-system*, ensemble de signaux et d'appareils, aujourd'hui devenu réglementaire en France (1). Il repose

(1) Voir la revue scientifique l'*Électricité*, années 1880-1881.

sur ce principe essentiel que *toute voie est supposée fermée jusqu'à ce qu'un signal en autorise l'ouverture*. Un second principe, depuis longtemps appliqué sur la ligne du Nord, consiste à faire ouvrir la voie par le cantonnier d'aval, qui ne doit le faire que quand le train a passé devant lui et est entré dans la section suivante. De plus, le cantonnier qui débloque la section d'amont ne peut la dégager que lorsqu'il a protégé la section d'aval en arborant un signal qu'il ne pourra plus abattre.

Le *Bloc-system* crée donc entre trois postes consécutifs, A, B, C, une solidarité qui s'étend à toute la ligne. C'est B qui est chargé d'ouvrir la section AB, mais il ne peut le faire sans avoir fermé la section BC. S'il omet son devoir, AB restera fermé, et le service sera interrompu, mais il n'y aura pas de collision.

Voici maintenant l'appareil mécanique qui permet, grâce à l'électricité, au cantonnier de la station B de fermer la section d'aval BC et d'ouvrir ensuite la section d'amont AB. Cet effet est produit à l'aide d'un système de déclenchement très simple et très ingénieux. La force d'un aimant agissant au contact fait équilibre à un poids que, dans l'état ordinaire, il tient suspendu. Le courant instantané ne fait que neutraliser l'aimant; il permet au poids d'agir et d'opérer le déclenchement en vertu de la gravité. Un aimant permanent retient ainsi au contact un des bras d'une équerre; l'autre bras communique, à l'aide d'une tringle verticale, à une tige horizontale pesante, mobile au haut d'un poteau et indiquant l'arrêt. Si le cantonnier B paralyse l'aimantation à l'aide d'un courant temporaire passant dans une bobine qui entoure l'aimant permanent, le bras du levier obéit à la pesanteur, le signal tombe, et la liberté de circulation est rendue à la section AB. Mais le cantonnier B, qui donnera ce courant libérateur, ne peut mouvoir le commutateur destiné à produire ce changement que s'il a préalablement fermé la section BC, en redressant le signal d'arrêt qui se trouve à l'extrémité supérieure de son mât. S'il ne le fait, le commutateur, maintenu par un encliquetage qu'il ne peut soulever, refusera de lui obéir, et il ne sera point assez fort pour le faire bouger.

L'agent fait son signal au moment où le train passe; on peut même rendre ce signal automatique à l'aide d'une pédale inventée par MM. Leblanc et Loiseau pour protéger les passages à niveau, et qu'on place à côté des rails, où elle est mise en mouvement par une roue spéciale portant une sorte de taquet. Mais cette précaution est vraiment superflue. Le système Leblanc et Loiseau est plus utilement employé à indiquer, d'une façon, pour ainsi dire, continue, la place des trains. Il permet d'établir, de kilomètre en kilomètre, des pédales que le train met en action

chaque fois qu'il les dépasse. A l'aide de courants électriques, le train indique donc lui-même sur un cadran placé dans la gare vers laquelle il se dirige l'historique de son trajet. Tout accident, tout retard se trouve donc signalé. Si quelque arrêt se produit, le chef de gare peut correspondre télégraphiquement avec les cantonniers pour se rendre compte de ce qui s'est passé.

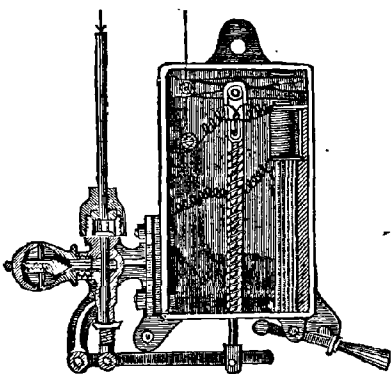


Fig. 116. — SIFFLET ÉLECTRO-MOTEUR.

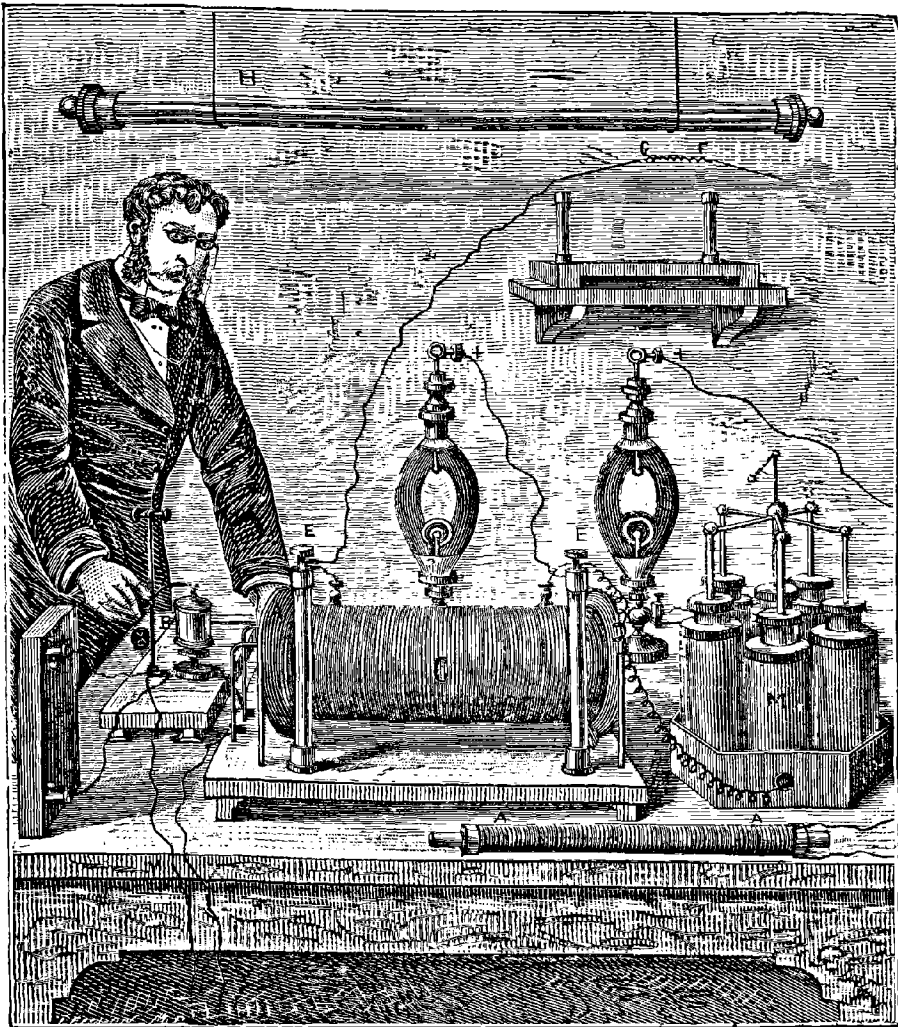
Malgré ces précautions, l'électricité artificielle a une ennemie : l'électricité naturelle ; mais les parafoudres sont presque toujours suffisants, même pendant les troubles atmosphériques les plus épouvantables. D'ailleurs, on arrivera certainement à supprimer ces dernières chances et à opérer à coup sûr.

L'appareil appelé *sifflet électromoteur* avertit le mécanicien de son passage devant un disque indiquant que la voie n'est pas libre, dans le cas où, pour une cause quelconque, il pourrait ne pas apercevoir le signal. Voici comment cet appareil est décrit dans le volume publié par la Compagnie du Nord, à l'occasion de l'Exposition de 1878 :

« Cet appareil se compose (*fig. 116*) d'un sifflet en bronze, à cloche et à levier, en communication avec la chaudière, et porté sur une boîte métallique fixée à la machine. Cette boîte renferme elle-même un second levier parallèle à celui du sifflet auquel il est relié ; ce levier est sollicité par un ressort énergique qui tend à l'abaisser, et, par le fait, à livrer passage à la vapeur ; mais il porte à l'extrémité de sa volée une palette de fer doux en contact avec un électro-aimant dont les branches sont prolongées par des cylindres en fer doux entourés de bobines recouvertes de soie. Les cylindres deviennent les pôles de l'aimant et leur attraction contre-balance l'action du ressort. Si l'on fait passer dans les bobines de l'électro-aimant un courant électrique d'un sens déterminé, l'attraction cesse momentanément, le levier tombe et le sifflet se fait entendre jusqu'à ce que le mécanicien, en appuyant sur une manette, vienne l'arrêter en ramenant le levier dans sa position primitive, c'est-à-dire en contact avec l'électro-aimant.

» L'action de l'électricité se produit de la façon suivante : Le fil de la bobine est relié d'un côté avec le corps de la machine, et, par l'intermédiaire des roues et des rails, avec la terre ; l'autre extrémité est prolongée par un fil qui, descendant sous la machine, aboutit à une brosse métallique isolée et fixée dans une position telle, que les brins dépassent de quelques centimètres les parties les plus saillantes

de la machine. Sur la voie, et à la distance voulue du disque, se trouve une pièce appelée *contact fixe* (*crocodile* par les ouvriers), composée d'une traverse en bois, placée longitudinalement entre les rails, portée sur des supports en fer, et à une



Machine d'induction de Ruhmkorff (page 328).

hauteur telle qu'elle ne puisse être atteinte par les pièces les plus basses de la locomotive. Cette traverse en bois, recouverte d'un enduit isolant, porte à sa partie supérieure une feuille de cuivre qui, par l'intermédiaire d'un fil conducteur, d'une longueur quelconque, est mise en communication avec le pôle positif d'une pile.

Le pôle négatif est relié à un commutateur qui le met en relation avec la terre, lorsque le disque est tourné à l'arrêt, et l'isole au contraire pendant tout le temps que le disque est effacé. La plupart des disques sont déjà pourvus de ce commutateur qui fait fonctionner une sonnerie trembleuse, de telle sorte que le fil de cette sonnerie et celui du contact fixe étant d'ailleurs reliés au pôle positif de la même pile, on peut dire que l'introduction de l'appareil n'a apporté aucune adjonction ou modification au disque existant.

» Au passage de la machine, la brosse vient frotter énergiquement le contact fixe : si le disque est à voie libre, il n'y a aucun effet produit ; mais si le disque est tourné à l'arrêt, la plaque de cuivre se trouve par le fait en communication avec une source d'électricité, et, au passage de la locomotive, le contact de la brosse métallique sur la plaque, complétant le circuit par l'intermédiaire des bobines, du corps de la machine et des rails, fait immédiatement partir le sifflet. Le fait n'a jamais manqué d'avoir lieu, par tous les temps et à des vitesses poussées jusqu'à 110 kilomètres à l'heure, alors même que la plaque de cuivre était recouverte à dessein d'une épaisse couche de ballast ou de ciment, que la brosse a chassée, tout en établissant le contact. On n'a donc pas à s'occuper de l'obstacle beaucoup moins difficile à vaincre, qui résulterait d'une couche de neige dans nos climats. D'autre part, l'appareil n'a jamais été déclenché indûment pendant la marche, par suite des soubresauts ou des chocs de la machine. Enfin il n'exige aucun entretien de la part du mécanicien. »

Arrêter rapidement les trains en marche est une opération d'une nécessité telle, en certaines circonstances, que les inventeurs se sont ingénies à trouver un frein présentant toutes les conditions de sûreté et de solidité indispensables. Nous avons parlé (*Pesanteur*, page 316) des freins pneumatiques : nous devons ici dire un mot des *freins électriques*, employés dans quelques compagnies de chemins de fer.

Dans le frein électrique de M. Achard (*fig.* à la page 313), tout l'appareil d'embrayage a été réduit à un seul électro-aimant tubulaire suspendu au châssis parallèlement à l'un des essieux. Les deux ressorts qui maintiennent cet électro-aimant à faible distance de l'axe donnent passage au courant électrique qui, lorsqu'on veut produire un arrêt, doit parcourir les spires, et qui peut avoir une puissance considérable sans exiger l'emploi d'une pile volumineuse, puisqu'il est produit par un *accumulateur*. Ces *électros* ne sont point chargés de produire directement l'arrêt des roues. Ils sont attirés par les axes voisins en présence desquels ils se balancent, dès qu'ils sont animés par l'électricité, et qui leur transmettent leur mouvement de rotation. En tournant, les aimants enroulent des chaînes qui y sont attachées et qui, en se raccourcissant, font manœuvrer des leviers analogues à ceux que le garde met en action



quand il se sert de freins à main. Poussés par une force considérable, ces organes exercent sur les bandages des roues une pression formidable. Ils agissent donc avec toute l'agilité dont l'électricité est susceptible et la vigueur que peut développer la vapeur. Ainsi, en une seconde  $6/10$ , toutes les roues du train le plus long peuvent être immobilisées. Le train est ainsi converti en un vaste traîneau faisant frottement sur toute la surface des rails, et, fût-il lancé avec une vitesse de 80 kilomètres par heure, s'arrêtant dans un espace de 100 mètres. Une innovation considérable a été récemment introduite par l'adjonction d'un fil de résistance qui fait fonction de régulateur et permet de faire varier à volonté la pression exercée sur les roues.

Les freins électriques suppriment d'abord le bruit déplorable que font les freins à vapeur pendant les arrêts, lorsqu'on met en mouvement les pompes chargées de leur permettre de fonctionner pendant l'arrêt suivant ; ils se prêtent mieux que tous les autres à l'arrêt automatique en cas de rupture d'attelages : il suffit d'installer une pile et un relais sur le fourgon de tête et sur celui de queue pour obtenir ce résultat si précieux ; ils peuvent être mis en mouvement par une communication automatique produite à l'aide d'un butoir déposé sur la voie, comme sur la ligne du Nord ; ils sont enfin à la portée du chef, du sous-chef de train et du mécanicien, qui n'ont pas besoin de se concerter pour agir.

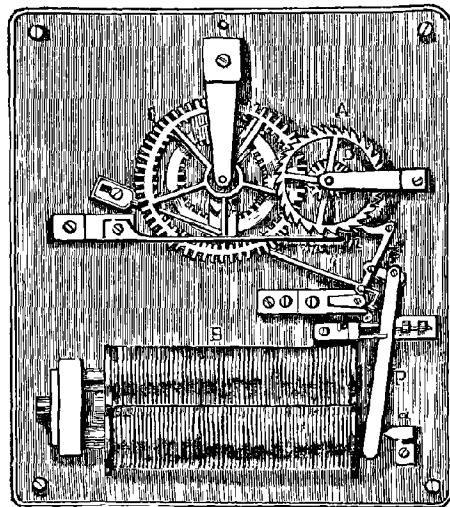


Fig. 117. — HORLOGE ÉLECTRIQUE.

**HORLOGERIE ÉLECTRIQUE.** — Les *horloges électriques* sont des horloges ordinaires dans lesquelles un électro-aimant est en même temps le moteur et le régulateur au moyen d'un courant électrique successivement interrompu. Il en est de tous les modèles et de toutes les formes ; nous donnerons seulement les principes généraux sur lesquels elles sont construites.

Un électro-aimant *B* (*fig. 117*) attire une pièce de fer doux *P*, mobile sur un axe *a*, laquelle transmet son mouvement de va-et-vient à un levier *s*, qui, au moyen d'un échappement *n*, fait tourner la roue *A* ;

celle-ci, au moyen d'une noix D, oblige la roue C à tourner à son tour et à faire marcher les aiguilles par une série de roues. La petite aiguille marque les heures, la plus grande les minutes ; et comme celle-ci ne peut avancer que par de petits sauts brusques à chaque seconde, l'on a ainsi les indications. La régularité des mouvements de l'aiguille dépend donc de la régularité des oscillations de la pièce P ; il faut donc que les intermittences du courant dans l'électro-aimant soient d'abord réglées par

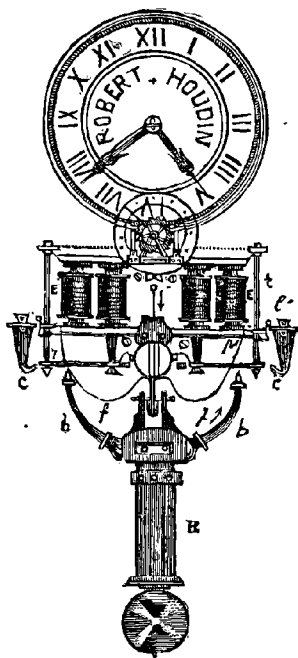


Fig. 118.

HORLOGE ROBERT-HOUDIN.

une première horloge-type, réglée elle-même par une horloge à secondes. A chaque oscillation de cette dernière, le courant passe et s'interrompt; d'où il résulte que la pièce P bat les secondes exactement.

Ces horloges sont plus spécialement connues sous le nom de *compteurs chronométriques* ; elles permettent de donner une heure uniforme, soit dans les différentes gares d'une ligne de chemin de fer, soit à toutes les horloges d'une ville. Nous citerons particulièrement les horloges électriques du docteur Hipp, qui ont valu à leur auteur une médaille d'or à l'Exposition d'électricité de 1881.

On a prétendu, et l'on prétend encore, que l'électricité est un agent trop capricieux pour se prêter avec un succès parfait à la division et à la transmission du temps. Les résultats obtenus démontrent combien peu est fondée cette opinion ; mais il y a eu certes de grandes difficultés à vaincre. Une des plus considérables a été la recherche des causes, souvent

très cachées, des perturbations plus ou moins permanentes qui affectaient la marche des divers systèmes ; il a été reconnu que la plupart de ces dérangements provenaient de mauvaises dispositions mécaniques, et M. le docteur Hipp est arrivé à triompher radicalement des obstacles. En effet, la ville de Zurich possède un réseau sur lequel sont intercalés à peu près 160 cadrans, tous actionnés par une seule horloge-mère et une pile de dix éléments ; Buda-Pesth compte 39 horloges ; Stuttgart, 50 ; Madrid, 27 ; Genève, 114 ; Winter-Huz, 32 ; La Haye, 30, etc.

Quant aux horloges électriques proprement dites, nous citerons celle de Robert-Houdin. Cet appareil consiste (*fig. 118*) en un balancier B, soutenu par un ressort métallique et muni de deux bras *bb*, et oscillant

comme toute autre pendule. Le courant arrive de la pile dans le balancier et ne se trouve fermé que quand B est à son maximum d'écartement. Soit, par exemple, que le bras  $b$  vienne frapper le ressort  $r$  dont l'extrémité reposait sur le crochet  $c$ , le courant suit le fil  $f$  et traverse l'électro-aimant  $E'$ ; la palette  $p'$  est attirée, le ressort correspondant  $r'$  soulevé, l'extrémité  $l'$  du levier coudé qui supporte le crochet  $c'$  est mise en mouvement, et ce crochet se présente sous le ressort pour le maintenir relevé. La flexion que subit le ressort  $r$  déplace la tige  $t$ ; celle-ci, se soulevant, réagit par son extrémité supérieure sur un levier coudé qui fait mouvoir

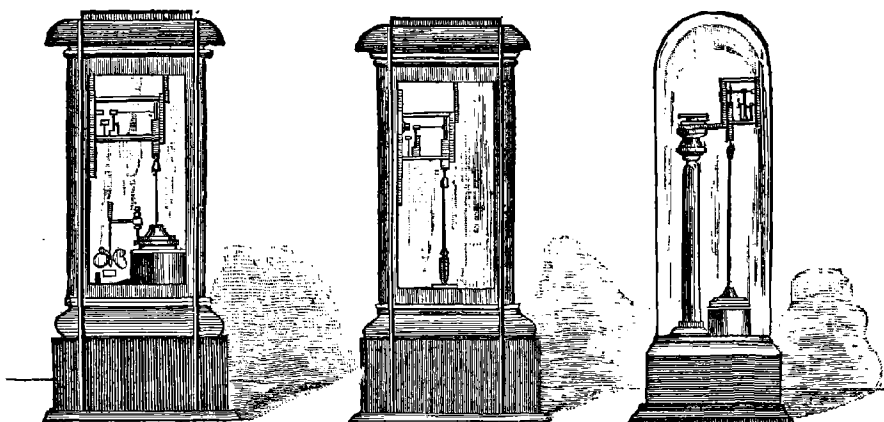


Fig. 119. — HORLOGES ÉLECTRIQUES LEMOINE.

le cliquet  $r$ ; ce cliquet était en prise avec une dent d'une roue d'échappement sur l'axe de laquelle est fixée l'aiguille des secondes; après le mouvement, la prise a lieu sur la dent immédiatement inférieure. Une fois au bout de sa course, le pendule redescend; l'élasticité du ressort  $r$ , qui presse sur  $b$ , donne au balancier une nouvelle impulsion; la tige  $t$  s'abaisse et le cliquet  $r'$ , revenant à sa position primitive, fait marcher la roue d'une dent et déplace l'aiguille des secondes d'une division sur son cadran. Les mêmes actions se produisent à l'autre extrémité de la course du pendule, où se trouve un deuxième électro-aimant fonctionnant comme le premier (Gossin).

Depuis 1851, les efforts des horlogers électriciens se sont portés vers la recherche d'une horloge d'appartement fonctionnant d'une façon sûre; mais le grand nombre de rouages nécessaires a été une cause d'insuccès. A l'Exposition internationale d'électricité de 1881, un horloger de Paris, M. Lemoine, a présenté une série d'appareils basés sur le même principe,

et qui ont vivement attiré l'attention. Le mouvement du balancier est invariablement entretenu par un électro-aimant et le train d'horlogerie ne se compose que de deux pignons et de deux roues : la pile est placée dans le socle de l'appareil. Sur ces idées simples, trois systèmes ont été construits (*fig. 119*). Dans le premier de ces systèmes, dit *papillonome*, le balancier reçoit l'impulsion électrique chaque fois que son oscillation et par suite sa vitesse diminue au-dessous d'une certaine limite. L'organe régulateur de l'action est un papillon léger, monté sur une tige secondaire, oscillant elle-même librement sur le balancier et agissant sur les contacts électriques par suite du mouvement différentiel que lui communiquent l'oscillation du balancier et la résistance de l'air.

Dans le second système, appelé *astéronome*, le courant agit sur le balancier à intervalles fixes, convenablement calculés pour lui donner l'impulsion, qui lui permet de continuer son mouvement tant que la pile fonctionne. Cette action est obtenue au moyen d'une étoile spéciale employée en combinaison convenable avec les rouages en mouvement.

Le troisième système est dit à *échappement commutateur*. L'un des contacts destinés à opérer la fermeture du courant est formé par la griffe même du balancier, tandis que l'autre est constitué, soit par certaines dents de la roue d'ancre, les autres étant isolées, soit par les saillies radiales d'une pièce faisant corps avec ladite roue d'ancre. Les impulsions sont encore, dans ce cas, données au balancier à intervalles fixes, convenablement calculés. Les piles, dans les trois systèmes, durent très longtemps, et il suffit d'ouvrir le tiroir où elles se trouvent pour les changer. Le prix de ces pendules électriques est très modique.

## CHAPITRE VI

### INDUCTION — APPLICATIONS

#### INDUCTION D'UN COURANT PAR UN COURANT ET PAR UN AIMANT.

— Nous avons vu (*Électricité statique*, page 36) que l'on désigne sous le nom d'*induction* l'action qu'exercent à distance les corps électrisés sur les corps à l'état neutre; on se sert du même mot pour indiquer les effets produits par l'électricité dynamique. Faraday, qui, en 1832, a fait con-

naître cette classe de phénomènes, a appelé *courants d'induction* ou *courants induits* les courants instantanés qui se développent dans des conducteurs métalliques sous l'influence des courants voltaïques ou des aimants.

Ampère avait démontré que l'action de l'électricité peut développer la puissance magnétique, et que les courants électriques produisent les mêmes effets que les aimants; Faraday démontrait que l'inverse a lieu également, et qu'avec des aimants on peut développer la puissance électrique dans les métaux.

On nomme *courants induits volta-électriques* ceux qui sont excités, dans un circuit fermé, par un autre courant dit *courant inducteur*; ils sont *directs* quand ils sont dans le même sens; *inverses*, dans le cas contraire.

On nomme *courants induits magnéto-électriques* ceux qui sont excités par un aimant.

La production des courants volta-électriques se démontre au moyen d'une *bobine* sur laquelle s'enroulent deux fils (*fig. 120*); l'un

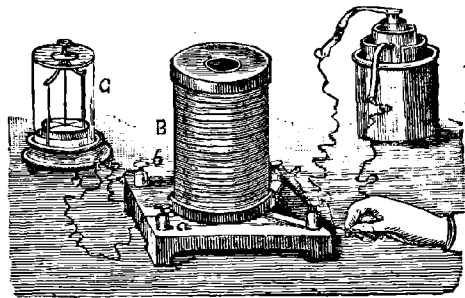


Fig. 120.

INDUCTION D'UN COURANT PAR UN COURANT.

est un gros fil de cuivre; l'autre, de même longueur, est plus fin; chacun d'eux, recouvert de soie, forme une hélice semblable. Les deux bouts du gros fil aboutissent en *c* et en *d*, puis avec les électrodes d'une pile, tandis que les deux bouts de l'autre fil *a* et *b* sont mis en communication avec un galvanomètre *G*. Lorsque, en mettant le fil *c* en contact avec la petite colonne, on établit le courant, on voit, *au moment même* où le courant commence, l'aiguille du galvanomètre dévier, indiquant ainsi qu'un courant instantané et de sens inverse s'est développé dans le fil *ab*. Mais cet effet est très court; l'aiguille, après quelques oscillations, reprend sa première position. Si alors on interrompt le courant, un effet analogue se produit: l'aiguille dévie, mais en sens contraire, indiquant que le courant dans le fil *ab* est, cette fois, direct.

La production d'un courant par un aimant se démontre de la même façon à l'aide d'une bobine creuse en bois dans laquelle on enroule un fil de 200 à 300 mètres de longueur. Les extrémités de ce fil sont mis en communication avec le galvanomètre. Si l'on introduit brusquement dans l'intérieur de la bobine un barreau aimanté, ou une barre de fer doux et un aimant, on constate immédiatement, au galvanomètre,

la présence d'un *courant inverse* de très courte durée, et un *courant direct* lorsqu'on retire le barreau.

Ainsi ces courants sont, pour ainsi dire, une troisième espèce d'électricité dans laquelle se trouvent réunies les qualités des électricités statique et dynamique; comme la première, elle lance de longues et foudroyantes étincelles, et, comme l'électricité de mouvement, elle pénètre dans l'intérieur des corps pour les échauffer, les fondre, les décomposer.

La découverte de Faraday donna naissance aux puissantes machines d'induction de Clarke, de Pixii, de Rhumkorff. Les étincelles de cette dernière sont capables de percer des masses de verre de 10 centimètres d'épaisseur, et ont permis de construire des appareils formidables dont la puissance est effrayante, qui enflamment des mines, brisent des montagnes, font éclater ces torpilles sous-marines qui mettent en pièces des navires de guerre.

**MACHINE DE RHUMKORFF.** — La *machine d'induction* de M. Ruhmkorff est remarquable entre toutes, disons-nous, par l'intensité extraordinaire des effets qu'elle peut produire (*fig.* à la page 321). Un fil de cuivre isolé est enroulé en spirale autour d'un faisceau de fil de fer A. L'une des extrémités X de ce fil aboutit à l'un des pôles d'une pile, et l'autre à une couche de mercure recouverte d'alcool; B, le second rhéophore de la pile Y, communique avec une pointe de platine placée au-dessus du mercure. Un autre fil de cuivre isolé, très fin et d'une longueur de plusieurs kilomètres, est enroulé autour d'un cylindre de verre, et forme une grosse bobine C, qui entoure le faisceau de fer A; les extrémités de ce long fil communiquent avec deux conducteurs, isolés par des pieds de verre; c'est le fil induit. Enfin les armatures d'un condensateur électrique D, analogue à la batterie, communiquent, par des fils de métal, respectivement avec le mercure et la pointe de platine de l'interrupteur B. Ce condensateur est habituellement renfermé dans la boîte sur laquelle est placée la bobine. Voici le jeu de l'appareil. Quand la pointe de platine est en contact avec le mercure B, le courant de la pile traverse le fil qui entoure le fer A et aimante celui-ci. Si alors on sépare la pointe de platine du mercure, une étincelle jaillit dans l'alcool à l'interruption et immédiatement les armatures du condensateur D acquièrent les électricités contraires. En même temps, le faisceau de fer A tend à perdre son magnétisme. Les électricités du condensateur se neutralisent par le circuit que forment la pile et le fil du faisceau A, et produisent un courant de très courte durée, qui traverse le circuit dans un sens opposé à celui du courant primitif qu'engendrait la pile. L'effet de ce courant instantané

est de ramener brusquement le fer A à l'état naturel, tandis que, sans ce courant, il y reviendrait dans un temps beaucoup plus considérable.

Pour charger une batterie M, on met l'une de ses armatures en com-



La salle des auditions téléphoniques à l'Exposition d'électricité (page 339).

munication avec l'une des extrémités E du fil induit, et l'on approche l'autre extrémité F à une certaine distance du conducteur G, qui communique avec la seconde armature de la batterie. On réitère alors plusieurs fois l'étincelle dans l'intervalle, en faisant osciller la pointe de platine au-

dessus du mercure B, afin que le circuit voltaïque soit alternativement fermé et ouvert. Après quelques étincelles, la batterie est chargée, et l'on peut la séparer de la machine pour s'en servir.

L'invention de cet appareil valut, en 1864, à M. Rhumkorff le *prix Volta* (page 336). Voici en quels termes M. Dumas décrivait les effets de cet appareil, dans le rapport à la commission chargée de décerner le prix :

« Les effets de la machine Rhumkorff sont populaires. Elle se charge presque instantanément. Son étincelle enflamme les combustibles, fond les métaux et les terres les plus réfractaires, reproduit tous les effets de la foudre, et traverse, sans hésitation, en les perçant, des masses de verre de 10 centimètres d'épaisseur. Autant les chimistes avaient pu étudier avec facilité les effets de la pile de Volta sur les composés solides et liquides, autant il leur avait été difficile de soumettre, soit ces mêmes corps, soit surtout les vapeurs ou les gaz, avec un égal succès à l'action de l'électricité des machines de verre, toujours lente à développer, toujours inégale dans sa production et ses effets. Au moyen de l'appareil Rhumkorff, au contraire, M. Perrot a pu décomposer l'eau en vapeur ; MM. Ed. Becquerel et Frémy ont pu combiner les éléments de l'air et reconstituer à leur aise l'acide nitrique. Si les découvertes de Franklin ont mis hors de doute l'identité de l'électricité et de la foudre, il reste néanmoins dans les phénomènes qui accompagnent les orages bien des circonstances dont l'explication n'est point encore accessible à la science. Aussi doit-on regarder comme une acquisition très digne d'intérêt pour la physique des météores ce fait, que l'étincelle de la machine de Rhumkorff se compose de deux parties distinctes : un trait de feu instantané et une auréole dont la durée est mesurable. L'aimant dévie celle-ci ; un souffle ou un corps en mouvement l'entraîne, et l'étincelle électrique, ainsi partagée, continue sa route dans ces deux directions à la fois, tant qu'on n'interrompt pas le passage du courant voltaïque. Quand on lance l'étincelle électrique entre deux pointes et dans un espace vide (*Électricité statique*, p. 70), il se développe une lumière, on le sait. Mais qu'il y a loin de l'ancienne expérience, si pénible et souvent si douteuse, au spectacle magique déployé par les étincelles de la machine nouvelle éclatant dans des vases vides ou renfermant des gaz plus ou moins raréfiés, tels que les *tubes de Geissler* ! La lumière prend diverses teintes dans les divers gaz ; elle illumine vivement tous les corps fluorescents ; elle se divise en couches parallèles, séparées par des espaces obscurs, perpendiculairement à l'axe des récipients. Ces colonnes lumineuses, colorées, obéissant à l'action de l'aimant qui les attire ou les repousse, et qui leur imprime à volonté ces mouvements de translation ou de rotation, au moyen desquels M. de La Rive a reproduit les apparences et les circonstances observées dans les aurores boréales, justifient ainsi l'analogie qu'on avait reconnue entre les lueurs électriques produites dans le vide et les aurores polaires. Éclairés de la sorte, les tubes de verre répandent une lumière assez vive pour qu'on ait pu les employer : dans les mines où l'on a des explosions à redouter, sous l'eau pour éclairer les plongeurs, en chirurgie pour porter dans l'arrière-bouche et dans



les organes profonds un appareil éclairant qui n'y développe aucune sensation de chaleur. L'électricité se meut avec une vitesse infinie, pour ainsi dire ; mais l'appareil de Rhumkorff, qui fournit si aisément des étincelles capables de percer une bande de papier enroulée sur un cylindre en mouvement, s'adapté bien mieux à marquer le moment où le boulet sort de la pièce d'artillerie et celui où il frappe la mire, et à mesurer par conséquent la vitesse, que les appareils électriques précédemment employés à cet usage extraordinaire.

» L'étincelle de l'appareil de Rhumkorff enflamme les combustibles et fait détoner les mélanges gazeux. Elle a fourni à l'appareil à gaz de Lenoir le moyen régulier nécessaire pour y produire les inflammations périodiques auxquelles elle emprunte sa force mécanique. L'exploitation des carrières, le percement des tunnels, l'explosion des mines à grande charge font aujourd'hui un emploi journalier de l'appareil de Rhumkorff. La sûreté de son jeu et les grandes distances auxquelles il porte l'étincelle capable d'enflammer les amorces permettent d'effectuer sans péril l'explosion des mines qui remuent des masses importantes ou qui brisent des obstacles inaccessibles. On avait déjà enflammé des mines à l'aide de la pile ; mais l'appareil de Rhumkorff a laissé bien loin tous les autres procédés, par le très petit nombre d'éléments qu'il exige, trois au lieu de cent ; par la puissance de son étincelle, qui évite tous les ratés ; enfin par la possibilité qu'il donne, et qui lui est propre, d'enflammer simultanément, d'un seul jet, huit ou dix fourneaux de mines à la fois. Dès 1858, il fut appliqué à dégager les abords de Venise, où un grand nombre de barrages avaient été établis dans les lagunes. En 1860, dans l'expédition de Chine, il fut mis à profit pour faire sauter le fort principal de Peïho, au moyen de huit fourneaux enflammés simultanément, ainsi que les estacades en fer enfoncées au fond du fleuve et dont le poids était assez grand pour en faire un obstacle qui méritait l'attention. »

Depuis le jour où ce rapport a été écrit, d'autres applications importantes ont été faites de la bobine de Rhumkorff. Citons, entre autres, l'inflammation instantanée des fanaux employés dans la télégraphie nautique, la protection des ports et des abords des places fortes par les *torpilles*, que l'on peut enflammer de très loin, etc.

**TÉLÉPHONE.** — Tous les ans, vers le moment des étrennes, l'industrie parisienne livre au commerce des petits jouets bien simples, d'un prix bien modique, qui ont le mérite de la nouveauté, et qui présentent souvent une application ingénieuse d'un principe de physique ou de mécanique. Il y a souvent dans ces jouets le germe des inventions les plus sérieuses et les plus utiles. C'est ainsi qu'en 1875 on vit apparaître le *cordon acoustique* ou *télégraphe à ficelle*. Deux cornets en bois ou en fer-blanc sont fermés, du côté le plus étroit, par un parchemin bien tendu. Les centres de ces membranes sont reliés par un cordon d'une longueur variant entre 2 et

15 mètres. Deux personnes prennent chacune un de ces cornets et s'éloignent l'une de l'autre de manière à tendre parfaitement le cordon. Si, dans ces conditions, l'une des personnes prononce, même à voix basse, quelques paroles dans le cornet qu'elle tient à la main, tandis que l'autre personne place le sien contre son oreille, celle-ci entendra distinctement les phrases qui lui sont adressées. Les vibrations de la voix se transmettent fidèlement d'une membrane à l'autre par l'intermédiaire des cordons. Cela était tout simple, car l'on savait que l'on peut communiquer à travers les solides, et depuis plusieurs années on correspond entre les diverses chambres d'une maison au moyen des tubes acoustiques ; mais les vibrations d'un corps rigide, d'un fil tendu ou d'une colonne d'air ne se propagent que jusqu'à des distances restreintes (*Acoustique*, pages 743, 749 et 762). On savait également (*Électricité dynamique*, page 295) qu'une tige métallique, aimantée et désaimantée rapidement, émet des sons. Ce furent là le prélude de découvertes sérieuses dans la voie de la téléphonie.

En 1847 et en 1852, des *vibrateurs électriques* furent construits par MM. Froment et Petrina, d'après les idées de MM. Mac-Gauley, Wagner, Neef, etc.; mais ce fut en 1854 seulement qu'un physicien français, M. Charles Bourseul, démontra la possibilité de transmettre la parole à distance, sous l'influence de l'électricité. Cette idée ne fut pas prise au sérieux par les savants ; cependant, en 1861, M. Reuss, professeur de physique à Friedrichsdorf, procédait, dans le grand amphithéâtre de physique de l'association de Francfort, à une curieuse expérience découlant des principes publiés par Bourseul. Son appareil était établi dans une salle bien close : à un moment donné, on entendit, au milieu du silence, descendre comme du plafond l'accord d'un harmonium et d'un violoncelle. Les exécutants étaient à 100 mètres de l'amphithéâtre. Les sons avaient été apportés par un fil électrique. Les sons, il est vrai, étaient un peu nasillards et la musique transmise perdait beaucoup de son caractère. Le transmetteur consistait en une grande boîte carrée en bois, fermée sur sa face supérieure par une mince membrane. C'était un tambour carré : Un gros porte-voix est fixé sur une des faces latérales ; on parlait devant son embouchure ; le son, renforcé par la caisse sonore, entrait à l'intérieur et faisait vibrer la membrane. Le mouvement de cette membrane était le point de départ de la transmission. A cheval sur cette membrane était disposée une mince lame de platine oscillant avec elle ; à chaque oscillation, la lame vient buter contre une autre lame métallique en relation avec un fil électrique ; à chaque contact des deux lames un courant électrique passe dans le fil. Les vibrations de la membrane

engendrent les vibrations similaires de la lame, et celle-ci produisait une succession de courants électriques dans le fil télégraphique. A l'arrivée était une espèce de boîte à violon au-dessus de laquelle, en guise de cordes, est installée une tringle en fer ou plutôt une aiguille à tricoter de 0<sup>m</sup>,30 de longueur environ. Autour de l'aiguille, on a enroulé des spires de fil de cuivre isolées les unes des autres par un tissu de soie. Le fil télégraphique du départ aboutit à la spire qui entoure l'aiguille de fer. Les courants électriques lancés dans le fil par l'appareil transmetteur arrivent dans la spire et réagissent sur l'aiguille. Celle-ci se met à vibrer à son tour comme une corde de violon; les vibrations de la membrane de l'appareil transmetteur retentissent ainsi sur l'aiguille du récepteur. La membrane recueille le son, l'aiguille le reproduit. Autant de vibrations au départ qu'à l'arrivée : intervalle entre les sons produits identique d'un côté et de l'autre ; donc, transmission automatique parfaite des éléments qui constituent la mélodie, la justesse de la note, sa hauteur, combinées à la mesure ; c'est le même rythme : malheureusement, c'est toujours le même timbre.

En 1874, Elisah Gray, physicien américain, construisit un appareil de beaucoup supérieur au précédent ; mais cet appareil ne produisait encore que des sons musicaux, la *musique galvanique* ; il restait à découvrir la transmission de la parole, c'est-à-dire le *téléphone*.

Ce fut M. Graham Bell, d'Édimbourg, naturalisé Américain, qui trouva la solution de ce problème. M. Bell habite les États-Unis depuis 1870 ; son père, Alexandre Melville Bell, physicien distingué, était parvenu, dit-on, à reproduire artificiellement la disposition du larynx humain. Son fils se joignit à lui pour continuer ses recherches, en profitant des travaux de Helmholtz. Les résultats que l'un et l'autre obtinrent dans l'enseignement des sourds-muets, à l'aide de leurs appareils, avaient été assez remarquables pour que leur réputation fût devenue fort grande. On raconte que M. Bell s'appliqua à faire parler une jeune fille sourde-muette, sa pupille, et qu'il y parvint après deux mois d'un enseignement persévérant. Il songeait déjà à son *téléphone*, et il témoignait quelquefois de sa confiance dans l'avenir ; il ne recueillait le plus souvent que des sourires d'incrédulité. « Soit, répliquait-il, nous verrons : j'ai fait parler des sourds-muets ; je saurai bien donner la parole au fer. »

La construction d'un *harmonica électrique à clavier* fut le premier résultat de l'application de l'électricité aux instruments d'acoustique. M. Graham Bell voulut ensuite faire rendre des sons aux télégraphes électriques Morse, par l'effet d'un aimant artificiel agissant sur des contacts sonores. Ce système était déjà usité dans la télégraphie ; M. Graham

Bell voulait l'appliquer à son harmonica, en faisant usage d'appareils renforceurs. Mais cette idée se trouva encore réalisée par d'autres. Il s'occupa spécialement alors de nouvelles recherches, et, en 1876, on vit, à l'exposition de Philadelphie, le premier modèle du *téléphone*.

Le *téléphone* de Bell, qui peut être considéré comme le type de tous ceux qui ont été construits depuis, se compose (*fig. 121*) d'une boîte circulaire en bois, portée à l'extrémité d'un manche M également en bois, et renfermant dans son intérieur un barreau aimanté NS. Une vis *t* peut faire avancer ou reculer ce barreau, suivant qu'on la tourne dans un sens ou dans l'autre, de façon à pouvoir régler l'instrument. Le barreau porte à son extrémité une bobine magnétique B, dont les bouts du fil aboutissent à deux tiges de cuivre *ff*, traversant le manche et qui viennent se relier aux deux boutons d'attache II, où sont fixés les fils CC du circuit. Ordinairement, les

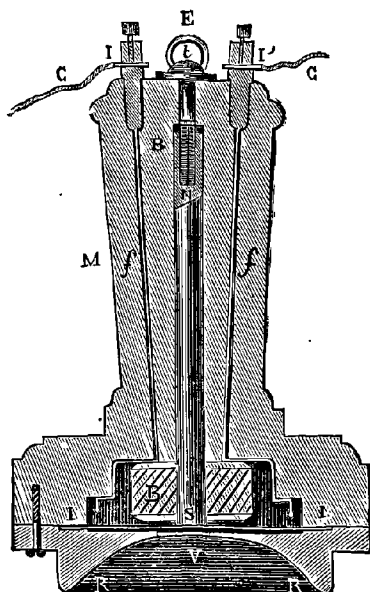


Fig. 121. — TÉLÉPHONE BELL.

deux fils CC sont réunis en torsade, et, traversant un petit capuchon en bois, vissé sur le bout du manche, ils viennent s'attacher directement aux tiges *ff*; de sorte qu'on n'est pas gêné pour la manipulation. En face de l'extrémité polaire du barreau aimanté est placée la lame vibrante en fer LL, très mince, et recouverte, soit de vernis, soit d'étain. Les bords de cette lame, qui a la forme d'un disque, appuient sur une bague en caoutchouc, et elle est fortement fixée sur les bords de la boîte en bois par l'embouchure qui est maintenue au moyen de quelques vis. L'embouchure RR, par laquelle on parle, a la forme d'un entonnoir évasé, et porte en son milieu un trou V. La lame vibrante doit être rapprochée du barreau aimanté, sans qu'elle puisse cependant le toucher sous l'influence des vibrations de la voix. D'un autre côté, il doit exister un certain vide entre la lame et les bords du trou V, et l'intérieur de la boîte doit être bien sonore. Pour se servir du téléphone, il suffit de parler nettement, en articulant bien distinctement, dans l'embouchure du téléphone que l'on tient à la main, pendant que l'auditeur, placé à la station correspondante, tient contre son oreille l'embouchure du téléphone récepteur. Il est plus commode d'avoir à sa disposition deux

téléphones à chaque station, afin de parler dans l'un pendant qu'on tient l'autre à l'oreille pour entendre la réponse. Enfin le téléphone peut se faire entendre à plusieurs auditeurs, en établissant, près du téléphone récepteur, des dérivations aboutissant à divers téléphones.

Comment expliquer les effets du téléphone ? dit M. Figuié ; quelle théorie faut-il en donner ? L'état actuel de la science ne permet de répondre à cette question que sous la forme dubitative. On a cru d'abord que la transmission de la parole pouvait s'expliquer par les vibrations ou oscillations déterminées dans la lame vibrante attirée par l'aimant. C'est la théorie avec laquelle on explique le mécanisme ; mais le phénomène est certainement plus compliqué. On a, en effet, reconnu que la lame vibrante peut avoir des dimensions considérables, qu'elle peut être aussi grosse qu'une enclume. Il a donc fallu admettre que c'est la partie interne du métal, le noyau, qui entre en vibration, et non toute la masse. Dès lors, cette transmission ne résulterait pas uniquement de la répétition par la membrane du récepteur des vibrations formées par la voix sur la membrane du transmetteur. La lame vibrante ne réagirait que pour produire des *courants induits*. Une fois mise en action par la voix, elle renforcerait, par sa réaction sur l'extrémité du barreau aimanté, les effets magnétiques de ce barreau. Les sons paraissent donc produits dans le noyau magnétique, c'est-à-dire dans l'intérieur du métal, sous l'influence d'effets électriques intermittents. Toutefois, rien n'est moins certain encore ; car on a construit, en 1879, des téléphones dans lesquels on avait supprimé toute lame vibrante.

Comme tous les inventeurs, M. Graham Bell eut à subir des attaques passionnées. On lui disputa la priorité de son invention ; mais il a été établi, par plusieurs enquêtes faites à ce sujet, que, dès l'année 1874, M. Bell s'occupait de la transmission électrique de la parole. A cette époque, il écrivit plusieurs lettres sur ce sujet à des amis, et continua ses expériences pendant toute l'année 1875. Au mois de septembre de cette année, il songea à prendre des brevets dans les différents États d'Amérique et d'Europe ; mais, par suite de diverses causes, ce brevet ne put être déposé officiellement que le 14 février 1876, juste deux heures avant le dépôt du brevet de M. Elisah Gray pour un appareil semblable. Quoi qu'il en soit, les enquêtes ont démontré que M. Bell est le premier qui ait pu faire parler les téléphones et qui ait résolu ce problème d'une manière pratique.

Depuis 1876, des perfectionnements importants ont été apportés au téléphone Bell ; de nombreuses imitations ont surgi ; mais l'honneur de la découverte appartient à M. Graham Bell, et, en 1880, l'Académie des

sciences l'a consacré, en accordant à l'inventeur américain le *prix Volta* (1).

Le rapport de la commission, composée des hommes les plus éminents, chargée d'examiner les titres des candidats à ce prix, fut fait par M. Becquerel. Il nous semble bon de consigner ici le texte même de ce rapport, daté du 29 décembre 1879, document qui résume admirablement les dispositions générales du téléphone de Bell.

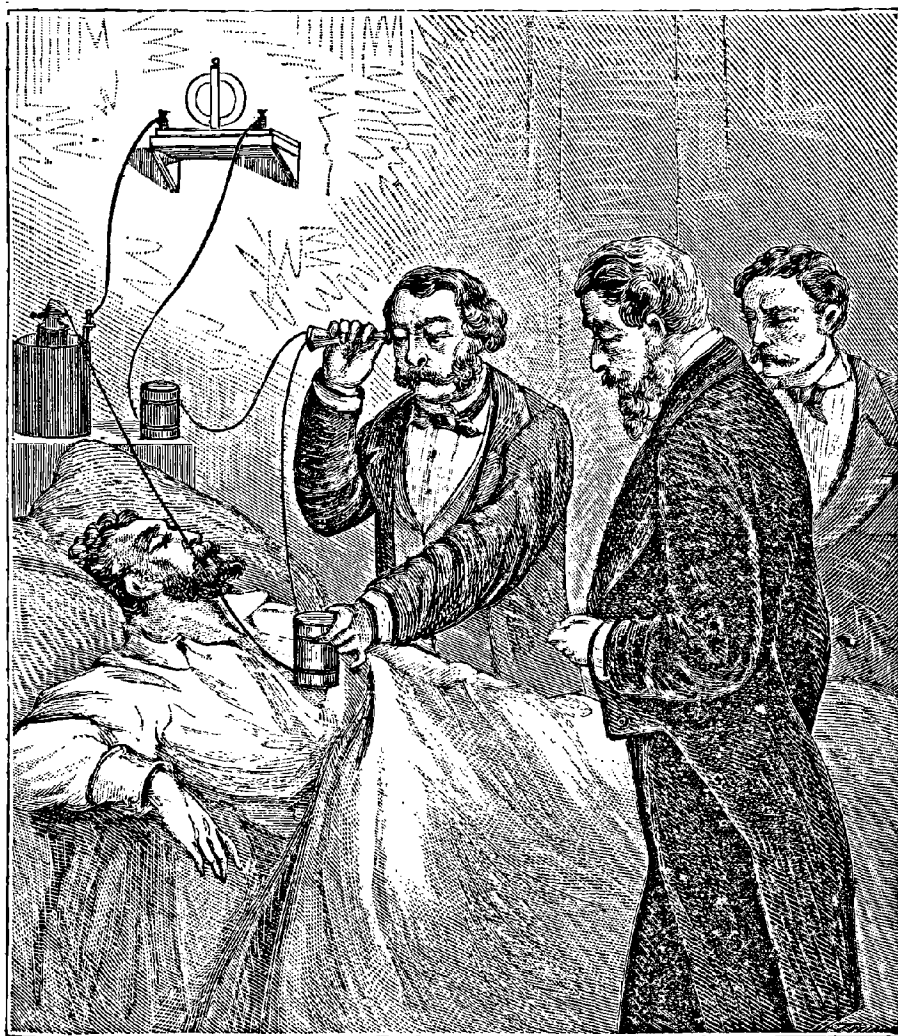
« Depuis l'année 1864, où le grand prix a été décerné à M. Rhumkorff pour l'appareil d'induction électro-magnétique portant son nom, l'électricité a été le sujet d'importantes recherches et d'applications très diverses ; mais aucune de ces applications n'a présenté autant d'originalité que le téléphone magnéto-électrique imaginé en 1876 par Graham Bell, et permettant la transmission télégraphique de la parole à de grandes distances.

» Supposons, à deux stations éloignées l'une de l'autre, deux appareils identiques faisant partie du même circuit télégraphique de fils conducteurs de l'électricité, dont l'un sert de transmetteur et l'autre de récepteur ; ces appareils sont des petites bobines entourées de fils conducteurs, contenant chacune à l'intérieur un barreau aimanté. Tout près de l'un des deux pôles ou des deux pôles de chaque aimant, suivant la forme de celui-ci, se trouve une petite lame de fer très mince soutenue par ses bords et servant d'armature à l'aimant, mais sans le toucher ; ces petites lames doivent être assez mobiles pour entrer en vibration sous l'influence des sons extérieurs qui viennent les frapper.

» Dès que les positions de ces armatures sont parfaitement réglées, il suffit de produire un son près de l'une d'elles, près de celle du transmetteur par exemple, pour que cette petite plaque entre en vibration, et que le même état vibratoire se produise dans la plaque du récepteur ; les vibrations de cette dernière sont alors transmises à l'air, puis à l'oreille de l'observateur convenablement placé. Bien plus, si l'on parle dans le voisinage de la plaque vibrante du transmetteur, les sons dont la coexistence et la succession forment la parole donnent également lieu, dans le récepteur, à un état vibratoire identique, malgré sa complexité, et les intonations et les articulations si délicates de la voix se trouvent reproduites comme les sons simples. Tel est, en résumé, le téléphone de M. Graham Bell.

(1) Ce fut Bonaparte, alors premier consul, qui, le 26 prairial an X, institua un prix de 3,000 francs pour la meilleure expérience qui aurait été faite dans l'année sur le fluide galvanique. Un encouragement de 60,000 francs devait être accordé à celui qui, par ses expériences et ses découvertes, aurait fait faire à l'électricité ou au galvanisme un grand progrès. Le premier concours eut lieu en 1806, et le prix Volta de 3,000 francs fut attribué à Erman, de Berlin. En 1807, le prix fut décerné à Davy ; en 1809, à Gay-Lussac et Thenard. Ce prix fut supprimé par Louis XVIII en 1816. Jusqu'alors l'Institut n'avait trouvé aucune découverte qui lui parût mériter l'encouragement de 60,000 francs. Le 23 février 1852, Louis-Napoléon, qui se piquait d'amour pour la science, institua un prix de 50,000 francs pour tout auteur de la découverte qui rendrait la pile de Volta applicable avec économie, soit à l'industrie, soit à l'éclairage, soit à la chimie, soit à la mécanique, soit à la médecine pratique. En 1864, ce prix fut accordé à Rhumkorff. Rétabli en 1871 par M. Thiers, le grand prix Volta a été attribué, en 1880, à M. Bell.

» Les phénomènes d'induction qui donnent lieu à cette reproduction à distance des mouvements vibratoires sont des plus remarquables et constituent un fait scientifique nouveau; ils indiquent une mobilité dans l'état magnétique de l'aimant du transmetteur en rapport avec les mouvements très complexes communiqués à



Recherche des projectiles dans les blessures, au moyen de l'appareil G. BELL (page 342).

son armature mobile et peut-être à diverses parties du transmetteur lui-même par des vibrations sonores, successives ou simultanées. Cette variation continue dans l'état magnétique de l'aimant donne lieu, par influence, dans le fil de la bobine au milieu de laquelle il se trouve, à des courants induits, qui, à l'aide des

fil conducteurs, reproduisent, par réversion dans la bobine et dans l'aimant du récepteur, des états électriques et magnétiques semblables à ceux du transmetteur; de là résultent des vibrations dans le récepteur donnant à l'observateur les sensations acoustiques qu'il aurait eues naturellement près du transmetteur sans l'intervention de l'appareil.

» Dans les conditions normales de l'audition, les vibrations simples ou multiples, quelque complexe que soit le mouvement vibratoire, se propagent du point de départ des vibrations jusqu'à l'oreille, par l'intermédiaire des milieux interposés, solides, liquides ou gazeux, mais avec diminution d'intensité lorsque la distance augmente. Dans certaines conditions cependant, la déperdition du son est très faible : tel est le cas des tuyaux acoustiques; néanmoins, avec ce mode de communication, on ne peut dépasser une certaine limite de distance assez restreinte pour transmettre les sons et, en outre, même pour les lieux voisins, les tuyaux acoustiques ne se prêtent pas, comme les fils télégraphiques, aux circonstances variées d'installation des appareils. Avec le téléphone, les changements dans l'état électrique du transmetteur permettent aux fils conducteurs de jouer le rôle intermédiaire pour la transmission acoustique, et celle-ci peut s'effectuer jusque dans le lieu où le fil télégraphique vient produire les effets d'induction avec une intensité suffisante. C'est là un mode d'emploi de l'électricité qui est des plus remarquables. De nombreuses et très intéressantes recherches ont été faites au moyen des appareils téléphoniques, qui ont reçu diverses modifications, et dont le télégraphe électrique a pu profiter. Mais bien des questions restent encore à étudier, notamment en ce qui concerne l'augmentation de puissance des instruments, ainsi que leur portée à des distances plus grandes que celles où l'on est parvenu jusqu'ici.

» La Commission, reconnaissant la nouveauté du résultat, l'originalité de l'invention et la simplicité des appareils qui permettent la transmission de la parole à de grandes distances, propose de décerner le prix Volta à M. Graham Bell, professeur de physiologie vocale à l'Université de Boston, pour son téléphone magnéto-électrique articulante. »

Depuis que le téléphone Bell a été apporté en Europe, beaucoup de physiciens ont essayé de le perfectionner, avons-nous dit : MM. Bréguet ont construit un téléphone-montre; M. Trouvé en a construit un également portatif; celui d'Elisah Gray, de Chicago, a été perfectionné par M. Fheps; M. Edison en a imaginé un autre à longue portée. Parmi tous, nous citerons celui de M. Adler, qui eut tant de succès à l'*Exposition d'Électricité* de 1881, et qui est employé par la Compagnie générale des téléphones de Paris. La figure montre cet instrument en coupe et en projection horizontale. AA représentent (*fig. 122*) les crayons de charbon, au nombre de dix, reposant sur des traverses BCD en charbon, où des trous ont été pratiqués pour les recevoir. Ces charbons ont une position



horizontale et se trouvent placés au-dessus d'une planche de sapin qui est mise en mouvement par la voix; ils remplacent l'ancienne embouchure. Cette modification a été adoptée par nombre d'inventeurs; elle est heureuse. Le courant arrive par la borne B et sort par la borne D, et il a besoin d'être très actif.

Pendant l'*Exposition d'Électricité*, on fit fonctionner publiquement pour la première fois ce téléphone communiquant avec l'Opéra. Les auditions se donnaient, sans intermittence, dans deux salles jumelles contenant chacune vingt-quatre sièges (*fig.* à la page 329), et dans lesquelles, par un seul mouvement de commutateur, le courant téléphonique était alternativement amené pendant cinq minutes, sans que les artistes de l'Opéra pussent supposer que tantôt ils se faisaient entendre dans la salle A, et tantôt dans la salle B. Le commencement des auditions était indiqué par un avertisseur téléphonique, mis en mouvement par le bureau central du grand salon. Celui-ci était en rapport téléphonique avec l'administration de l'Opéra, de sorte qu'il en recevait continuellement

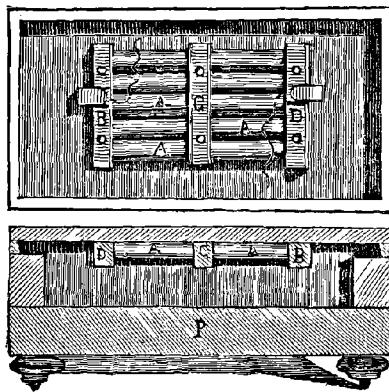


Fig. 122. — TÉLÉPHONE ADLER.

tous les avis nécessaires. Il était averti du commencement et de la durée des entr'actes, et il transmettait cet avis au chef des auditions, qui les donnait à son tour au public. Pendant les cinq minutes de l'audition, il régnait un grand silence, interrompu cependant par les cris de surprise arrachés aux habitués de l'Opéra, qui reconnaissaient leurs acteurs favoris. Les applaudissements surtout étaient faciles à entendre, même sans avoir l'oreille appliquée au téléphone. Les cinq minutes écoulées, le directeur des auditions tournait un commutateur qui mettait fin au miracle. Le désappointement des auditeurs était vif; les cornets tombaient des mains désenchantées, et l'on se retirait généralement en silence, comme si l'on tenait à conserver le souvenir des impressions que l'on avait éprouvées. Voici comment un critique musical compétent, M. Pillaut, rend compte de ses impressions pendant les cinq minutes d'audition :

« Ce qui est extraordinaire, c'est que la musique est perçue, non seulement avec toutes les hauteurs de sons et les rythmes qui constituent les phrases musicales, mais encore avec les timbres des voix et des instruments qui les accompagnent. Si l'on pouvait éliminer le grondement des machines, qui remplit le palais de

l'Exposition et qui pénètre dans la salle des auditions, et si l'on vous laissait écouter pendant assez longtemps, on finirait par avoir la perception complète de la représentation. Ce qui est cause de cette fidélité de reproduction musicale, c'est qu'aucun des rapports si multiples des sons d'un grand orchestre et de voix nombreuses n'est altéré par la transmission du téléphone, et que l'oreille rétablit bientôt les sensations auditives dans leurs vraies dimensions. Pendant les cinq ou six minutes qu'il nous a été permis d'écouter dans le téléphone de l'Exposition, nous avons entendu deux fragments du second acte du *Prophète*. Dans le premier de ces fragments, se trouvait l'air de Fidès : *O mon fils ! sois béni...* — malheureusement interrompu par le coup de sonnette qui règle le temps de l'audition. Durant toute la première période de cet air, la voix de la chanteuse s'entendait aussi bien que dans la salle même, et les paroles aussi distinctement que si l'on avait été tout près d'elle, avec cependant la sensation du son venant comme si on lui tournait le dos. Le timbre des instruments qui l'accompagnaient se reconnaissait parfaitement, surtout celui des instruments à vent ; particulièrement un accord donné par le hautbois, la clarinette et le basson, qui relie l'air au récit précédent, s'est détaché par-dessus les autres. Peut-être y a-t-il certaines harmonies et certains timbres, dont la constitution sonore est mieux que d'autres en rapport avec la petite plaque de métal qui sert de tympan au téléphone. Quant à la netteté de la parole et du chant, elle est complète. C'est grâce à cela qu'on devine parfaitement la position des personnages chantant sur le plancher de la scène, par la plus ou moins grande intensité de leur voix. Cette perspective sonore est même plus accusée que dans la salle, et doit être à peu près celle qui existe près du souffleur, c'est-à-dire que la voix des chanteurs qui s'approchent de la rampe, près des récepteurs du téléphone, résonne proportionnellement beaucoup trop fort, par rapport aux voix qui sont plus loin. Dans ce cas, on entend non seulement le chant très fort, mais aussi toutes les inflexions involontaires du gosier, comme le chevrottement et même l'aspiration brusque de l'air. Le téléphone manque d'indulgence ; les intervalles faux, si fréquents dans les morceaux d'ensemble, s'y font sentir plus cruellement encore que dans l'audition directe. »

Pour ces auditions, il existait des *microphones* (page 344) de chaque côté de la rampe de l'Opéra : les récepteurs étaient divisés en dix séries, de quatre chacune ; chaque *microphone* correspondait à quatre téléphones, placés en tension, destinés chacun à l'oreille droite d'un auditeur, et le microphone symétrique à quatre téléphones destinés à l'oreille gauche. Le récepteur était le téléphone Adler à surexcitateur. Le courant était fourni à chaque microphone par quinze éléments Leclanché fonctionnant successivement par série de trois ; la bobine intercalée dans le circuit avait un circuit inducteur dont la résistance était 1 *ohm*, et un circuit induit de 150 *ohms*. Chaque bobine du récepteur avait une résistance de 40 *ohms*, dont la résistance totale est de 80 *ohms*.

La diffusion du système téléphonique marche avec une rapidité incroyable dans tous les pays civilisés. En Amérique, des compagnies se sont formées dans toutes les villes, et la plupart des cités industrielles d'Angleterre comptent un ou plusieurs réseaux téléphoniques. La corporation de la ville de Leicester a établi entre toutes les stations de police un système de téléphones. Les téléphones d'incendie, organisés à Berlin, ont donné des résultats si avantageux que la municipalité s'est décidée à en augmenter le nombre. En 1881, la téléphonie parisienne comprenait quatre bureaux et 1,800 kilomètres de câble, se décomposant en 1,236 kilomètres de câble à 7 lignes et 469 de câble à 1 ligne, soit un développement de 9,121 kilomètres. Le développement des fils était de 18,242 kilomètres, puisque chaque ligne est double et comprend l'aller et le retour. Des perfectionnements notables sont tous les jours introduits. Ainsi, une difficulté commune à tous les genres de téléphones, quelle que soit leur forme, a été, sinon entièrement, au moins en grande partie, supprimée. Cette objection à leur emploi pour les usages de la vie quotidienne, c'est que, par suite de l'induction des fils voisins, les transmissions seraient confuses : les sons arriveraient au récepteur, non plus simples, comme au départ, mais altérés par l'intervention des bruits étrangers dus au passage des courants extérieurs. Or, une suite d'expériences a démontré que le trouble produit par le phénomène de l'induction peut être suffisamment atténué dans la pratique en augmentant la sensibilité de l'appareil, de manière que les sons spécialement envoyés puissent être entendus à une distance à laquelle les bruits secondaires ne sont plus perçus. A Paris, tous les fils sont doubles, pour éviter l'induction.

En dehors de son usage spécial, le téléphone est appelé à d'autres précieuses applications ; citons-en quelques-unes :

On se rappelle qu'il y a quelque temps le vapeur français *la Provence*, à la suite d'une collision, sombra dans le Bosphore. A propos du renflouement de ce navire, on vient d'apporter aux scaphandres (*Pesanteur*, page 320) un utile perfectionnement. Une des glaces du casque est remplacée par une plaque en cuivre dans laquelle est enchâssé un téléphone, de sorte que le scaphandrier n'a qu'à tourner légèrement la tête pour recevoir des instructions de l'extérieur et pour rapporter ce qu'il voit. On conçoit combien cette invention évitera de perte de temps, puisque l'on ne sera plus obligé de faire remonter le plongeur toutes les fois qu'on aura quelque chose à lui dire. D'un autre côté, le plongeur, en cas de danger ou d'indisposition, au lieu de la cloche d'alarme, trop souvent insuffisante, pourra signaler tous les dangers, et ses appels seront bien compris.

Dans les houillères de Bosbeck, en Angleterre, le téléphone est em-

ployé pour mettre en rapport les travailleurs des galeries, les hommes chargés des machines et de la ventilation, avec les bureaux situés à la surface de la terre.

On sait combien la recherche des projectiles, qui peuvent se trouver accidentellement dans le corps humain, présente de difficultés pour l'opérateur et de souffrances pour le patient. M. Graham Bell a imaginé un appareil, présenté à l'Académie des sciences le 21 octobre 1881, et qui simplifie singulièrement cette recherche. L'instrument, qui dispense de toute sonde métallique, se compose essentiellement de deux bobines plates, parallèles, et en partie superposées l'une à l'autre, de manière que le bord de chacune d'elles passe auprès de l'axe de l'autre. L'une de ces bobines, formant le circuit primaire, est faite de fil gros, tandis que l'autre, formant le circuit secondaire, est faite de fil beaucoup plus fin. L'ensemble des deux bobines est logé dans l'intérieur d'une planchette en bois et noyé dans une masse de paraffine; l'appareil est muni d'une poignée pour en faciliter la manœuvre à l'opérateur. La première bobine est traversée par un courant vibratoire provenant d'une pile, tandis que le circuit de la seconde bobine comprend un téléphone ordinaire. Aucun son ne sera perçu dans le téléphone tant que l'appareil ne sera pas approché d'un corps métallique; mais si la partie commune aux deux bobines est rapprochée d'un corps métallique quelconque, le téléphone fera aussitôt entendre un son dont l'intensité dépendra non seulement de la distance, mais encore de la nature et de la forme de ce corps métallique. L'expérience fut d'abord pratiquée sur le colonel Clayton, blessé en 1862 d'une balle qui était restée juste au-dessous de la troisième côte, et que l'on supposait recouverte par l'os scapulaire (*fig.* à la page 337). La recherche de ce projectile, exécutée dix-huit ans après l'époque de la blessure, eut un plein succès, et M. Hopkins, au moyen de l'appareil de M. Graham Bell, a exécuté, avec le même succès, l'opération sur la personne du président Garfield, récemment assassiné à Washington (1).

Les *téléphones* n'étant, à proprement parler, que des machines *ma-*

(1) M. Trouvé a imaginé un instrument qui, s'appuyant sur d'autres principes, arrive à un résultat aussi précieux. Cet instrument, appelé *polyscope*, est destiné à porter l'inspection directe, au moyen de la vue, dans les parties jusqu'ici impénétrables aux regards. S'agit-il, par exemple, d'une plaie faite à la guerre, un stylet indique immédiatement, au moyen d'une sonnerie électrique, s'il existe des corps métalliques provenant de balle et d'obus, etc. Le polyscope se compose d'une sonde œsophagienne ordinaire, au bout de laquelle est renfermé un fil de platine qui doit rougir sous l'influence de l'électricité. La sonde ayant été introduite, par exemple, dans l'estomac d'un animal, on fait passer le courant dans le fil métallique, et l'on projette, à l'aide d'un réflecteur, une vive lumière extérieure sur une partie de l'estomac. L'opérateur a l'œil fixé à l'autre extrémité du tube, et il peut voir, grâce à l'éclairage intense donné par le fil de platine rougi, les différentes parties de l'organe.

*gnéto-électriques* consacrées à un usage spécial, il en résulte que, comme pour toutes les machines magnéto-électriques, l'âme de cet appareil est l'aimant artificiel que surmonte la bobine induite ; aussi la valeur du téléphone est-elle intimement liée à la valeur de l'aimant. M. Trouvé encore s'est donc proposé de rechercher une méthode de fabrication permettant d'obtenir des aimants puissants et toujours identiques les uns aux autres.

Voici comment il résume ses travaux dans une note du 8 août 1881 à l'Académie des sciences :

« Mes recherches ont porté sur trois points : obtenir un moyen de reconnaître le meilleur acier pour la fabrication de barreaux aimantés ; déterminer le degré de trempe le plus convenable ; choisir le procédé d'aimantation le plus simple et le plus pratique. J'ai d'abord essayé un grand nombre d'aciers, non seulement de provenances différentes, mais encore, pour chaque provenance, de qualités et de numéros différents. Après les avoir coupés de longueur, je les ai aimantés ; j'ai mesuré leur force portante, puis ensuite ils ont été trempés tous de la même manière et de nouveau aimantés. Leur force portante, mesurée après cette nouvelle aimantation, m'a permis de reconnaître : 1° que les meilleurs aciers, au point de vue de la fabrication des barreaux aimantés, étaient ceux d'Allevard, ce que l'on savait déjà d'ailleurs ; 2° que les forces portantes déterminées après les deux aimantations sont liées par une loi simple. Elles sont entre elles comme  $n : n^2$  ; c'est-à-dire que si la force portante due à la première aimantation est représentée par 2, 3, 4, la force portante due au magnétisme à saturation sera 4, 9, 16. J'ai donc, d'une manière méthodique, obtenu un procédé pratique de classification des aciers. En ce qui concerne la trempe, j'ai fait de nombreux essais et j'ai reconnu qu'une trempe régulière était nécessaire. Comme je ne pouvais m'astreindre à faire moi-même cette opération, j'ai installé un moufle chauffé par le moyen du gaz, à une température parfaitement constante, et dès lors il m'a été possible d'opérer industriellement et de confier le travail de la trempe à un simple manœuvre. Quant au procédé d'aimantation en lui-même, il est simple et rapide. Les barreaux à aimanter sont placés dans deux solénoïdes juxtaposés ; le circuit magnétique est fermé au moyen de deux plaques de fer doux, et je fais passer à deux reprises différentes le courant d'une pile genre Wollaston de six éléments. En opérant ainsi, j'obtiens des aimants d'une force constante et relativement considérable. Mes aimants droits portent jusqu'à 12 fois et même 14 fois leur poids, et si l'aimant est recourbé en fer à cheval, la charge peut être quadruplée. »

Dans son numéro du 23 mars 1882, la revue scientifique l'*Électricité*, que nous avons déjà citée, présente quelques considérations sur la construction des réseaux téléphoniques, qu'il nous semble bon de reproduire :

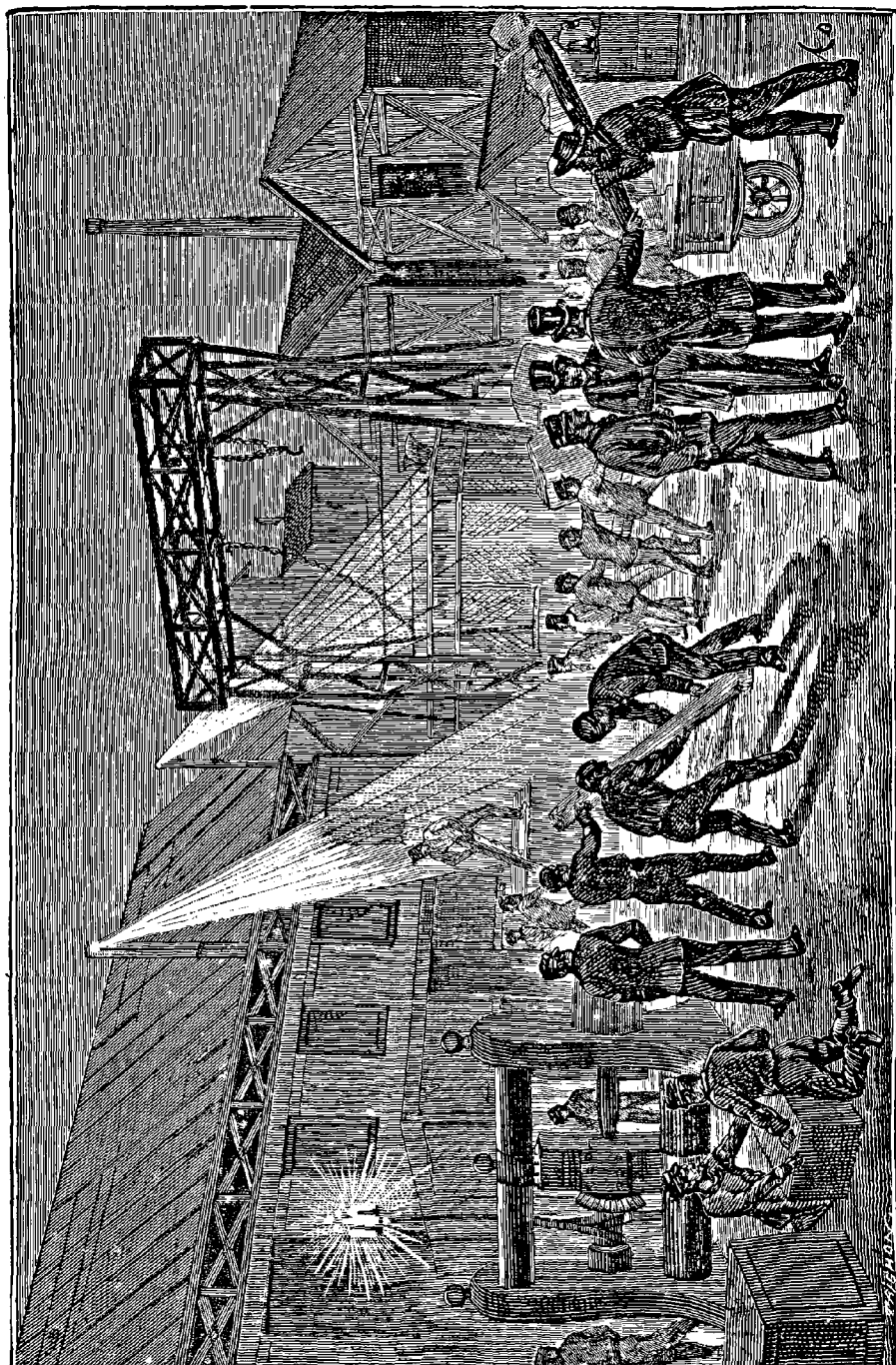
« Le meilleur système est celui des fils disposés en câble souterrain. Les câbles souterrains sont quelquefois trop dispendieux, particulièrement dans les

villes où il n'existe pas d'égouts : il faut alors construire des lignes aériennes, avec la terre pour fil de retour. Pour les lignes aériennes, deux systèmes sont en présence : le premier, de passer sur les maisons, doit être abandonné, parce que l'entretien ou les modifications à faire à ces lignes sont une source de dépenses et de difficultés pour obtenir des propriétaires les autorisations nécessaires. L'installation des potelets sur les maisons est souvent très dispendieuse, soit par les échafaudages, soit par les exigences des propriétaires. Comme il ne convient pas vis-à-vis de ceux-ci d'entrer dans la voie des redevances, ils en profitent, pour retirer une autorisation donnée, lorsque les supports sont en place. Le deuxième système de lignes aériennes consiste à établir des potelets en façade sur des bras de fer à 7 mètres au-dessus du sol, s'avancant de 1<sup>m</sup>,80 sur la voie, parce qu'il faut éviter que les locataires puissent facilement toucher aux fils. Les fils doivent être au moins à 0<sup>m</sup>,30 d'écartement pour que l'induction ne soit pas trop forte. Les épissures doivent être toutes soudées. Il faut employer du fil d'acier galvanisé, qui se fabrique à Manchester spécialement pour les lignes téléphoniques. Il peut coûter, rendu à Paris, 130 francs la tonne; le millimètre se rompt à 146 kilogr. ; le fil de 0<sup>m</sup>,0018 est suffisant. A chaque point d'appui, il faut garnir le fil de sourdines. Un moyen qui a parfaitement réussi consiste à envelopper le fil avec de la toile caoutchoutée, sur 0<sup>m</sup>,50 en avant et autant en arrière de l'isolateur.

» L'entrée du fil de ligne dans le poste doit se faire par le trajet le plus court, avec un petit câble recouvert de plomb. Ce câble doit relier la ligne directement à l'appareil. Si, au lieu du fil de retour, on a un fil de terre, il faut l'établir avec beaucoup de soin, afin qu'il ne puisse jamais être une cause d'interruption. Tous les appareils, ainsi que la boîte renfermant la pile, doivent être disposés convenablement sur un panneau en bois. Le monteur arrivera chez l'abonné avec son panneau tout monté, il n'a qu'à fixer au panneau les fils de ligne et de terre, placer trois crochets tamponnés auxquels il accroche le panneau, et le poste se trouve installé en une demi-heure. »

**MICROPHONE.** — A peine le bruit que venait de faire en Europe l'invention du téléphone, en 1877, se dissipait-il un peu, que M. de Moncel présentait à l'Académie des sciences de Paris un bien curieux appareil, imaginé en Angleterre par M. Hughes, l'inventeur du télégraphe qui porte son nom (page 310). Cet appareil, complément du téléphone, reçut le nom de *microphone* (du grec *micros*, agrandir ; et *phonè*, voix).

Le *microphone*, qui n'est, à proprement parler, qu'un amplificateur de sons, se compose (*fig.* 123) de deux cubes de charbon, adaptés sur un prisme vertical de bois, et entre lesquels un crayon de charbon, en forme de fuseau, est tenu très librement dans deux trous pratiqués dans les cubes qui, munis de contacts métalliques, sont mis en rapport avec le circuit d'un téléphone, dans lequel est interposée une pile de un ou deux éléments Leclanché. Pour se servir de l'appareil, on place la planche qui



La gare de La Chapelle éclairée par la lumière électrique (page 347).





lui sert de support, sur une table, en ayant soin d'interposer, entre la planche et la table, un corps élastique pour amortir les vibrations étrangères. Il suffit alors de parler dans le système, même à une distance de plusieurs mètres, pour qu'aussitôt la parole soit reproduite dans le téléphone; si l'on place sur la planche-support une montre ou une boîte renfermant une mouche, par exemple, tous les mouvements sont parfaitement entendus, à tel point que les pas de la mouche produisent la sensation du piétinement d'un cheval; le frôlement d'une barbe de plume sur la planche s'entend d'une façon assez nette dans le téléphone. Enfin le moindre bruit, imperceptible à l'oreille, est perçu très distinctement, pourvu qu'on ait soin de prendre quelques précautions, dont la principale est le réglage de la position du crayon de charbon.

L'explication du phénomène est facile. Il se produit des vibrations, qui déplacent le crayon de manière à le faire frotter dans les godets par ses pointes, mais sans interrompre son contact. De là résultent des variations de résistance dans le circuit, et dans l'attraction du barreau aimanté sur le disque en fer du téléphone. Celui-ci répète alors, en les amplifiant, les mouvements du crayon.

Le *microphone* a reçu depuis de nombreux perfectionnements, et tous les jours encore de nouveaux constructeurs en offrent des modèles différents.

**LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.** — La lumière électrique, depuis quelques années, a fait tant de progrès, sa clarté est si intense et son entretien si commode, qu'on a reconnu qu'elle offrait de grands avantages pour l'éclairage des grandes salles, qui nécessitent un nombre considérable de becs de gaz. Aussi, dès 1875, la compagnie des chemins de fer du Nord appliquait-elle l'éclairage électrique. Le travail de nuit qui s'exécute à la gare de La Chapelle est très important, et sa durée va jusqu'à 15 et 16 heures en hiver. Pour remédier à l'insuffisance de l'éclairage au gaz, la Compagnie du Nord s'est décidée à essayer l'éclairage électrique. L'installation se composait de 5 machines magnéto-électriques, système Gramme,

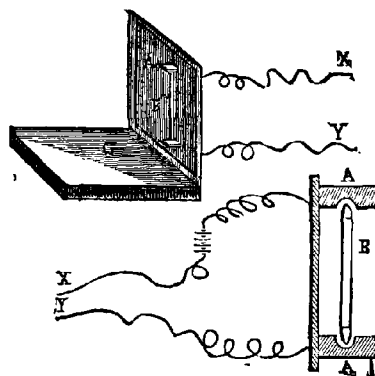


Fig. 123. — MICROPHONE HUGHES.

AA. Supports en graphite. — C. Planchette.  
— XY. Rhéophores de la pile. — D. Téléphone récepteur.

du type de 100 becs Carcel, consommant en moyenne  $2/3$  chevaux-vapeur, et coûtant 1,500 francs l'une. On a constaté que, dans les conditions où l'on a établi les lampes, chacune d'elles, placée à 6 ou 7 mètres de hauteur, produit, dans un rayon de 60 mètres au moins, un éclairage suffisant pour effectuer rapidement et sûrement la manœuvre des wagons (*fig.* à la page 345). Chacune des quatre lampes, en service pendant 10 heures en moyenne, revient à 0 fr. 556 par heure. Si l'on tient compte de l'intérêt et de l'amortissement, ce prix ressort à 0 fr. 80, c'est-à-dire au prix de 22 becs à gaz brûlant 120 litres par heure, au tarif actuel de 0 fr. 30 par mètre cube. La Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée adopta, en 1877, les appareils de la société Lontin, pour éclairer dans cette gare la halle des messageries de grande vitesse. La dépense totale s'élève par bec et par heure à 0 fr. 346, soit à celle d'environ 10 becs ordinaires à gaz. La même Compagnie a adopté l'éclairage électrique pour la halle des voyageurs de la gare de Marseille et va l'étendre à celle de la gare de Paris. Enfin citons l'éclairage de la salle des pas perdus à la gare Saint-Lazare, lequel, au cours des essais dont il a été l'objet, est revenu à 0 fr. 65 par bec et par heure; celui des grands magasins du Louvre à Paris, de la plupart des grands établissements industriels, du Comptoir d'escompte, des magasins de la Ménagère, de l'avenue de l'Opéra, du Grand-Hôtel, et bientôt des Halles centrales. A Londres, la Cité, le British-Museum, les quais de la Tamise, le chemin de fer métropolitain, un théâtre, sont éclairés par l'électricité; une ville même, Norwich, est tout entière éclairée ainsi. De grands mâts (*fig.* à la page 353) supportent à leur sommet des foyers puissants, rayonnant à de grandes distances, pour éclairer les grandes rues et les places; dans les rues étroites douze lampes à incandescence complètent l'éclairage. Les lampes employées appartiennent au système Crampton; l'électricité est engendrée dans une sorte d'usine centrale installée sur un terrain communal, où l'on a établi une machine à vapeur de 20 chevaux actionnant quatre machines dynamo-électriques. En Russie, la lumière électrique brille dans certains quartiers, et les travaux de construction du port de Poti sont poursuivis sans interruption au moyen de lampes électriques. Au fond de l'Hindoustan même, les travaux du chemin de fer du Punjab sont poussés la nuit, grâce à la lumière électrique. Déjà l'éclairage des trains a commencé en 1881; au mois de décembre, un train allant de Paris à Soissons (gare du Nord) a été conduit par la première *locomotive-soleil*. Ce soleil électrique éclairait la voie au loin en avant du train. L'éclairage des wagons suivra ce progrès déjà réalisé.

La lumière électrique est applicable à tous les usages et pénétrera

bientôt dans nos appartements. Quoique la chaleur développée pour la produire soit plus forte que celle développée pour produire le gaz, la lumière électrique produit elle-même cent fois moins de chaleur que le gaz. De plus, elle ne vicie pas l'air; mais il ne faudrait pas conclure de là que le gaz a fait son temps et qu'il faille en fermer les usines. La production du gaz augmentera, au contraire; mais son rôle va changer. Sa place est non plus au bec, mais à l'intérieur du cylindre de la machine à gaz; et, en effet, un mètre cube de gaz, employé à faire marcher une machine à lumière électrique, produit dix fois plus de lumière que s'il était brûlé directement au bec. Le gaz est le combustible le plus avantageux; un kilogramme de gaz produit six fois plus de chaleur qu'un kilogramme de houille; il coûte moins cher de transport, surtout dans les villes, et ne produit ni cendre ni fumée. Ce sera donc comme combustible qu'il sera utilisé, laissant l'éclairage à l'électricité.

Nous voici loin, comme le dit M. de Parville, de l'année 1817, date mémorable où, pour la première fois, l'Anglais Winsor s'avisait de reprendre l'idée de l'ingénieur français Lebon, et d'éclairer au gaz le passage des Panoramas, à Paris. Malgré les objections de toute nature, le petit quinquet fumeux dut céder la place au bec de gaz. Aujourd'hui, c'est le bec de gaz qui est obligé de disparaître à son tour devant la lumière électrique. Toute invention est cependant obligée de franchir une série d'étapes avant d'arriver à l'application industrielle. L'éclairage électrique aura dû aussi attendre son heure. Mais quels progrès réalisés depuis 1813, depuis l'expérience de Davy (page 271) jusqu'à nos jours!

Un grand inconvénient, disions-nous en rapportant cette expérience, s'opposait à ce que l'éclairage électrique passât dans le domaine pratique: on était obligé de pousser l'un des charbons à la main pour permettre au courant de franchir l'intervalle qui séparait bientôt les charbons l'un de l'autre, par suite de leur usure. Ce fut en 1848 que deux Anglais, Staite et Petrie, et quelques mois après, en France, M. Léon Foucault, substituèrent à la main un mécanisme automoteur; ils inventèrent les *régulateurs*.

**RÉGULATEURS.** — On désigne par ce nom, que souvent l'on applique à toute espèce de *lampe électrique*, un appareil dans lequel les charbons, placés dans le prolongement l'un de l'autre, sont maintenus, au moyen d'un mécanisme quelconque, à un écartement constant. Ce réglage automatique est obtenu dans un grand nombre de régulateurs, au moyen des *variations d'intensité* du courant fourni par la source. Le mouvement de rapprochement des charbons s'obtient, soit au moyen d'un ressort

moteur, soit par le poids du porte-charbon supérieur. Un électro-aimant, traversé par le courant, laisse rapprocher les charbons lorsque le courant s'affaiblit, et arrête le mouvement dès que l'intensité du courant arrive à son état normal. Par la nature de leur construction, ces sortes de régulateurs ne se prêtent pas à la division de la lumière, et ils conviennent surtout pour les grands foyers, tels que les phares, les projecteurs, l'éclairage des ports, des ateliers, etc. Parmi les principaux régulateurs de ce système, il faut citer ceux de MM. Serrin, Jaspas, Siemens, Chertemps, Foucault, Dubosq. Dans les régulateurs pouvant se prêter à la division de la lumière, on a adopté des dispositions spéciales, afin d'assurer à chaque foyer un fonctionnement indépendant de ceux placés sur le même circuit. Dans les uns, dits *régulateurs différentiels*, le réglage est obtenu par la différence des actions données par le courant général produisant l'arc, et par une dérivation très résistante établie entre les deux charbons. Dans ce groupe, on remarque les lampes de Siemens, Brush, Weston, Crampton, Gravier, etc. Dans d'autres, dits *régulateurs à dérivation*, le réglage est obtenu au moyen d'une dérivation comprenant l'électro-aimant de réglage, qui agit sous l'influence des variations de cette dérivation, de sorte que l'intensité du courant général n'agit aucunement sur le réglage. Il s'ensuit que ces régulateurs peuvent fonctionner avec des différences d'intensité considérables, ce qui n'est pas leur moindre avantage. Parmi les divers systèmes de régulateurs à dérivation, nous citerons ceux de MM. Gramme, Gérard, Lontin, de Mersanne, etc.

**RÉGULATEUR FOUCAULT.** — Dans le régulateur de M. Foucault, les deux porte-charbons sont poussés l'un vers l'autre par des ressorts ; mais, pour nous servir du langage de l'inventeur, « ils ne peuvent aller à la rencontre l'un de l'autre qu'en faisant défiler un rouage dont le dernier mobile est placé sous la domination d'une détente. » L'appareil contient un électro-aimant animé par le courant qui produit l'incandescence. Cet électro-aimant consiste en un cylindre de fer doux, sur lequel est enroulé un fil de cuivre revêtu de soie, et que le courant traverse en se rendant aux cônes de charbon. Lorsque le courant passe dans le fil, le cylindre devient un véritable aimant, dont la puissance magnétique varie avec la force même du courant. Un fer doux, placé sous l'influence de l'électro-aimant, est sollicité d'autre part à s'en éloigner par un ressort antagoniste. Ceci posé, imaginons que les deux crayons soient assez voisins pour que le courant circule : la plaque de fer doux sera attirée par la bobine, et, comme la détente est montée sur ce fer doux, il sera facile de la disposer de manière qu'elle enraye les rouages au moment de l'attraction.

Dès lors, les deux charbons cesseront de s'avancer l'un vers l'autre ; mais, aussitôt que le courant s'affaiblira par suite de l'usure des crayons, le levier de fer doux, cédant à l'effort exercé par le ressort, n'enrayera plus le rouage, qui défilera pendant un certain temps. Les charbons s'étant de nouveau rapprochés, le rouage ne tardera pas à être enrayé, pour défiler bientôt et être enrayé encore, jusqu'à ce que les charbons soient complètement usés. On le voit, dans cet appareil, le rapprochement des charbons est intermittent, mais les périodes de repos et d'avancement se succèdent avec une telle rapidité « qu'elles équivalent à un mouvement de progression continu. »

Depuis, des systèmes nombreux ont été présentés, perfectionnements ou modifications du régulateur de Léon Foucault. Citons celui de MM. Deleuil, au moyen duquel furent éclairés pendant plusieurs mois, en 1858, les docks Napoléon ; de M. J. Dubosq, qui reçut une médaille d'honneur à l'exposition de 1855, et qui est encore un des plus employés pour les expériences de physique, les effets de théâtre, etc. ; de MM. Lacassagne et Thiers, Archereau, Jaspar, Pascal, Loiseau, Wartmann, Regnard, etc., etc., pour en arriver au régulateur de M. Victor Serrin, combiné principalement en vue des phares électriques.

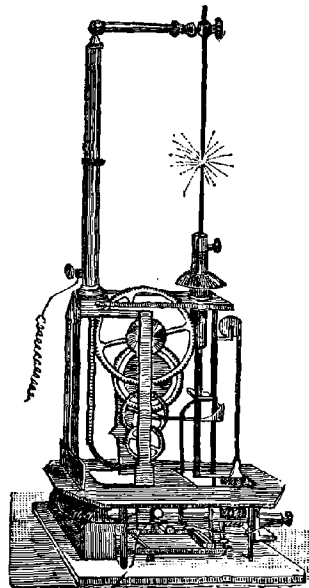


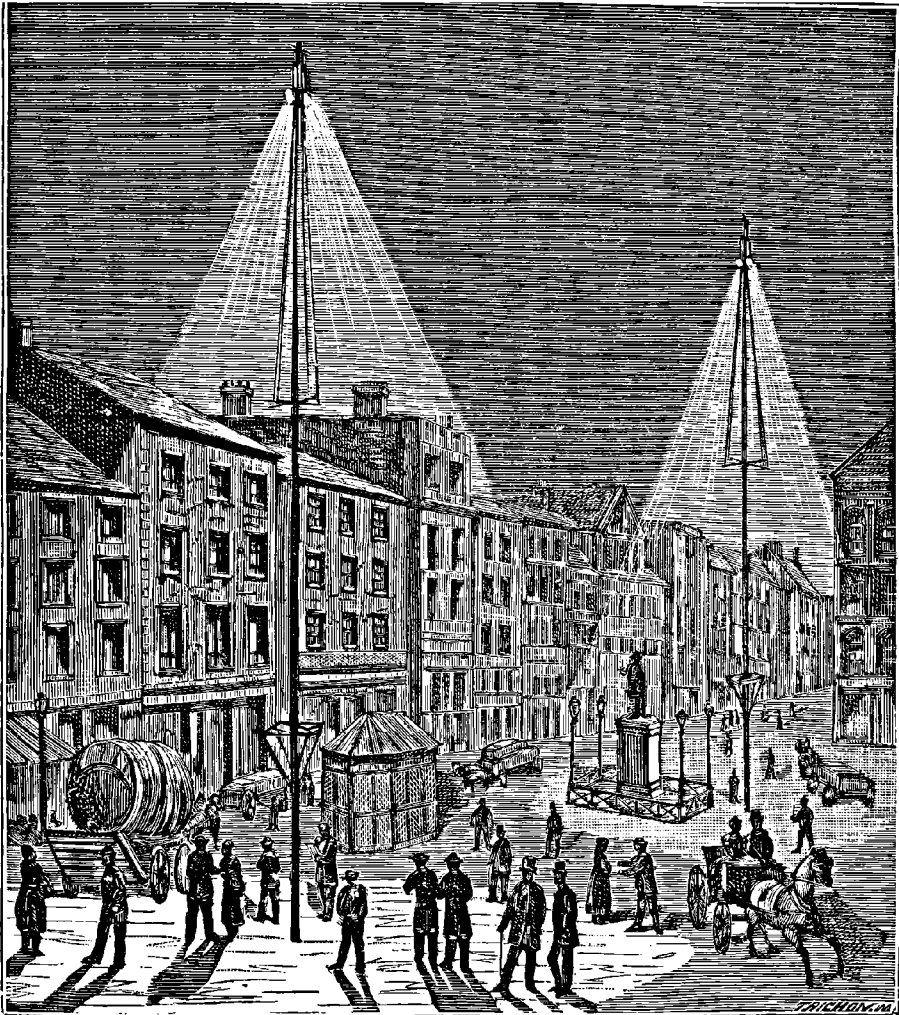
Fig. 124.  
RÉGULATEUR SERRIN.

**RÉGULATEUR SERRIN.** — Cette lampe électrique peut être comparée à une balance extrêmement sensible, dont le fléau repose, non pas sur le tranchant d'un couteau, mais sur les pointes de deux vis (*fig. 124*). L'un des bras du fléau porte une armature de fer doux dont le poids, convenablement calculé, dépasse d'une petite quantité la charge de l'autre bras du levier. Cette charge est représentée par le poids d'un système particulier, composé d'abord d'une pièce verticale, articulée à l'extrémité du fléau, et recourbée à angle droit, à une certaine hauteur. Quand le fléau trébuche et que l'armature de fer doux s'élève, la pièce verticale opposée au fer doux s'abaissera ; si, au contraire, le fer doux s'abaisse, la pièce verticale s'élèvera ; en d'autres termes, cette pièce peut accomplir un mouvement vertical de va-et-vient qu'un butoir limite entre deux vis de rappel. De plus, elle n'est pas abandonnée à elle-même, mais maintenue dans sa station verticale par un bras articulé. Ces différents organes constituent

le *système oscillant* qui fournit le recul des charbons. Un peu au-dessus du butoir se trouve une petite poulie fixe, sur la gorge de laquelle s'enroule une chaîne de traction. L'extrémité inférieure de cette chaîne est attachée à une plate-forme horizontale, isolée électriquement, et sur laquelle repose le porte-charbon négatif. La plate-forme peut être comparée au plateau de la balance, et le porte-charbon négatif au poids qui charge ce plateau. Quant au porte-charbon positif, il consiste en un cylindre de cuivre, recourbé en potence à sa partie supérieure. C'est à l'extrémité de la potence, dans une petite sphère métallique percée de part en part, que le charbon positif est fixé au moyen d'une vis de pression. Grâce à cette disposition, le charbon peut avoir telle longueur qu'on veut lui donner, et l'on n'est pas obligé de le raccourcir avant de le placer dans l'appareil. Ensuite la sphère du porte-charbon supérieur peut se mouvoir dans des plans différents : elle peut accomplir des mouvements latéraux autour d'un axe horizontal coïncidant avec l'axe même de la potence ; elle peut, en outre, accomplir des espèces d'oscillations dans un plan perpendiculaire à celui du porte-charbon, au moyen d'un tourillon engagé dans une douille. Le porte-charbon supérieur sert donc d'organe moteur. Son poids est utilisé pour mettre en mouvement le mécanisme du *défilage*. A cet effet, une crémaillère règne le long de ce porte-charbon ; cette crémaillère imprime un mouvement de rotation à une première roue dentée, montée sur le même axe qu'une poulie, dont le rayon est à celui de la roue dans le rapport de l'usure des charbons. A la poulie est fixé l'un des bouts de la chaîne de traction, dont l'autre bout porte la plate-forme, sur laquelle repose le porte-charbon négatif. On conçoit, d'après cela, que si le charbon positif vient à s'abaisser, la chaîne de traction, s'enroulant sur la poulie solidaire avec la roue dentée, soulèvera le porte-charbon négatif, de sorte que les deux charbons iront à la rencontre l'un de l'autre. La roue dentée engrène avec un pignon claveté avec une seconde roue dentée, laquelle engrène à son tour avec un dernier pignon, qui commande la marche d'une roue à rochet.

Pour faire fonctionner l'appareil, on met les deux bornes voisines de l'électro-aimant en communication, l'une, la borne supérieure, avec le rhéophore positif, l'autre avec le rhéophore négatif. Aussitôt le courant circulera ; il passera, au moyen d'un fil conducteur, de la borne positive à l'organe moteur, de cet organe au charbon positif, puis successivement au charbon négatif, au porte-charbon, à la plate-forme ; puis, par l'intermédiaire d'une chaînette, il viendra former une hélice magnétisante sur la bobine, d'où il se rendra au rhéophore négatif. Alors l'armature de fer doux, qui charge l'un des bras de levier du système oscillant, sera attirée,

le fléau trébuchera ; la pièce verticale, portant la plate-forme et le charbon négatif, s'abaissera, et l'écart des charbons aura lieu automatiquement ; par conséquent, il y aura production instantanée de l'arc voltaïque. Mais,



L'éclairage électrique de Norwich (page 348).

à mesure que les charbons s'useront, la force attractive de la bobine deviendra de plus en plus faible, si bien qu'à un moment donné l'armature de fer doux cessera d'être attirée : elle s'abaissera, et déterminera ainsi l'ascension du charbon négatif. Seulement, cette ascension

serait limitée à quelques millimètres, si la pièce verticale, en s'élevant, n'entraînait avec elle un crochet métallique qui engrave la roue à rochet. Or, ce crochet était le seul obstacle à la marche du mécanisme de *déflage*; par conséquent, les roues et les pignons reprendront leur mouvement de rotation sous l'influence de la crémaillère du porte-charbon positif. C'est ainsi que les deux charbons iront à la rencontre l'un de l'autre. Lorsque

le rapprochement sera assez grand pour que l'hélice magnétisante recouvre sa puissance, le système oscillera de nouveau, de sorte qu'un écart convenable régnera constamment entre les deux charbons.

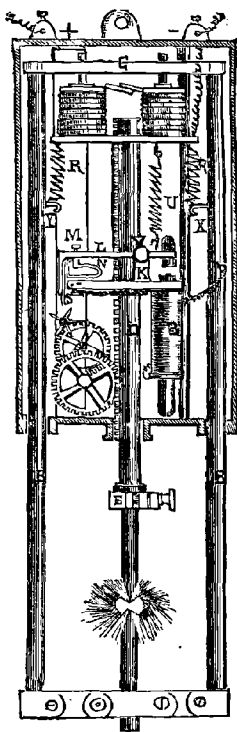


Fig. 125.

LAMPÉ ÉLECTRIQUE  
DE GRAMME.

**LAMPÉ ÉLECTRIQUE DE GRAMME.** — La *lampe électrique de Gramme*, ou plutôt le *régulateur*, est disposée pour être suspendue par un anneau placé à la partie supérieure. Le mécanisme étant placé en haut, il y a très peu d'ombre portée sur le sol, ce qui est très avantageux dans la plupart des cas. Voici quelles sont, pour ce régulateur, les principales particularités (*fig. 125*).

Le charbon supérieur positif est fixé à l'extrémité d'une tige à crémaillère D, engrenant avec la première roue d'un mouvement d'horlogerie, analogue à celui des régulateurs ordinaires. Un électro-aimant B, dont l'armature I est placée à l'extrémité d'un levier L, arrête ou dégage le rouage et règle ainsi la détente de la crémaillère, et, par suite, celle des charbons. L'électro-aimant B est placé en dérivation par rapport à l'arc. Celui-ci s'allongeant, sa résistance augmente : alors, la quantité d'électricité passant en dérivation augmente aussi, de sorte que l'armature est attirée, le rouage est dégage, et, la crémaillère descendant, l'arc se raccourcit; le courant dérivé diminue alors; l'armature de l'électro-aimant, n'étant plus attirée, cède à l'action du ressort antagoniste U, et, en reprenant sa position première, elle arrête le rouage, et, par conséquent, la descente du charbon.

Par suite de la disposition adoptée, à peine l'armature I a-t-elle, par l'intermédiaire du levier et du ressort S, dégage le rouage, qu'elle rompt le circuit de dérivation B; alors l'attraction cesse, et l'armature remonte en arrêtant de nouveau le rouage. Le circuit étant alors rétabli, si le courant dérivé a encore l'intensité voulue, un second mouvement se produit,



amenant une nouvelle rupture du circuit, et ainsi de suite. Le rapprochement des charbons est donc obtenu par une série de mouvements insensibles; de sorte que l'arc se maintient à une longueur presque constante, ce qui donne à la lumière une très grande fixité. C'est au moyen de la vis M, que l'on peut régler à volonté, et du ressort N, que le circuit dérivé est fermé ou rompu.

L'allumage ou le rallumage de la lampe est obtenu de la manière suivante : L'électro-aimant A est placé dans le circuit de l'arc voltaïque, et, dès qu'il est traversé par le courant, son armature C est attirée, entraînant avec elle les tringles E, et par suite le charbon inférieur qui s'abaisse. Dès que le courant ne passe plus, les tringles, obéissant à l'action des ressorts R, remontent, entraînant le charbon inférieur qui est ainsi relevé. Alors, par suite de cette disposition, si l'arc vient à s'éteindre, l'armature C remontant, la distance entre les charbons est diminuée, et, dès que le contact a lieu entre eux, le courant étant refermé, l'attraction de l'armature se produit et rétablit l'arc voltaïque.

**LAMPE ÉLECTRIQUE ET VEILLEUR AUTOMATIQUE GÉRARD.** — Cette lampe se compose (fig. 126) d'un cadre formé par deux tiges latérales, réunies par quatre traverses. Entre les deux traverses supérieures est fixé un électro-aimant creux, à fil fin, placé en dérivation sur le circuit. A travers le noyau creux de cet électro-aimant passe librement le charbon supérieur, que la vis d'un frein articulé empêche de descendre. A la partie supérieure de ce frein est placée une armature en fer doux, qui, lorsqu'elle est attirée par le pôle supérieur de l'électro-aimant creux, dégage le frein, de manière à permettre au charbon supérieur de descendre. Un ressort antagoniste règle l'action de ce frein. Le charbon inférieur est fixé dans une douille de la traverse inférieure. La traverse, qui vient immédiatement après celle-ci, est en fer et isolée des tiges; elle sert d'armature au pôle inférieur du solénoïde, et a pour effet de produire l'écart des charbons à l'allumage. Les deux traverses supérieures sont mobiles sur les tiges; deux ressorts servent à équilibrer le cadre qui supporte le charbon inférieur.

Ceci posé, voici comment fonctionne l'appareil. Les deux bornes

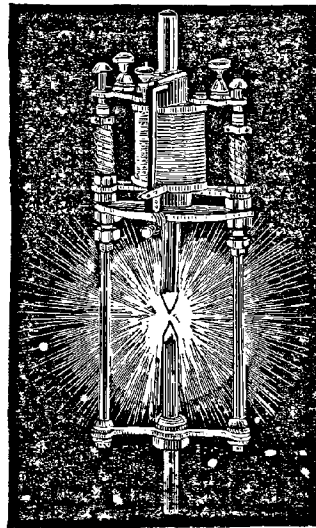


Fig. 126. — LAMPE GÉRARD.

communiquent, l'une avec le charbon supérieur et l'autre avec le charbon inférieur. A l'allumage, les charbons doivent être écartés. Le courant arrive par une des bornes, et, ne pouvant passer par les charbons, influence la bobine dont les deux pôles attirent les armatures. L'attraction des armatures a pour effet de dégager la vis du frein, et, par conséquent, de permettre la descente du charbon supérieur, tandis que le charbon inférieur remonte légèrement. Aussitôt que les charbons arrivent au contact, le courant cesse de passer par la bobine, qui devient inerte et abandonne les armatures. La vis du frein agit de nouveau sur le charbon supérieur, qu'elle empêche de descendre. La traverse en fer, en abandonnant le pôle inférieur de la bobine, laisse descendre le charbon inférieur de quelques millimètres et l'arc jaillit. Si la résistance de l'arc devient trop grande, le courant passe de nouveau dans la bobine, et le frein, en se desserrant, laisse glisser le charbon supérieur. La descente du charbon supérieur s'opère d'une manière continue et imperceptible par les mouvements vibratoires du frein, de telle façon que l'écart des charbons reste constant.

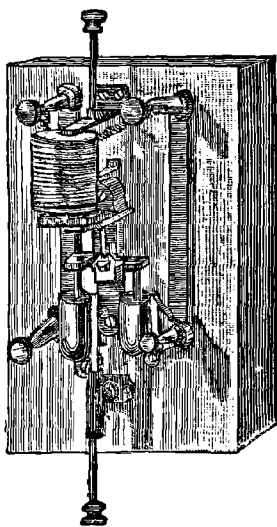


Fig. 127.

VEILLEUR AUTOMATIQUE  
GÉRARD.

M. A. Gérard a imaginé également un appareil auquel il a donné le nom de *Veilleur automatique* et qui est le complément de tout éclairage électrique. Quand une lampe s'éteint

par une cause quelconque, les autres continuent à brûler sans interruption : le veilleur rétablit le circuit automatiquement.

L'appareil (*fig. 127*) se compose : 1° d'un électro-aimant droit dont la bobine offre une résistance supérieure à celle de la lampe, de la bougie ou du brûleur employé ; 2° d'un coulisseau muni de deux tiges, glissant à travers des bagues isolantes dans deux godets contenant du mercure ; 3° d'une pièce en équerre articulée, portant d'un côté l'armature de la bobine, et de l'autre un crochet qui maintient suspendu le coulisseau. Pendant la marche normale, le courant arrive par l'une des bornes inférieures, monte à la borne supérieure du même côté, puis traverse la lampe pour revenir par les bornes opposées. En cas d'extinction de la lampe, le courant passe dans l'électro-aimant. Celui-ci, devenant actif, attire son armature qui, en basculant, dégage le crochet et déclanche le coulisseau. Les tiges, en tombant, plongent dans le mercure des

godets, et dès lors le courant, abandonnant la bobine, passe directement par le mercure du godet et les tiges du coulisseau. Le circuit se trouve ainsi rétabli instantanément, sans que les appareils qui continuent à fonctionner aient été impressionnés par la suppression de celui qui vient de s'éteindre ou que l'on a volontairement supprimé. En effet, grâce à une disposition particulière, le veilleur peut servir de commutateur. Il suffit d'appuyer sur la tige supérieure pour éteindre, et de pousser la tige inférieure pour rallumer.

**MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES. — MACHINES DE PIIII, DE CLARKE, DE L'ALLIANCE, DE GRAMME, ETC.** — Enfin, le progrès capital, celui qui a assuré le succès de la lumière électrique, c'est la substitution des générateurs mécaniques d'électricité à la pile électrique. Avec la pile, la lumière électrique ne pouvait sortir du laboratoire. Pour alimenter un régulateur, il fallait au moins soixante éléments de pile et la dépense était, à éclairage égal, près de quatre fois aussi considérable que celle du gaz. La production mécanique de l'électricité a complètement modifié l'aspect de la question. Un moteur à vapeur fait tourner la machine magnéto-électrique, et celle-ci engendre le courant électrique, à un prix extrêmement bas, par un mouvement de rotation qui éloigne et rapproche tour à tour une bobine d'un aimant. Les courants d'induction sont, à la vérité, de sens alternativement contraires; mais on les redresse, c'est-à-dire on les ramène à une direction unique par un *commutateur* (page 280), qui intervertit les voies de communication entre la bobine et le reste du circuit, aussitôt que le courant change de sens. La première machine magnéto-électrique fut construite en 1833 par un constructeur français, Piiiii, sur les suggestions d'Ampère. Dans cet appareil, une manivelle faisait tourner un faisceau aimanté en fer à cheval sous une bobine fixe suspendue à une traverse horizontale entre deux montants de bois. Cette machine lourde et encombrante fut bientôt remplacée par les appareils de Saxton et de Clarke, où le faisceau aimanté reste fixe pendant que la bobine tourne devant ses pôles. Cette disposition inverse rend l'appareil plus portatif et permet d'obtenir une rotation plus rapide, ce qui augmente l'énergie des courants induits. Il se compose (*fig. 128*) d'une roue R, portant

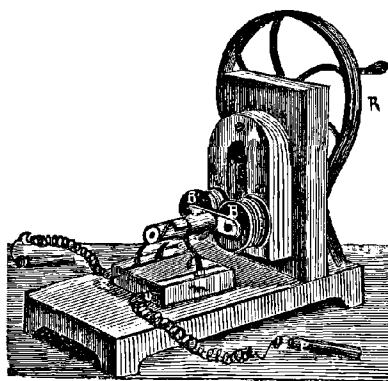


Fig. 128. — MACHINE DE CLARKE.

une chaîne sans fin, destinée à transmettre un mouvement de rotation rapide aux deux bobines B et B', formées chacune d'un cylindre en fer doux autour duquel s'enroule un long fil de cuivre entouré de soie. L'aimant A se compose de plusieurs fers à cheval en acier, fixés ensemble à une planche horizontale. En *m* se trouve un parallépipède en bois, dont les deux faces latérales sont couvertes de bandes métalliques, avec lesquelles communiquent deux ressorts en acier, dont les extrémités appuient sur un commutateur que porte l'axe des bobines ; à cette pièce de bois

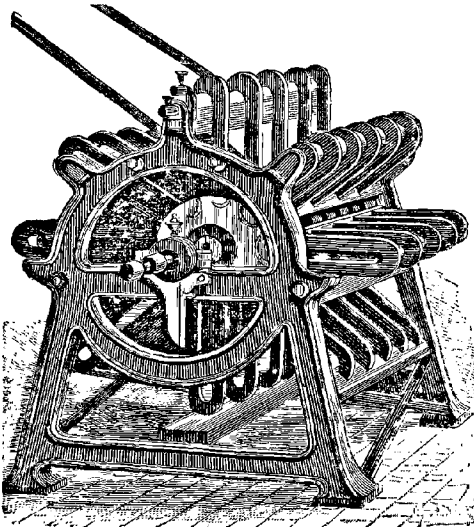


Fig. 129. — MACHINE DE L'ALLIANCE.

s'attachent également les fils *rp*, *wp*, devant servir de conducteurs aux courants d'induction développés par la machine. On emploie aujourd'hui industriellement des machines magnéto-électriques d'un grand modèle, analogues à celle de Clarke ; telle est celle imaginée, en 1850, par le professeur Nollet, de Bruxelles, à laquelle M. Van Malderen a donné la forme actuelle, et qui est construite par la compagnie l'*Alliance* pour l'éclairage de nos phares.

La machine de l'*Alliance* (fig. 129) contient cinquante-six aimants distribués sur un châssis

immobile. Ce châssis est une série de sept tranches octogonales. On a disposé huit aimants très énergiques sur un même plan vertical, un sur chaque côté de l'octogone, et ce plan se répète sept fois. Entre les groupes d'aimants passent les bobines ; elles sont formées d'un double fer doux entouré de fils de cuivre recouverts de soie. Au repos, chaque fer doux se place devant un des pôles de l'aimant et forme armature. L'ensemble de toutes ces bobines est porté par un arbre mobile, que l'on fait tourner par la vapeur. Quand l'arbre tourne, chaque bobine s'approchant ou s'éloignant d'un pôle d'aimant fixe, est parcourue par un courant induit très puissant, parce qu'il est instantané. Tous ces courants partiels développés dans chacune des cent douze bobines se réunissent en un seul dont la puissance est énorme ; on comprend, en effet, qu'avec des soins et de l'attention, on peut enrouler les fils sur les bobines et les rattacher les uns aux autres, de telle sorte que tous ces courants aient le même sens, et, par suite, qu'ils se renforcent

en s'ajoutant les uns aux autres. Ce courant, résultant de l'ensemble, est amené aux charbons et produit l'arc voltaïque. Les bobines tournant très vite, les courants induits se succèdent à des intervalles excessivement courts, et la lumière est continue. Plus l'arbre, et avec lui les bobines qu'il porte, tourne vite, plus nombreux sont les courants induits développés; plus ces courants sont courts, et plus ils sont énergiques. Toutes ces conditions dépendent les unes des autres. On reconnaît, en effet, que l'intensité définitive de la lumière croît à mesure que la vitesse de rotation augmente, mais que, lorsque l'arbre fait 300 à 400 tours par minute, la lumière cesse de croître et reste stationnaire. Il se produit alors deux cents courants par seconde : l'œil ne peut certainement plus apercevoir les interruptions de la lumière électrique. Les courants vont alternativement en sens contraire; par suite, le transport des particules incandescentes de charbon a lieu tantôt dans un sens, tantôt dans un autre; ce qui fait que les deux charbons diminuent également, puisque leur diminution est seulement due à leur combustion. Cependant il peut arriver que, pour certains usages, on ait besoin d'employer des courants toujours de même sens; on place alors sur la machine un *commutateur*. L'intensité du courant, disons-nous, est immense. Avec une machine donnant le maximum d'effet, on obtient, en effet, une lumière équivalente à celle de 290,000 bougies environ. On peut, du reste, apprécier le courant. En le faisant passer à travers un fil de platine assez fort, ce fil rougit instantanément, et quelquefois il fond. Or il est facile de mesurer la chaleur produite et d'en conclure l'intensité de l'électricité dégagée. Un travail de deux chevaux-vapeur est plus que suffisant pour faire tourner l'arbre des bobines, qui n'est arrêté par aucun frottement, par aucune résistance passive. Aussi, dans les usines où il y a des machines à vapeur installées, on peut confier à celles-ci le nouveau travail et leur faire tourner la roue de la machine magnéto-électrique, sans qu'il soit nécessaire de les fortifier ou de les transformer. L'éclairage ainsi obtenu ne coûte donc que le prix du charbon, c'est-à-dire environ 10 centimes par heure; mais il faut compter aussi le prix d'achat des appareils et quelques frais d'entretien, qui augmentent naturellement le prix de la lumière électrique. Ce système cependant, très commode pour l'éclairage où l'on peut utiliser les courants alternatifs, exige un commutateur fort compliqué si l'on veut changer les courants. Cette difficulté est éludée dans la machine de Gramme.

La *machine type de Gramme* se compose (*fig. 130*) de deux bâtis entretoisés en haut et en bas au moyen de deux traverses en fer recouvertes de fil, et formant ainsi les bobines d'un électro-aimant, sur lequel

le fil conducteur du courant agit pour l'aimanter. Chaque traverse porte en son milieu une pièce de fonte de fer dans laquelle est ménagé un évidement, de forme demi-circulaire, de façon à former, par la réunion des deux pièces, le logement de la bobine. Celle-ci est formée (fig. 131) d'un anneau en fer formant noyau, sur lequel est enroulé un fil disposé en sections distinctes, placées à côté les unes des autres et réunies en tension, et joignant convenablement les extrémités des fils des sections

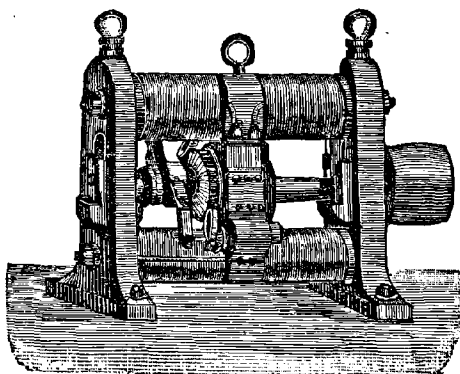


Fig. 130. — MACHINE DE GRAMME.

voisines, le bout finissant de l'une étant soudé au bout commençant de la suivante. L'anneau est formé d'un fil de fer enroulé sur lui-même au moyen d'un moule spécial. Des rubans de cuivre, recouverts d'un ruban de soie servant d'isolant, sont réunis aux points de jonction des fils des deux sections voisines, et, convergeant vers le centre, se recourbent à angle droit en formant un petit cylindre, qui se trouve ainsi composé d'autant

de lamelles de cuivre qu'il y a de sections différentes de fils, ces lamelles étant isolées les unes des autres et fortement serrées. Deux brosses ou balais, formés d'un grand nombre de fils, et maintenus par des ressorts, frottent constamment sur ce commutateur, et servent à recueillir, pour ainsi dire, les courants développés dans la bobine à chaque révolution. La bobine, portant son commutateur, qui en fait partie intégrante, est montée sur un axe reposant sur deux paliers ménagés dans les bâtis, et portant à une extrémité une poulie destinée à recevoir le mouvement du moteur. Les deux bâtis sont surmontés de graisseurs qui doivent fonctionner parfaitement, car la vitesse de la machine étant de 900 à 1,000 tours par minute, il ne tarderait pas à se produire un échauffement considérable si le graissage était arrêté.

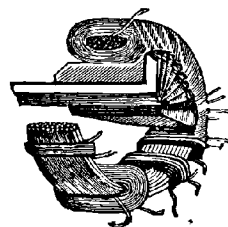
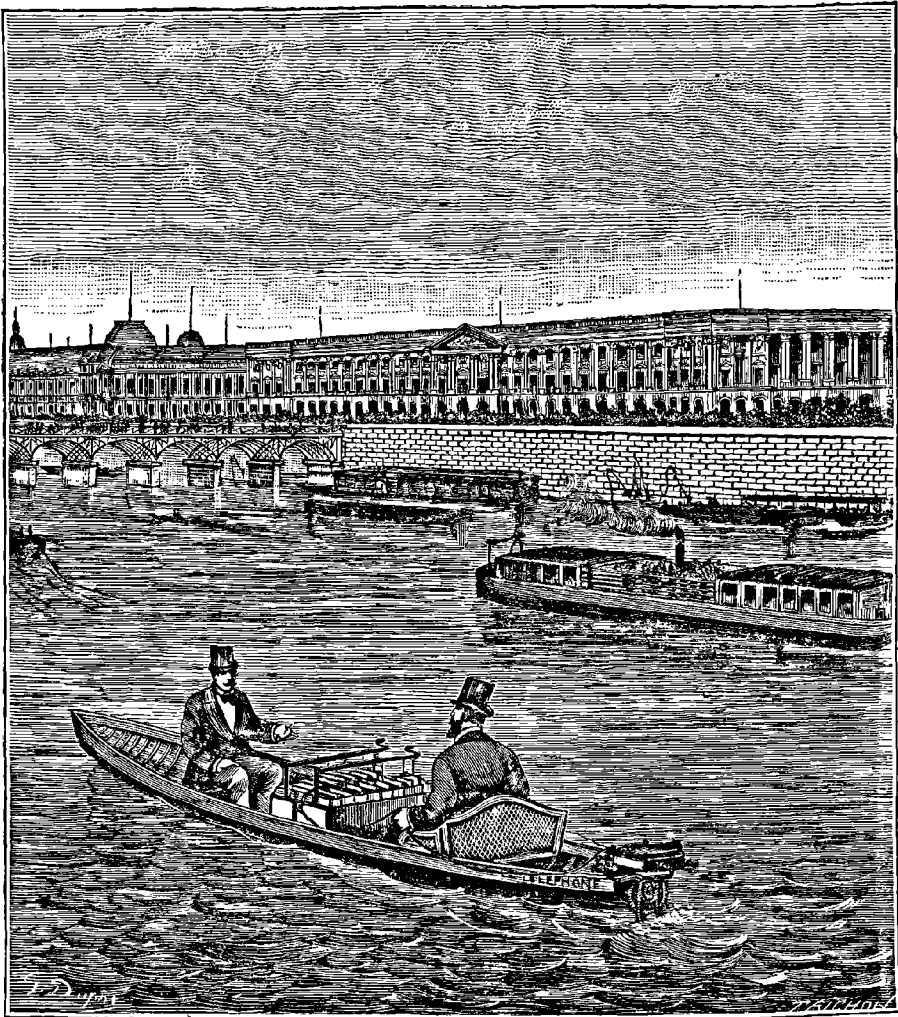


Fig. 131. — BOBINE DE LA MACHINE GRAMME.

Telle est la machine Gramme dans toute sa simplicité. Dès que, sous l'action d'un moteur quelconque (machine à vapeur, roue hydraulique, etc.), l'arbre et, par conséquent, la bobine, reçoit un mouvement de rotation, il se développe, par suite de la faible aimantation que possède toujours le bâti, un courant très faible qui, prenant naissance

dans la bobine, circule dans les fils des électro-aimants, et augmente par suite leur force magnétique. Sous l'influence de cette excitation, un courant plus fort se développe dans la bobine, circule de nouveau dans



Expérience de navigation avec le moteur électrique Trouvé (page 371).

l'électro-aimant dont la force magnétique s'accroît encore, et ainsi de suite jusqu'au moment où le courant ayant atteint le maximum de force proportionnel à la force motrice transmise et à la dimension de la machine, il se maintient à sa force normale. Le courant est transmis au

circuit extérieur par deux conducteurs aboutissant aux porte-balais.

La machine que nous venons de décrire est celle employée généralement pour la production de la lumière; mais il s'en construit de différents types appropriés aux destinations spéciales que l'on a en vue. Ainsi, il y a des machines de laboratoire, de dimensions plus restreintes, et dans lesquelles l'électro-aimant a la forme d'un fer à cheval, entre les pôles duquel tourne la bobine, qui est mise en mouvement à la main, au moyen d'une manivelle. La machine destinée au transport des forces est aussi d'un modèle tout à fait spécial, de forme octogonale, d'une puissance très grande. De même, pour la galvanoplastie, la disposition adoptée est un peu différente.

Depuis l'invention de la machine de Gramme, on a construit un



Fig. 132. — BOBINE DE SIEMENS.

grand nombre de machines dynamo-électriques plus ou moins bien conditionnées, mais dont le principe

diffère peu, et parmi lesquelles il faut citer principalement les machines de MM. Siemens.

La différence principale entre ces dernières et celles de Gramme consiste en ce que la bobine, au lieu d'être creuse, est formée par un cylindre de fer sur lequel est enroulé le fil, de sorte qu'aucune partie de ce fil ne se trouve à l'intérieur; par suite, tout le fil enroulé sur l'anneau est utilisé, sauf les portions qui recouvrent diamétralement l'anneau aux deux extrémités. C'est pour diminuer autant que possible cet inconvénient que MM. Siemens donnent à leur bobine une grande longueur, par rapport à son diamètre. La bobine (fig. 132) tourne entre les pôles de deux électro-aimants. Le fil qui enroule la bobine est divisé en sections, correspondant, comme dans la bobine de Gramme, à des lamelles de cuivre isolées, se réunissant en cylindre pour former le collecteur, sur lequel frottent les balais; ceux-ci transmettent les courants, développés par le mouvement de la bobine, au circuit extérieur, dans lequel se trouve placée la résistance, par exemple la lampe, s'il s'agit d'éclairage électrique.

**MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES.** — Dans toutes les machines ci-dessus, la source première des phénomènes est le magnétisme d'un aimant permanent qui sert de base à la transformation du travail mécanique en électricité. On peut supprimer l'aimant et le remplacer par un simple morceau de fer doux, qui devient électro-aimant par la vertu des courants



induits par lui-même dans la bobine qui tourne en face de ses pôles. C'est la transformation la plus directe, la plus immédiate du mouvement mécanique en électricité; d'où le nom de machines *dynamo-électriques* donné à ces machines. La transformation toutefois ne s'opère pas d'emblée : ces machines ont besoin d'être *amorçées* avec une quantité de fluide tout préparé, qui détruit les polarités opposées, en réveille l'antagonisme endormi et excite le jeu des manifestations diverses. Pour amorcer, il suffit de toucher le noyau de fer doux avec un aimant, ou de le placer seulement dans le méridien magnétique, afin d'y déterminer un commencement d'aimantation, au moment où la bobine commence sa rotation entre les pôles des futurs électro-aimants. Ensuite on n'a plus qu'à faire tourner une manivelle pour entretenir les courants induits : ils s'alimentent directement de la force mécanique qui produit la rotation de la bobine. Les courants induits sont d'abord faibles ; mais peu à peu le magnétisme s'accumule dans l'électro-aimant, à mesure que s'accroît la vitesse de rotation, et bientôt l'intensité des courants arrive à un maximum où elle se maintient, si la vitesse demeure constante.

C'est à MM. Siemens que revient la priorité d'avoir substitué à l'aimant inducteur des machines magnéto-électriques un électro-aimant alimenté par le retour du courant. Ils construisirent, en 1866, la première machine dynamo-électrique ; en 1867, M. Wheatstone eut la même idée. Depuis, il s'en construit de tous les modèles : entre autres, celles de Ladd, de Wildd, etc. M. Lontin et M. Gramme ont aussi perfectionné leurs machines magnéto-électriques, en substituant aux aimants permanents des électro-aimants animés par le retour du courant. M. Gramme a trouvé, dit M. Radau, dans l'ouvrage que nous avons déjà cité, que cette disposition permet de réaliser une économie considérable : on augmente le rendement dans une forte proportion, tout en diminuant le volume et le poids de la machine, et en économisant une partie de la force motrice. Dans les machines de Gramme destinées à l'éclairage, les modèles ordinaires donnent une lumière de 50 à 100 becs Carcel, avec des moteurs de  $1/2$  à 1 cheval-vapeur. Ce sont des appareils simples, commodes, durables, et qui constituent le mode d'éclairage le plus économique.

**BOUGIES JABLOCHKOFF.** — Cependant la lumière de l'arc voltaïque pêche par excès d'éclat ; il est souvent inutile d'avoir tant de lumière condensée sur un seul point ; on chercha donc à subdiviser le foyer électrique, afin que, avec une seule source d'électricité, on pût alimenter plusieurs lampes. De plus, il s'agissait de supprimer le mouvement assez compliqué nécessaire pour le réglage des régulateurs. Plusieurs physiciens et

ingénieurs avaient déjà proposé des solutions plus ou moins pratiques, quand, en 1876, un ancien officier russe, M. Jablochhoff, est venu apporter une solution originale, qui ne satisfait pas au problème de la divisibilité avec économie, il s'en faut, mais qui a fait entrer la question dans une voie nouvelle.

M. Jablochhoff place deux baguettes de charbon parallèlement l'une à l'autre, et il les sépare par une matière isolante fusible, le plâtre; l'extrémité des deux charbons est seule visible (fig. 133). Ces deux extrémités sont exactement comme deux mèches de bougies placées en regard l'une de l'autre. C'est entre ces deux extrémités que jaillit l'arc électrique. A mesure que les charbons brûlent, le plâtre fond comme le corps gras d'une bougie; il se volatilise et laisse ainsi continuellement à nu la même longueur des deux charbons nécessaires à l'entretien de l'arc lumineux. Dans la pratique, on se sert aujourd'hui de cinq bougies posées sur le même support et enveloppées dans un cylindre en verre dépoli. On les fait brûler successivement. Une seule bougie ne peut éclairer que pendant une heure et demie. Comme inconvénients, il y a encore que le point de combustion change sans cesse avec la bougie; elle dégage aussi une fumée blanchâtre qui adhère au globe, et lorsqu'elle s'éteint accidentellement, elle ne peut être rallumée; enfin, lorsque la bougie est près de toucher à sa fin, l'éclairage présente des variations d'éclat extrêmement désagréables.

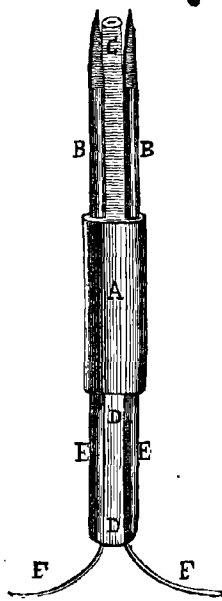


Fig. 133.

## BOUGIE JABLOCHKOFF.

BB. Crayon en charbon.  
— CDD. Matière isolante.  
— EE. Tubes de cuivre dans lesquels les charbons sont emmanchés. — A. Fourneau d'amiante soutenant l'ensemble. — EF. Fils de cuivre amenant le courant.

MM. Jamin, Wildd, Debrun, ont successivement présenté divers autres systèmes de bougies, qui sont employés. La *lampe-soleil* de MM. Clerc et

Bureau tient à la fois de la bougie et du système à incandescence. Elle est composée de deux charbons inclinés, entre lesquels un bloc de chaux est rendu incandescent par l'arc voltaïque, qui en lèche la surface et qui le porte ainsi à une très haute température.

**LAMPES A INCANDESCENCE AVEC COMBUSTION.** — Ces lampes, réalisées pour la première fois par M. Émile Reynier, et à la catégorie desquelles appartiennent les lampes Werdermann (disposition Napoli), Tomasi, Joel, etc., sont composées d'un charbon en forme de crayon qui

vient s'appuyer sur un bloc métallique ou de charbon, de façon à produire un contact imparfait d'où résulte l'incandescence du charbon. Voici le système de M. Reynier, dont les autres ne diffèrent que par des dispositions plus ou moins ingénieuses. Une baguette (*fig. 134*), une aiguille de charbon plutôt, longue de 0<sup>m</sup>,20 à 0<sup>m</sup>,30, épaisse de 1 à 2 millimètres, est assujettie, d'une part, sur une tige métallique, que son propre poids tend à faire descendre; de l'autre, sur le pourtour d'une roulette en charbon disposée verticalement. La baguette appuie forcément, au fur et à mesure de l'usure, sur la roulette, qui tourne lentement, entraînée par une roue que fait mouvoir le poids de la tige. Le courant rougit la baguette au blanc éclatant au point de contact de l'extrémité avec la roulette. Le charbon s'oxyde; mais le contact subsiste sans cesse, puisque la tige lourde à laquelle il est fixé l'oblige à descendre. La lumière subsiste tout le temps que la baguette met à brûler. La dépense en charbon est de 10 centimètres environ à l'heure. Une baguette de 0<sup>m</sup>,30 peut donc durer 3 heures. Aussi obtient-on, sans aucune complication, une lampe électrique très simple. Le courant électrique rougit le charbon. Veut-on beaucoup de lumière; on hausse la mèche, c'est-à-dire qu'on augmente la portion rouge de la baguette; en veut-on moins, on diminue cette portion. Veut-on éteindre; on ferme le courant. La quantité d'électricité dépensée est extrêmement faible. C'est évidemment une solution du problème de la production des lumières électriques pour appartements ou petits ateliers.

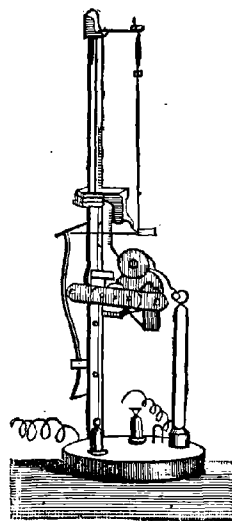


Fig. 134

LAMPRE REYNIER.

**LAMPES A INCANDESCENCE SANS COMBUSTION.** — Ces lampes, qui comprennent celles de M. Swan, Maxim, Edison et Lane Fox, d'abord vainement cherchées par plusieurs ingénieurs russes, MM. Ladygumi, Kosloff, Kon, Bouligaine, etc., sont formées par un fil de charbon, très fin, placé dans un ballon de verre, dans lequel on a fait le vide, ou qui contient un gaz revivifiant. Par suite de cette disposition, l'usure du charbon est presque insensible, et les lampes peuvent durer très longtemps. Elles se prêtent facilement à la division de la lumière. Contrairement à toutes les autres lampes électriques, elles fournissent une lumière jaune orangé, assez semblable à celle du gaz, quoique beaucoup plus éclatante; de plus, cette lumière est absolument fixe.

Nous donnons le dessin des trois dernières dispositions que M. Edison a adaptées à ses lampes pour en augmenter la lumière (*fig. 135*). Dans l'une, le fil est roulé en spirale; la seconde est à deux fils; la troisième est à trois fils. La construction est si simple qu'il nous semble inutile d'entrer dans des explications à ce sujet.

**MOTEURS ÉLECTRIQUES.** — Dès la découverte de l'électricité, pour ainsi dire, on pensa à se servir des répulsions et des attractions magné-

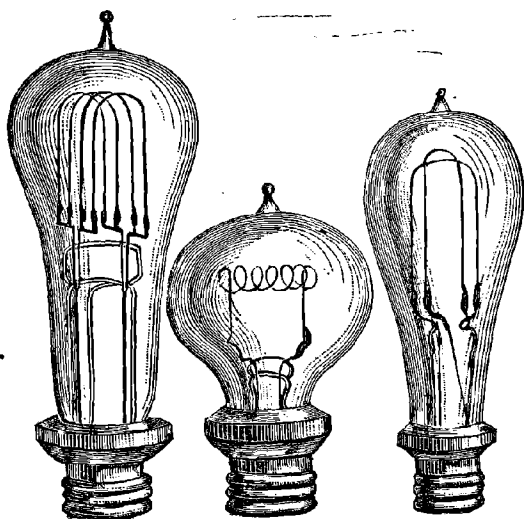


Fig. 135. — LAMPES EDISON.

tiques comme moteur; mais, après la découverte de l'électro-magnétisme seulement, ces désirs ont pu ne pas être considérés comme absolument chimériques; l'on a voulu dès lors remplacer la vapeur par l'électricité, et que celle-ci pût faire mouvoir des machines, traîner des fardeaux, faire toutes sortes d'ouvrages délicats ou pénibles. Jusqu'à ce jour, les efforts des inventeurs ont été à peu près infructueux. « Il n'y a pas à s'arrêter, disait M. de

Parville en 1878, aux moteurs électriques. Les quelques types qu'on rencontre à l'Exposition ne sauraient plus induire personne en erreur. L'électricité coûte trop cher. En tournant une simple manivelle presque sans effort, on fait produire aux machines magnéto-électriques une quantité d'électricité équivalente à celle d'une pile de Bunsen de 10 éléments; donc, avec très peu de force, on développe beaucoup d'électricité. La réciproque est vraie; avec beaucoup d'électricité, on produit très peu de force. Ceci peut se traduire en un seul chiffre: la pile la plus économique nécessaire à la production de l'électricité ne fonctionne qu'en oxydant du zinc. Un moteur électrique dépense en zinc ce qu'une machine à vapeur consomme en charbon. Or le zinc coûte quinze fois plus cher que la houille, et l'oxydation du zinc ne donne que 3,000 calories, quand l'oxydation du charbon en produit 8,000. Un moteur électrique dépense à très peu près trente fois plus qu'un moteur à vapeur. Les moteurs électriques ne pourront donc intéresser les industriels que

lorsque les physiiciens auront trouvé le moyen de produire de l'électricité à bon marché. »

Cependant le jour où l'on arriverait à produire un moteur, l'industrie ferait un tel progrès qu'il importe de ne pas désespérer. Ce jour-là, en effet, on verra l'ouvrier travaillant en chambre, l'ouvrière que la machine à coudre fatigue tant actuellement, le propriétaire en quête de bien-être, l'industriel n'employant que quelques petits outils et pour lequel la machine à vapeur est un trop grand embarras. etc., se servir de cette force nouvelle, d'où découlera une transformation complète aussi bien dans le domaine industriel que dans notre vie intime et dans notre vie sociale et morale.

C'est en 1835, à l'époque de l'invention même des piles constantes, que Jacoby exécuta, sur la Néva, les premières expériences d'un moteur électrique. Il l'appliquait à la navigation. Sa chaloupe, assez grande pour contenir une pile motrice, était pourvue de roues à aubes. Il paraît que cet appareil moteur se composait de deux larges disques garnis chacun de quatre électro-aimants perpendiculaires à son plan, et dont l'un était fixe, l'autre mobile autour d'un axe horizontal. On obtenait une rotation continue par des alternatives d'attraction et de répulsion, qui se manifestaient quand les électro-aimants mobiles passaient en regard des électro-aimants fixes. Il était servi par une pile de 128 couples de Grove, dans lesquels la surface de platine était de 3 à 4 mètres carrés, et dont le courant était assez énergique pour rougir un fil de 0<sup>m</sup>,001 de diamètre et de 2 mètres de longueur. L'expérience coûta 60,000 francs, donnés par l'empereur Nicolas, et ne put être répétée.

En 1866, le comte de Mollins reprit l'expérience de Jacoby sur le lac du Chalet du bois de Boulogne, à l'aide d'un bateau en fer à fond plat. La machine était actionnée par vingt éléments de Bunsen. Elle se composait d'un moteur faisant tourner un axe horizontal, qui communiquait le mouvement à deux roues à aubes placées, l'une à droite et l'autre à gauche, à l'aide d'une chaîne à la Vaucanson. Cette chaloupe, de même que celle de M. Jacoby, portait douze personnes. Les suites de cette expérience furent interrompues par la mort de l'inventeur.

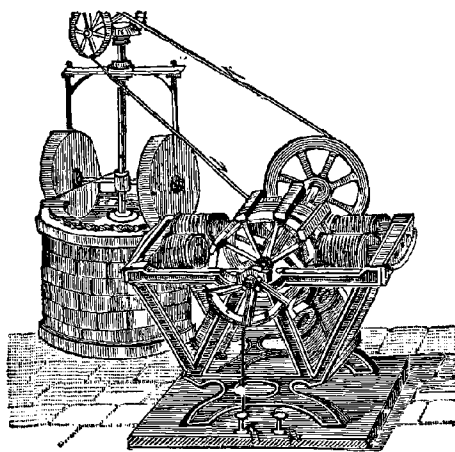


Fig. 136. — MOTEUR ÉLECTRIQUE FROMENT.

Depuis, il a été construit un grand nombre de machines électromotrices, parmi lesquelles il faut citer celles de MM. Ritchie, Larmengeat, Froment, Bourbouze, Kravogl, etc. Comme elles reposent toutes sur le même principe, nous nous contenterons de décrire celle de M. Froment, une des meilleures. Elle consiste (*fig. 136*) en quatre électro-aimants disposés sur un bâti de fonte. Une roue, portant huit armatures de fer doux, peut se mouvoir entre les électro-aimants ; ceux-ci n'agissent pas tous ensemble, mais successivement. Les armatures, attirées par les

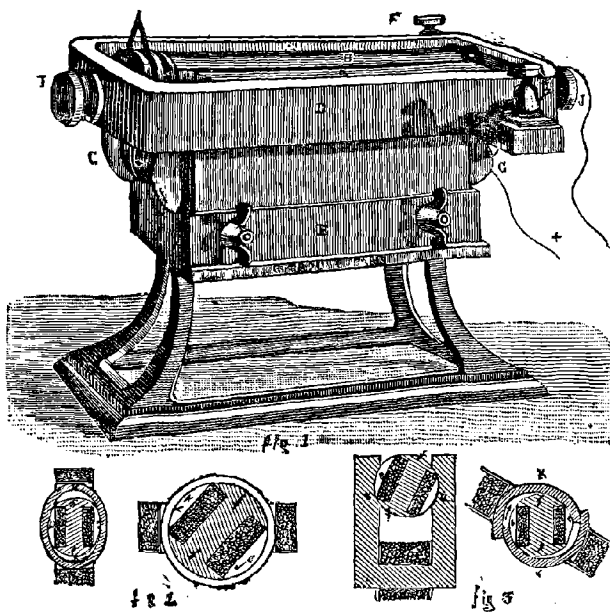


Fig. 137. — MOTEUR TROUVÉ.

AA. Pôles de l'électro-aimant fixe. — B. Fer de la bobine.  
— C. Bobine de l'électro-aimant A. — IJ. Axe de la bobine.  
FH. Pôles de la pile motrice. — D. Cadre en cuivre. —  
E. Bâti en fonte.

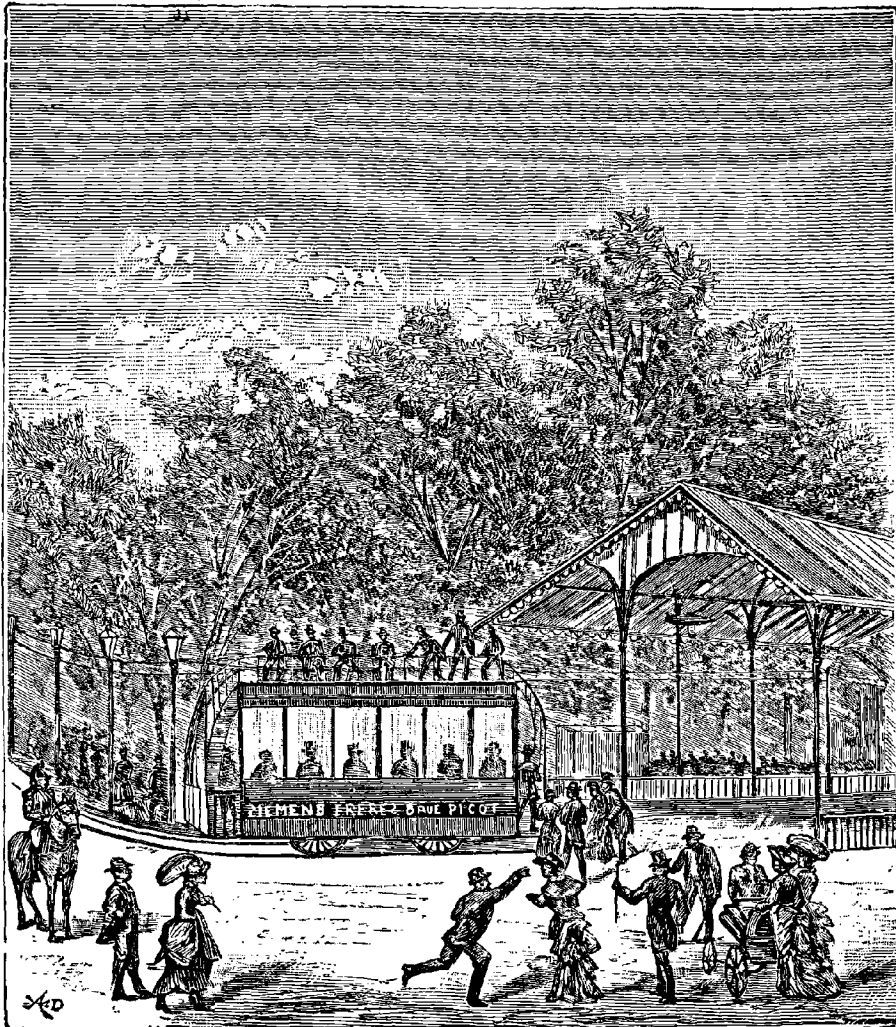
électro-aimants, se précipitent dans leur direction et les dépassent par vitesse acquise ; les électro-aimants cessent d'ailleurs de fonctionner au moment où les armatures passent devant eux ; un commutateur est disposé pour cela. Il consiste en un prolongement de l'axe de rotation que l'on voit en avant de la figure, et en trois gâlets fixés à l'extrémité de ressorts d'acier ; des renflements qui existent sur l'axe viennent soulever alternativement chaque ga-

let, infléchir le ressort correspondant et lui faire toucher un contact, de sorte que de cette façon l'électro-aimant correspondant reçoit le courant.

En 1880, M. Trouvé a imaginé un nouveau moteur, basé sur des perfectionnements qu'il a apportés à la bobine Siemens, et qui a fait beaucoup de bruit. L'appareil se compose (*fig. 137*) d'une bobine Siemens, qui est mise en rotation à l'aide d'un interrupteur entre les pôles d'un électro-aimant. Voici comment l'auteur s'exprime lui-même sur les modifications qu'il a fait subir à la bobine Siemens :

« Lorsqu'on trace le diagramme dynamique d'une bobine Siemens en lui

faisant opérer une révolution complète entre les deux pôles magnétiques qui réagissent sur elle, on observe que le travail est presque nul pendant deux périodes assez grandes de la rotation. Ces deux périodes correspondent aux temps pendant lesquels les pôles cylindriques de la bobine mobile, ayant atteint les pôles



Le Tramway électrique à l'Exposition d'électricité de 1881 (page 372).

de l'aimant fixe, défilent devant eux. Durant ces deux fractions de la révolution, qui sont chacune de 30° environ, les surfaces magnétiques, destinées à réagir l'une sur l'autre, sont à égale distance du fer de la bobine, qui n'est point sollicitée à tourner. Il en résulte donc une perte notable de travail. J'ai supprimé ces périodes

d'indifférence et accru l'effet utile de la machine, en modifiant ainsi la bobine : les faces polaires, au lieu d'être des portions d'un cylindre dont l'axe coïncide avec celui du système, sont des espèces de limaçons, de sorte qu'en tournant elles approchent graduellement leur surface de celle de l'aimant, jusqu'au moment où le bord postérieur échappe le pôle de l'aimant. La répulsion commence alors par suite de l'inversion du courant, de sorte que le point mort est pratiquement évité. »

M. Trouvé a imaginé plusieurs moyens d'obtenir ce résultat, soit en

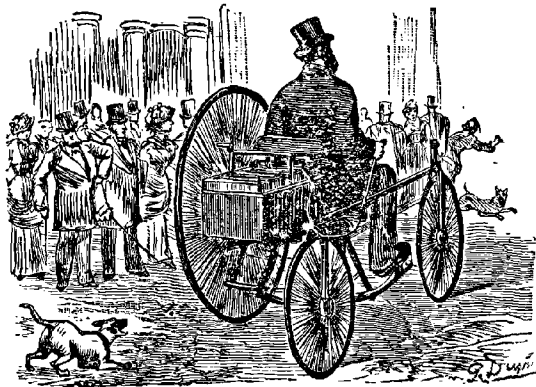


Fig. 138. — TRICYCLE DE M. TROUVÉ.

excentrant les joues de la bobine, soit en excentrant au contraire l'excitateur, les joues de la bobine restant concentriques. Les dessins 2 et 3 de la figure donnent, en projection horizontale et en coupe verticale, les deux formes principales qui lui ont le mieux réussi : le dessin 2 représente une bobine portant deux palettes hélicoïdales ;

le dessin 3 représente une bobine elliptique.

Ce moteur électrique est certes capable de faire fonctionner une machine à coudre ; mais, comme pour les autres moteurs, le prix d'entretien d'une pile le rend impossible. Il ne peut convenir que pour des applications de luxe, telles que le fonctionnement des petites fraiseuses et des tours des dentistes et des horlogers, la ventilation des appartements, les tours d'amateurs, etc. Les professeurs de physique s'en serviront pour faire des expériences qui nécessitent peu de force mécanique, telles que la mise en marche des machines d'électricité statique, etc. A l'Exposition d'électricité de 1881, il actionnait le petit ballon présenté par M. Tissandier. Il a surtout été très remarqué dans des expériences relatives à la locomotion pratique des véhicules et des bateaux légers.

Sur un tricycle de construction anglaise, très lourd (55 kilogr.), M. Trouvé avait disposé un de ses moteurs au-dessous de l'essieu de la roue motrice qui lui communiquait le mouvement par l'intermédiaire d'une chaîne Vaucanson. Le moteur était actionné par six éléments secondaires ou accumulateurs du genre Planté, qu'il construisait avec tant de perfection. Le poids total du véhicule, les piles, le moteur et le cavalier compris, atteignent 160 kilogr., et la force effective du moteur



7 kilogrammètres. Néanmoins, le tricycle s'est mis de lui-même en marche, aussitôt qu'on eut établi la communication électrique et il a parcouru à plusieurs reprises, dans les deux sens, la rue de Valois, à la vitesse d'une bonne voiture de place. L'expérience a duré une heure et demie (*fig.* 138) et est concluante.

La seconde application de M. Trouvé est non moins heureuse que la première; nous voulons parler de son bateau électrique avec lequel il remonta très facilement le courant de la Seine, à Paris, avec trois personnes dans son bateau. Les expériences qui ont eu lieu sur la Seine, au Pont-Royal, les 26, 27, 28 mai et 3 juin 1881, en présence des plus hautes notabilités scientifiques et politiques, n'ont rien laissé à désirer (*fig.* à la page 361). Chaque voyage consistait à remonter la Seine du *pon-ton des touristes*, situé un peu au-dessous du Pont-Royal, jusqu'au pont des Arts, pour redescendre ensuite au point de départ. Le temps pour chacun des voyages s'est trouvé rigoureusement le même du premier au dernier, ce qui prouve bien suffisamment la constance de la pile et la sûreté des effets du moteur de M. Trouvé; chaque expérience comprenait une quinzaine de voyages qui dureraient de une heure et demie à deux heures. Le moteur était actionné par deux batteries de piles au bichromate de potasse de six éléments chacune. Les vitesses obtenues par seconde, mesurées très exactement au moyen d'un loch, ont été de 1<sup>m</sup>,50 ou 4,500 mètres à l'heure, avec une hélice à trois branches, en remontant le courant de la Seine, et de 2<sup>m</sup>,50 ou 8,640 mètres à l'heure, en descendant le fleuve. Cette nouvelle application de l'électricité, rendue tout à fait pratique, est fort étudiée; plus on examine les détails, plus on s'aperçoit que rien n'a été laissé au hasard; depuis le gouvernail, moteur, propulseur, jusqu'à la disposition des batteries, tout dénote une grande habileté.

**TRANSMISSION DE LA FORCE AU MOYEN DE L'ÉLECTRICITÉ.** — Pour le moment, il faut se contenter de demander à l'électricité des ouvrages délicats, exigeant une grande vitesse et peu de force, par exemple le travail des télégraphes, des machines à diviser, etc. Peut-être cependant que le problème de l'électricité à bon marché comporte une solution indirecte, en réalisant la transmission de la force à distance.

Ce problème de la transmission de la force est un de ceux qui occupent le premier rang dans les applications mécaniques de tous genres. La tendance que l'industrie a de nos jours à se diviser, la nécessité d'employer les machines dans des lieux éloignés de toute force motrice, l'économie sérieuse réalisée par l'emploi d'un moteur central, au lieu d'un grand nombre de petits moteurs, ont amené quelques industriels à s'occuper d'une façon toute spéciale de cette question, et les résultats

ne se sont pas fait attendre. Le tramway électrique qui a paru à l'Exposition de 1881 démontre que l'électricité est parfaitement applicable comme moyen de locomotion (*fig.* à la page 369); mais ce système ne peut être employé que pour des distances de quelques centaines de mètres.

Trois systèmes se trouvent actuellement en présence pour réaliser cette transmission :

1° Au moyen de deux machines dynamo-électriques réunies par un fil conducteur, et dont l'une reçoit la force d'un moteur, et la transmet, au moyen d'un fil, à l'autre machine, qui peut alors mettre en mouvement l'outil que l'on veut actionner ;

2° Au moyen des accumulateurs, dans lesquels on emmagasine de l'électricité, et que l'on peut ensuite transporter en un lieu quelconque où cette électricité est alors employée, pour mettre en mouvement une machine électrique, qui actionne les outils réclamant l'emploi de cette force ;

3° Enfin le transport de la force peut encore s'obtenir par ce que l'on a appelé la canalisation de l'électricité, c'est-à-dire au moyen de tuyaux, dans lesquels on fait circuler l'électricité, et où on peut la puiser à l'aide de branchements, comme cela a lieu pour l'eau et le gaz.

Nous dirons un mot de ces trois modes de transmission considérés surtout au point de vue pratique :

1° *Transmission au moyen de fils conducteurs.* — La machine Gramme possède, comme la plupart des autres machines dynamo-électriques, la propriété d'être réversible, c'est-à-dire que, si on la met en mouvement au moyen d'un moteur, elle engendre un courant électrique, tandis qu'au contraire, si on la fait traverser par un courant électrique, elle se met en mouvement sous son action, et fournit du travail moteur.

En un mot, elle transforme aussi bien le travail moteur en électricité, que l'électricité en travail moteur.

Si donc deux machines semblables sont placées à une certaine distance, et réunies par un fil conducteur, et que, au moyen d'un moteur, quelconque, une prise d'eau, une machine à vapeur, etc., nous mettions l'une d'elles en mouvement, elle engendrera un courant qui, parcourant le fil, ira faire tourner la seconde machine, sur laquelle on pourra recueillir une partie du travail que reçoit la première. Nous disons une partie du travail; car, dans la transmission de cette force, il y a des pertes occasionnées par le frottement, l'échauffement du fil, etc., comme cela a lieu pour toutes les machines et pour tous les fluides. Le rendement qui, dans les premières expériences, était environ de 50 0/0, a été

bientôt dépassé, par suite de l'application de machines construites spécialement dans ce but, et a atteint le chiffre de 60 0/0, qui s'élèvera encore au fur et à mesure que des expériences réitérées sur la nature et la section du conducteur, la tension du courant, le mode de construction et la vitesse des machines, auront permis d'établir, suivant les distances, toutes ces parties dans les conditions les plus propres à l'effet que l'on se propose d'obtenir. Dans tous les cas, un rendement de 60 0/0 seulement est déjà très avantageux dans beaucoup de cas, et supérieur à celui de la plupart des autres modes de transport du travail dynamique.

Les premiers essais de la transmission électrique de la force motrice furent faits en 1873, à l'exposition de Vienne, par M. H. Fontaine. En 1876, à l'exposition de Philadelphie, il n'y eut pas autre chose que la reproduction de cette expérience ; de même, en 1878, à Paris. A cette époque, M. l'ingénieur Chrétien prit un brevet pour l'application de ce mode de transport aux grues et appareils de levage ; puis d'autres brevets furent encore pris par M. Félix. Il y eut bientôt des pompes, des machines-outils, des machines à battre, des scieries, des machines à coudre, à broder, à plisser, à imprimer, des appareils perforateurs, etc. Des expériences sérieuses de labourage par l'électricité eurent lieu à Sermaize en 1879 ; la presse s'en occupa en France et à l'étranger. Il convient d'en dire un mot.

Le labourage à l'électricité est en tout semblable au labourage à vapeur. A chaque extrémité du champ est placé un chariot, portant un treuil, sur lequel s'enroule le câble d'acier destiné à la traction de la charrue. Une machine Gramme, montée sur le chariot, est en communication avec l'appareil moteur (machine à vapeur économique, roue hydraulique, etc.), qui peut être à une distance de plusieurs kilomètres. Cette machine commande à volonté le treuil d'enroulement du câble ou un mouvement de translation du chariot. Entre les deux chariots extrêmes est disposée la charrue. Un homme, placé sur le siège de la charrue, peut, à l'aide d'un volant qu'il fait tourner dans un sens ou dans l'autre, la maintenir dans la direction voulue, qui est celle déterminée par la position des deux machines ; il suffit seul pour la commande. Dès que la charrue arrive au bout du champ, l'homme tourne un commutateur, qui, interrompant le circuit, produit l'arrêt instantané de la charrue. On fait alors commander, par la machine, le mouvement de translation du chariot qui avance de la quantité voulue, égale à la largeur de trois sillons, puis on dégage le tambour, afin qu'il ne s'oppose pas au déroulement du câble. Alors l'homme posté à l'autre chariot tourne le commutateur de celui-ci, de façon à fermer le circuit, et le treuil, se mettant

\*

immédiatement en fonction, enroule le câble qui tire en sens inverse la charrue, que l'on avait eu le soin de relever, afin de la remettre dans de nouveaux sillons. La vitesse est environ celle du pas d'un homme, et elle trace des sillons de 0<sup>m</sup>,25 de profondeur. On arrive ainsi, par ce procédé, à labourer 30 ou 40 ares par heure. La manœuvre est très simple, ce qui est un grand avantage pour les travaux agricoles, où l'on n'a le plus souvent sous la main que des hommes peu initiés à la conduite des outils mécaniques.

A côté de l'appareil à labourer, on voyait la machine à battre Hermann-Lachapelle, actionnée également par une machine Gramme. C'est avec cette machine que M. Félix exécute les opérations qui se font à l'intérieur des fermes ou dans leur voisinage immédiat, comme le battage, le vannage, le triage, l'élévation de l'eau pour les besoins de l'exploitation et pour les irrigations. Il suffit en effet, pour cela, de réunir, par une courroie la poulie de la machine Gramme sur un chariot à l'instrument dont on veut se servir. Cette espèce de locomobile électrique a le grand avantage, sur les locomobiles à vapeur, de ne peser que quelques centaines de kilogrammes et de pouvoir être transportée partout, aussi bien dans un grenier qu'ailleurs, car elle n'emporte avec elle aucune cause d'incendie ni d'explosion. La seule précaution à prendre est de surveiller le graissage, afin d'éviter l'échauffement des coussinets, ce qui est d'ailleurs très facile.

Citons encore, parmi les applications de l'électricité à l'agriculture qui se sont produites en public à l'Exposition d'électricité, les scieries à bois de M. Arbey, le constructeur bien connu, et dont l'emploi, dans l'exploitation des forêts, rend de si grands services pour le débitage des bois ; les locomobiles à lumière électrique de M. Albaret, de Liancourt, si utiles dans les travaux de fermes, pour certains travaux de nuit urgents ; les lampes de MM. Roulier et Arnoult pour le mirage des œufs ; les couveuses à eau chaude munies d'un thermomètre électrique avertisseur ; les couveuses réglées par l'électricité de M. Frémond ; les gaveuses, etc., etc.

2° *Transmission au moyen des accumulateurs.* — La question de l'emmagasinage de l'électricité n'est pas nouvelle, et, dès l'année 1860, M. Gaston Planté obtenait des résultats assez satisfaisants avec sa pile secondaire, qui, disons-le tout de suite, ne pouvait être, à cette époque, qu'un appareil de laboratoire. Ce n'est guère que récemment que l'on a cherché à accumuler, d'une façon industrielle, la force électrique considérable fournie par les machines dynamo-électriques, et, quoique l'on ne soit pas encore arrivé à des résultats bien probants, il est permis d'espérer

qu'il y a là une source féconde à exploiter. En effet, quoi de plus commode que cette boîte qu'il suffit de mettre en communication avec une machine électrique pour la remplir d'électricité, si je puis m'exprimer ainsi, et que l'on peut ensuite transporter là où le besoin s'en fait sentir, sans être astreint à conserver une communication avec la source électrique, chose souvent très gênante et quelquefois même impraticable.

Les applications des accumulateurs sont encore restreintes, et il est nécessaire d'en étudier et d'en réaliser de nouvelles ; mais, par les progrès faits en peu de temps, on peut augurer des résultats que l'on pourra atteindre avant peu, dans les multiples voies d'application qui sont ouvertes.

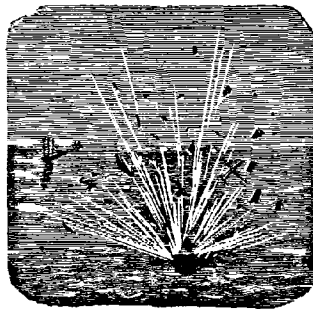
3° *Transport de la force par la canalisation de l'électricité.* — Au bout de la section agricole, à l'Exposition d'électricité, on remarquait une table d'une dizaine de mètres de longueur sur laquelle étaient posés des tuyaux formant une conduite analogue aux conduites d'eau. Il s'agissait de faire circuler, dans ces tuyaux, de l'électricité recueillie à une extrémité, exactement comme on fait pour le gaz. L'inventeur, M. Parod, explique ainsi le mode d'action de son procédé. Supposons qu'à une distance de 100 kilomètres, par exemple, de Paris, on ait une force motrice à utiliser ; on établira, à cet endroit, une machine dynamo-électrique, qui développera un courant qu'il s'agit de recueillir, pour le faire agir, non seulement à la distance de 100 kilomètres, mais encore à chaque point intermédiaire, suivant les besoins. Pour cela, on établit une conduite composée de tuyaux en cuivre recouverts d'un manchon en caoutchouc, sur lequel est appliquée, à l'extérieur, une feuille d'étain. Un second manchon ou tube de caoutchouc enveloppe le tout.

Le tuyau ainsi composé a une grande analogie avec une bouteille de Leyde. L'armature intérieure est formée par le tuyau de cuivre, et l'armature extérieure par la feuille d'étain.

Ces tubes sont enfermés dans un tuyau extérieur en poterie, afin de les protéger contre l'humidité ou toute autre cause de déperdition. Si on met les deux pôles de la machine en communication avec les deux armatures du tuyau, l'électricité se répandra immédiatement sur les deux surfaces, et cela d'un bout à l'autre du tuyau, qui n'est alors autre chose qu'un condensateur ordinaire, où l'électricité s'accumule en tension. Si, à l'autre extrémité de la conduite, on recueille cette électricité au moyen de deux conducteurs, pour l'utiliser comme force motrice, par exemple, il s'établit, dans la conduite, un courant analogue à celui du gaz, quand un robinet est ouvert à l'extrémité d'une conduite. L'électricité est alors toujours en mouvement : celle qui est absorbée pour le travail étant

constamment remplacée par celle qui est développée par le moteur initial. De plus, si, dans le parcours de la conduite, une ou plusieurs autres sources d'électricité peuvent être utilisées, on peut renforcer le courant produit en versant, pour ainsi dire, dans la conduite l'électricité fournie par ces sources. Enfin, et ce serait là l'application la plus intéressante, on peut utiliser cette électricité, la puiser en un point quelconque de la conduite. Pour cela, il suffit de brancher une conduite secondaire sur la conduite principale, en ayant soin de réunir soigneusement, au point de jonction, les surfaces conduisantes.

Ce mode de transport de la force électrique n'est encore qu'à l'état naissant; dans tous les cas, l'idée en est ingénieuse et il est certain que ce mode de transmission sera utilisé, surtout pour de petites distances. Comme pour les deux autres systèmes, de grandes améliorations doivent y être apportées pour qu'il soit praticable. Ils n'en est pas moins vrai qu'il y a là de grands progrès, qui amèneront, nous le répétons, la transformation complète de l'industrie.



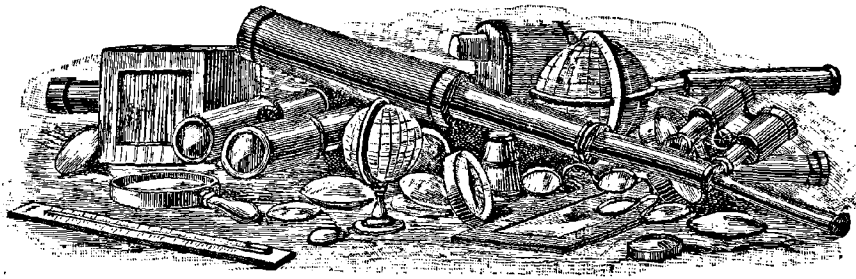
PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



LIVR. 150.







## LIVRE VIII

### OPTIQUE

---

#### CHAPITRE PREMIER

##### PROPAGATION, VITESSE ET INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE

**DÉFINITIONS. — HYPOTHÈSES.** — On appelle *optique* la partie de la physique qui traite de la *lumière*. La *lumière* est l'agent qui, par son action sur la rétine, produit en nous le phénomène de la *vision*.

Pour expliquer l'origine de la lumière, il a été proposé les deux mêmes hypothèses que pour la chaleur (*Chaleur*, page 387) : celle de l'*émission* et celle des *ondulations*. La première, qui remonte aux philosophes de l'antiquité, et qui, dans les temps modernes, a été soutenue par Newton, suppose que les corps lumineux émettent dans toutes les directions les molécules excessivement ténues d'une matière impondérable, qui se propage avec une vitesse, pour ainsi dire infinie. Ces molécules pénètrent dans notre œil, et, agissant sur la rétine, produisent la vision. L'hypothèse des *ondulations*, défendue par Descartes, Grimaldi, Huyghens, Euler, Thomas Young, Malus, Fresnel, est généralement admise aujourd'hui. Comme pour la chaleur, les molécules des corps sont, d'après cette hypothèse, animées d'un mouvement vibratoire infiniment rapide qui se transmet à l'*éther* ; en sorte qu'il suffit qu'une

source de lumière mette l'éther en vibration en un quelconque de ses points, pour qu'aussitôt ce mouvement se transmette de proche en proche, sous la forme d'ondes sphériques, à peu près comme le son se propage dans l'air par les ondes sonores (*Acoustique*, page 756). La lumière est donc une vibration, comme le son. Un objet éclairé peut être comparé à un instrument de musique; l'instrument produit des vibrations sonores qui impressionnent l'oreille; la lumière résulte de vibrations beaucoup plus ténues et plus rapides, qui impressionnent l'organe visuel. Chaque corps est accordé pour vibrer dans un ton donné; de la lumière qui lui arrive, il fait deux parts: une toute superficielle, qu'il renvoie telle qu'elle lui parvient; une seconde qui pénètre dans les autres corps. Ces vibrations, transmises dans l'intérieur, engendrent des vibrations dépendantes de la nature du corps, et ce sont celles-ci qui finalement nous donnent le ton lumineux de l'objet, sa couleur. Tel objet nous envoie des vibrations basses, qui nous donnent la sensation du rouge, sa musique est rouge; tel autre des sensations aiguës, sa musique est violette. Il n'est pas ainsi un corps dans la nature qui ne soit dans un perpétuel état de mouvement; il vibre sans cesse: si les vibrations sont lentes, elles ne produisent sur nous que les sensations de chaleur; si elles sont rapides, elles amènent la sensation lumineuse. La lumière solaire, celle que nous appelons *blanche*, renferme toutes les couleurs, comme nous le verrons ci-après; elle joue, pour continuer cette comparaison, une symphonie lumineuse très complexe. Mais si les objets sur lesquels elle tombe ne sont pas accordés de façon à recevoir les mêmes vibrations, à rendre les mêmes notes, évidemment la symphonie ne sera pas reproduite intégralement, l'écho ne redira que certaines notes; et c'est ainsi que l'objet ne pourra dire que du rouge, du vert, du bleu, suivant sa constitution. Un objet pourra même ne rien renvoyer à l'œil: il pourra absorber et éteindre toutes les vibrations; il restera silencieux pour la lumière; cet objet, assez comparable au coton, à la ouate, qui éteignent les vibrations sonores, nous apparaîtra noir. Quand un corps ne réfléchit pas les ondes lumineuses et les absorbe toutes, il donne nécessairement la sensation du noir.

On appelle *corps lumineux* tout corps qui fait naître en nous la sensation de la clarté, toute *source de lumière*. Ces sources de lumière sont le soleil, les étoiles, la chaleur, les combinaisons chimiques, la phosphorescence, l'électricité, certains phénomènes météorologiques. On ignore l'origine de la lumière émise par le soleil et les étoiles; mais on suppose qu'elle est due à l'inflammation de gaz qui entourent ces astres. Pouillet prétend que la lumière due à la chaleur est produite lorsque les corps

sont élevés à une température de 500 à 600 degrés. Un grand nombre de combinaisons chimiques produisent la lumière, par suite de l'élévation de température développée.

La *phosphorescence* est la propriété particulière à certains corps d'émettre naturellement de la lumière dans certaines circonstances sans qu'il y ait le moindre dégagement de chaleur. M. E. Becquerel, qui a étudié profondément ce genre de phénomènes, les rapporte à cinq causes : 1° Phosphorescence spontanée, qui s'observe dans les bois ou les végétaux pourris, les chairs de poissons en putréfaction, certains animaux vivants, comme le *lampyre* ou ver luisant, le *pyrophore noctiluque* au Mexique, les *iules*, les *fulgores* aux Indes, ou dans ces innombrables animalcules, entre autres le *noctiluque militaire*, qui, parfois couvrent la mer et la rendent toute lumineuse, surtout quand elle est un peu agitée. 2° Phosphorescence par effets mécaniques, tels que la percussion, l'exfoliation, etc. 3° Phosphorescence par élévation de température, comme certains diamants, qui, chauffés à 300 ou 400 degrés, émettent des lueurs. 4° Phosphorescence par l'électricité, comme cela se produit par le frottement du mercure dans un tube vide. 5° Phosphorescence par insolation, c'est-à-dire par une exposition prolongée aux rayons solaires : certains minéraux, comme le diamant, le spath-fluor, le marbre blanc, deviennent ainsi lumineux dans l'obscurité.

Un industriel anglais, M. Balmain, a trouvé le moyen d'exploiter industriellement cette propriété très développée dans les phosphures des métaux terreux, principalement le phosphure de calcium, les phosphures de baryum et de strontium, qui sont phosphorescents après insolation. A l'Exposition du Palais de l'Industrie en 1879, il présenta des montres et des pendules dont les aiguilles se détachaient en noir sur le cadran, qui, la nuit, brillait d'un éclat bleuâtre. Il désigne aujourd'hui son produit sous le nom de *peinture lumineuse*. Les applications en sont innombrables : la boîte d'allumettes que l'on retrouvera facilement lorsqu'on rentrera chez soi pendant la nuit, les lampes des trains de jour qui seront remplacées par le plafond lumineux pendant le passage des tunnels, les plaques des rues indiquant les noms, et, pour les objets plus utiles encore, les bouées employées pour marquer un chenal et qui, lumineuses, permettront de reconnaître la route, les plongeurs qui, sous l'eau, pourront s'apercevoir entre eux, etc. Tous les visiteurs de l'exposition du Palais de Cristal en 1882 ont été émerveillés du succès des expériences qui leur ont été présentées sur ce sujet.

La *fluorescence* est une sorte de phosphorescence instantanée, d'une durée très courte, que présentent certains corps, tels que le sulfate de

quinine, la cornée d'un grand nombre d'animaux, quand ils reçoivent les rayons ultraviolets du spectre solaire.

Sans être lumineux, les corps peuvent produire de la lumière, s'ils sont *éclairés*; ils émettent alors de la lumière en vertu des lois de la *réflexion*, que nous étudierons ci-après.

Les corps *diaphanes* ou *transparents* sont ceux à travers lesquels la lumière passe facilement et à travers lesquels on peut distinguer très bien les objets; tels sont l'eau, le gaz, le verre, etc. Les corps *translucides* permettent à la lumière de passer, mais on ne peut distinguer les objets placés derrière eux; tels sont le verre dépoli, le papier huilé, etc. Enfin

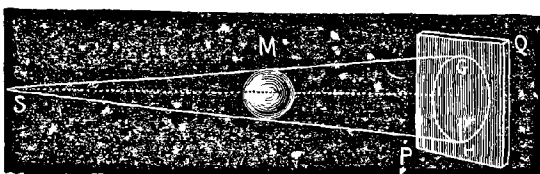


Fig. 139. — CÔNE D'OMBRE.

ceux qui ne se laissent pas traverser par la lumière, comme le bois, les métaux, sont dits corps *opaques*. Il n'existe pas, en réalité, de corps véritablement opaques; il suffit, pour les rendre trans-

lucides, de les réduire en plaques assez minces. De même, les corps les plus transparents, tels que le verre, finissent par devenir opaques si l'on augmente considérablement leur épaisseur.

On appelle *rayon lumineux* la ligne que suit la lumière en se propageant. Dans un milieu *homogène*, c'est-à-dire dont toutes les parties sont identiques en composition chimique et en densité, la ligne du rayon lumineux est parfaitement droite : on peut s'en assurer en interposant un corps opaque sur la ligne droite menée de l'œil à un corps lumineux. La réunion de plusieurs rayons forme un *pinceau* ou *faisceau* de lumière. Des pinceaux de lumière sont *parallèles* si les rayons qui les composent suivent la même direction; *divergents* ou *convergens*, s'ils vont en s'écartant ou en se rapprochant les uns des autres.

**OMBRE, PÉNOMBRE, REFLET.** — Les corps opaques arrêtant les rayons de la lumière, il en résulte que, derrière la partie éclairée de ces corps, il doit y avoir un espace privé de lumière; cet espace est l'*ombre*. Pour déterminer la forme et l'étendue de cette ombre projetée, il faut considérer deux cas.

1° Si la lumière est un point S (fig. 139) devant lequel on place un corps opaque M, que l'on imagine par ce point S un cône dont la nappe soit tangente à la surface du corps opaque, il est évident que, dans tout l'intérieur de ce cône, au delà du corps opaque, aucun rayon lumineux ne pourra pénétrer; toute cette portion de l'espace sera dans l'obscurité.

C'est le *cône d'ombre*. L'intersection de ce cône d'ombre par une surface PQ donne lieu à une portion plus ou moins noire GH, qui est ce qu'on appelle *ombre portée*.

2° Quand le corps opaque, au lieu d'être éclairé par un seul point, reçoit sa lumière d'un corps lumineux de dimensions finies, l'ombre qu'il donne ne se détache pas brusquement de la lumière ; mais le passage de l'une à l'autre se fait par dégradations, par nuances insensibles, qui occupent une étendue plus ou moins grande, suivant les circonstances dans lesquelles se trouve le corps éclairé. Cette ombre imparfaite a reçu le nom de *pénombre*. Soient deux sphères, SL lumineuse et MN opaque (*fig. 140*) ; menons un plan par la ligne des centres et tirons la tangente ASMG commune aux deux cercles d'intersection. Si nous faisons tourner cette ligne

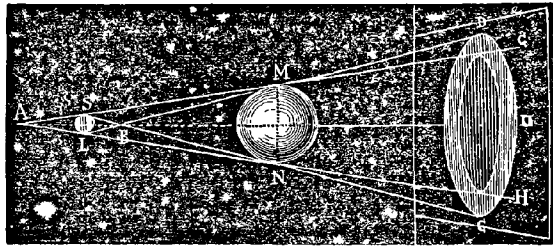


Fig. 140. — OMBRE ET PÉNOMBRE.

autour du point A en l'appuyant toujours sur les surfaces des deux sphères, nous décrirons un cône GMSALNH dont le sommet est en A, et dont toute la partie MNGH comprendra exactement l'ombre projetée par la sphère opaque MN. Menons maintenant les deux tangentes LMD, SNC qui se croisent entre les sphères, en un point B situé sur la ligne des centres Aa, elles forment un nouveau cône DMBNC dont le sommet est en B. On voit alors que tous les points situés au-dessus de la surface extérieure de ce cône sont complètement éclairés par la sphère lumineuse SL, mais que les points compris entre les deux surfaces coniques ne sont ni absolument obscurs, ni entièrement éclairés, de sorte que si l'on place une surface plane PQ derrière le corps opaque, sa portion *d* sera tout à fait obscure, mais que la portion annulaire *ab* recevra la lumière de certains points du corps lumineux, mais non de tous les points. Cette portion de surface apparaîtra donc plus éclairée que celle qui est tout à fait obscure, mais moins que le reste ; c'est la *pénombre*.

Les ombres dont nous venons de parler sont les *ombres géométriques* ; pour les *ombres physiques*, c'est-à-dire celles que l'on observe réellement, elles ne sont jamais rigoureusement limitées. Les rayons lumineux qui rasant la surface des corps s'infléchissent en effet les uns en dedans, les autres en dehors de l'ombre géométrique, en vertu d'un phénomène appelé *diffraction*, observé par Grimaldi, qu'ont étudié Newton et Thomas Young, et dont Fresnel a donné la théorie.

Quand un corps opaque intercepte la lumière par une de ses faces, la partie obscure n'est pas absolument sombre, elle est plus ou moins éclairée par la lumière qu'émettent les corps voisins : cet effet de réverbération s'appelle le *reflet*. Comme la lumière reflétée par un corps participe en général de la couleur de ce corps, il en résulte que les reflets ont la teinte des objets voisins. Les peintres utilisent les effets de lumière produits par les reflets.

**PROPAGATION DE LA LUMIÈRE A TRAVERS LES OUVERTURES ÉTROITES.** — Si l'on reçoit sur un écran un faisceau lumineux pénétrant

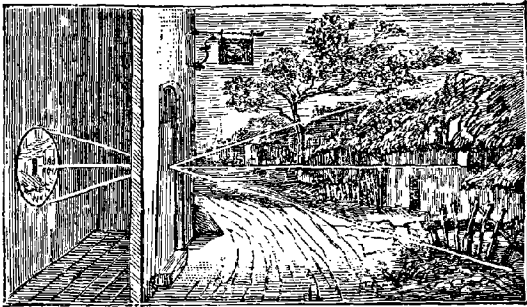


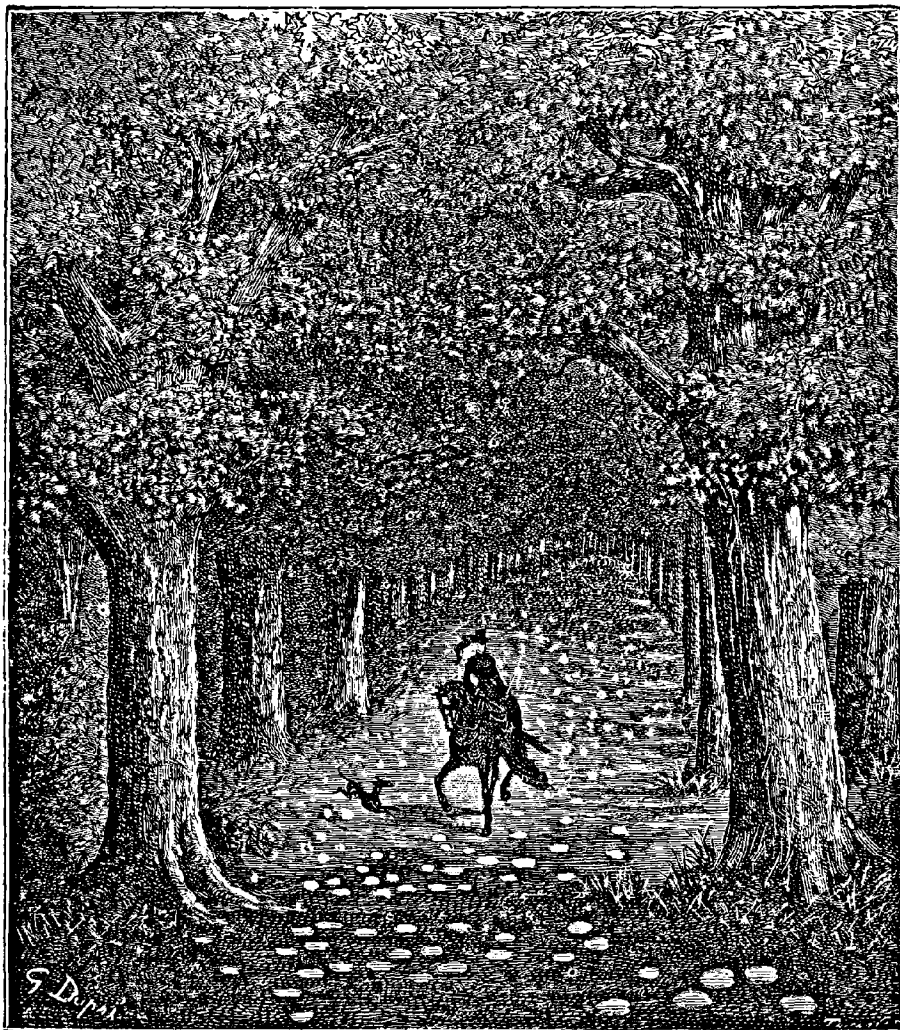
Fig. 141. — CHAMBRE NOIRE.

dans une chambre noire par une petite ouverture, on obtient l'image des objets extérieurs, et l'on observe les deux phénomènes suivants : 1° *L'image des objets est renversée* ; 2° *leur forme est absolument indépendante de la forme de l'ouverture par laquelle entre le faisceau lumineux*. Ces résultats s'ex-

pliquent facilement (*fig. 141*). Le renversement est dû au croisement même des rayons dans la petite ouverture ; les rayons partis du point le plus élevé de la source de lumière, se propageant en ligne droite, rencontrent l'écran à la partie inférieure, tandis que les plus bas vont aboutir à la partie supérieure. Quant à la forme de l'image, elle est indépendante de celle de l'ouverture, si celle-ci est petite. En effet, vu la grandeur du soleil, le petit trou n'est en réalité qu'un point, qui est le sommet d'un cône lumineux dont le soleil est la base. En se prolongeant, les rayons forment un second cône semblable au premier, mais plus petit. Si l'on place l'écran perpendiculairement au faisceau lumineux, on aura donc l'image circulaire du soleil. Si l'écran est oblique, l'image sera oblongue ; mais, à moins que l'écran ne soit très près de l'ouverture, il ne présentera pas la forme de celle-ci. C'est ainsi que les rayons solaires qui pénètrent à travers les feuillages, donnent des taches lumineuses rondes ou ovales sur le sol, selon la position du soleil à l'horizon, mais jamais la forme des interstices des feuilles (*fig. à la page 385*).

**VITESSE DE LA LUMIÈRE.** — La propagation de la lumière n'est nullement instantanée ; cependant sa vitesse propre, entrevue par Bacon et

nar Galilée, n'a été réellement bien mise en évidence qu'au xvii<sup>e</sup> siècle. Au moyen de calculs astronomiques, le savant danois Olaf Rømer démontra, en 1675, devant l'Académie de Paris, que, pour venir du soleil



Les rayons du soleil qui pénètrent à travers les feuillages... (page 384).

à la terre, la lumière emploie 8 minutes 13 secondes, ce qui donne une vitesse d'environ 308,000 kilomètres par seconde, chiffre un peu trop fort. Depuis, les physiciens ont résolu le problème à l'aide de méthodes toutes différentes. La première est due à Fizeau et date de 1849 : en

voici le principe. Une source de lumière L est placée en face de la circonférence d'une roue R (fig, 142), portant des dents très régulières et tournant uniformément avec une très grande vitesse. Les rayons émanant de cette source de lumière sont rendus parallèles à l'aide d'une lentille convergente C. Ce faisceau, après avoir rasé la roue, est dirigé sur un miroir plan N, situé à une grande distance; il tombe sur sa surface normalement, de manière à être rigoureusement réfléchi dans la même direction NM et à être renvoyé exactement au point de départ. La lumière va et vient; elle passe par l'intervalle de deux dents de la roue et retourne au point de départ par cet intervalle. La roue étant mise en mouvement, si elle tourne très vite, il est clair que pendant que le

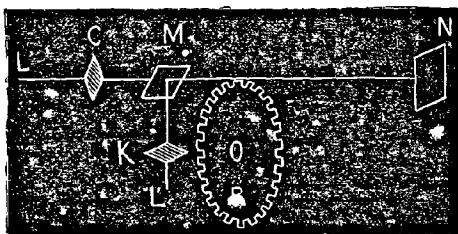


Fig. 142 — VITESSE DE LA LUMIÈRE.

faisceau ira et reviendra, une dent de la roue aura pu prendre la place du creux et la lumière sera interceptée au retour; ou, au contraire, un intervalle nouveau aura pu prendre la place du précédent, et la lumière passera. On conçoit très bien que, connaissant la vitesse de la roue, la distance fran-

chie par le faisceau lumineux, on puisse en conclure la vitesse de la propagation de la lumière. Fizeau, dans ses expériences, avait placé la roue dentée à Montmartre et le miroir réflecteur à Suresnes; distance, 8,500 mètres. Il trouva que la lumière se propage, dans l'air, avec une vitesse de 315,364 kilomètres par seconde.

En 1862, Léon Foucault combina une autre méthode, dont le principe est celui du miroir tournant déjà employé par Wheatstone pour mesurer la vitesse de l'électricité (*Électricité statique*, page 59). Il trouva 298,197 kilomètres seulement, chiffre qui frappa d'autant plus qu'il confirmait, par une tout autre voie, des résultats astronomiques récents:

Cependant il y avait grand intérêt à reprendre de nouveau cette détermination et à la contrôler. M. Cornu, ingénieur des mines, professeur de physique à l'École polytechnique, s'est préoccupé de cette question, et, en 1873, il a fait plus de mille expériences, par la méthode Fizeau, entre l'École polytechnique et le Mont-Valérien (distance contrôlée, 10,310 mètres).

La moyenne des valeurs obtenues est de 298,500 kilomètres par seconde pour la vitesse de la lumière dans le vide: c'est, on le voit, à peu près la valeur déjà donnée par Foucault.

On peut conclure de toutes ces expériences que la vitesse de la



lumière dans l'air est environ de 300,000 kilomètres par seconde. Dans l'eau, la vitesse  $y$  est moins grande ; le rapport est d'environ  $\frac{4}{3}$ .

**INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÈTRES.** — On appelle *intensité* d'une lumière l'éclairement que produit cette source de lumière sur une surface placée à l'unité de distance. La mesure de cette intensité est l'objet de la *photométrie* (du grec *phos*, *photos*, lumière, et *metron*, mesure), étude dont se sont surtout occupés Huyghens, Celsius, Bouguer, Lambert, Saussure, Leslie, etc. Ainsi, l'on dira que l'*intensité* de la flamme d'une bougie n'est que la quinze millième partie de celle du soleil ; qu'une lampe Carcel éclaire comme sept bougies, un bec de gaz comme neuf bougies ; que la lumière électrique a une intensité de quatre à cinq fois moindre que celle du soleil et qu'elle équivaut par conséquent, à 3,000 à 3,750 bougies.

La mesure de l'intensité d'une lumière est soumise aux deux lois suivantes :

1° *L'intensité d'une lumière reçue normalement sur une surface donnée est en raison inverse du carré de la distance au foyer lumineux.*

2° *L'intensité d'une lumière reçue obliquement sur une surface donnée est proportionnelle avec l'inclinaison de la surface qui l'émet ou qui la reçoit.*

La première de ces deux lois se démontre par le même raisonnement que nous avons employé pour démontrer la cinquième loi relative à l'intensité de la chaleur rayonnante (*Chaleur*, page 488), l'identité de la chaleur et de la lumière étant, comme nous l'avons dit, une chose généralement admise. Quant à la seconde, si l'on coupe par un écran, normalement à l'axe, un faisceau lumineux, on obtient un cercle éclairé ; si l'on vient à incliner l'écran, la surface éclairée devient elliptique et grandit ; l'éclairement reporté sur une surface plus grande doit donc être moins intense ; c'est ce que confirme l'expérience.

Pour apprécier les rapports d'intensité de deux lumières ou de deux éclairements, l'œil peut approximativement le faire, lorsque les lumières ont à peu près la même teinte ; mais il n'est pas plus habile à apprécier l'intensité d'une vibration lumineuse que l'oreille ne l'est à apprécier celle de la vibration sonore, et la difficulté est à peu près absolue quand les lumières à comparer ont des couleurs différentes. Cependant, en se basant sur le principe de la proportionnalité inverse des éclairements aux carrés des distances et à l'aide d'appareils appelés *photomètres*, on arrive à comparer l'intensité de deux lumières. Nous indiquerons les principales méthodes photométriques.

Le *photomètre* de Bouguer, un des premiers employés, consiste en une lame de verre douci verticale, au milieu de laquelle est placé perpendiculairement un écran vertical; de part et d'autre de cet écran sont disposées les deux lumières, de sorte que chacune d'elles éclaire une moitié de la lame de verre; on déplace les lumières jusqu'à ce que la lame soit éclairée uniformément. On a alors  $\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2}$ , D et D' étant les distances des lumières à la lame de verre.

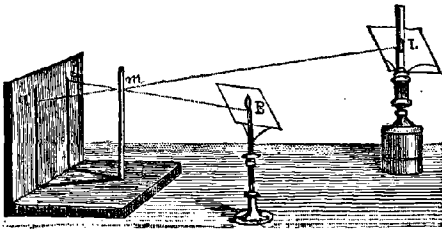


Fig. 143. — PHOTOMÈTRE DE RUMFORD.

Le *photomètre* de Rumford est le plus simple et le plus généralement exact. C'est une lame de verre dépoli (fig. 143) devant laquelle on fixe une tige cylindrique opaque *m*. A une certaine distance on place les deux lumières à comparer, une lampe *L* et une bougie *B*, de sorte que chacune d'elles projette sur la lame de verre une ombre de la tige *m*. Ces ombres sont d'abord d'une intensité inégale; mais si l'on éloigne ou l'on rapproche, en tâtonnant, l'une et l'autre des lumières, on arrive à avoir deux ombres portées identiques, ce qui marque que la lame de verre est également éclairée par les deux sources de lumière. On a donc encore  $\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2}$ , en vertu de la loi citée.

La pièce principale du *photomètre* de Wheatstone (fig. 144) est une perle d'acier *P*, placée sur le bord d'un disque de liège, porté lui-même sur un pignon *o*, qui engrène intérieurement avec une roue plus grande, fixée sur une boîte cylindrique de cuivre que l'on tient d'une main, tandis que de l'autre on tourne une manette *A*. Cette manette transmet le mouvement à un axe, au rayon *a* et au pignon *o*, lequel tourne en suivant le bord intérieur de la grande roue, et en même temps sur lui-même, double mouvement auquel participe la perle *P* en décrivant un mouvement en forme de rosette comme l'indique la figure. Ceci compris, soient *M* et *N* deux lumières dont on veut comparer les intensités. On place, entre elles le photomètre; l'on fait tourner rapidement le système et les points bril-

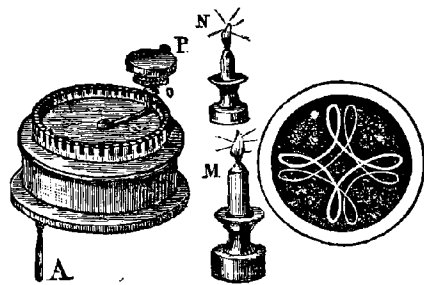


Fig. 144.

PHOTOMÈTRE DE WHEATSTONE.

lants produits par la réflexion de ces deux lumières sur les deux points opposés de la perle donnent naissance à deux rosettes lumineuses ayant la forme que donne la seconde figure. Si l'une d'elles est moins intense, soit celle de M, on éloigne l'appareil jusqu'à ce que les deux rosettes soient identiques ; puis, comme précédemment, on calcule les intensités respectives des deux lumières d'après le degré d'éloignement du photomètre.

Bunsen a imaginé un *photomètre* bien simple. Au milieu d'une feuille de papier blanc tendu sur un cadre, il fait une petite tache d'huile. A droite et à gauche de la feuille de papier on place les lumières à comparer, plus ou moins loin, de façon que la tache n'apparaisse plus, de quelque côté du papier que l'on regarde. Les deux surfaces sont alors également éclairées. En effet, l'œil recevra des lumières les rayons réfléchis par le papier, de l'autre les rayons transmis par la tache translucide ; la perte de la lumière donnée par transmission étant égale à la perte de la lumière par réflexion, on devra en conclure l'égalité des éclairagements.

L'inconvénient des *photomètres* est qu'ils ne peuvent servir qu'à comparer des lumières de même teinte.

Un Américain, M. John Draper, a proposé un moyen tout à fait différent pour mesurer l'intensité de la lumière ; cette mesure, en effet, intéresse l'horticulture, la photographie, etc. Certaines substances se transforment sous l'influence de la lumière : le peroxyde de fer, entre autres, exposé aux rayons lumineux, dégage du gaz acide carbonique avec effervescence et acquiert la propriété de précipiter l'or métallique en suspension dans une solution de perchlorure d'or, la quantité de métal précipité dépendant de la quantité de lumière ayant agi sur le peroxyde.

On fait donc bouillir jusqu'à saturation une quantité donnée d'acide oxalique avec du peroxyde de fer nouvellement préparé. Le peroxyde qui en résulte est filtré et projeté ensuite dans un tube gradué, en verre mince, d'un demi-pouce de diamètre, contenant un peu de perchlorure de fer et placé dans une boîte noircie à l'intérieur, de façon à absorber tous les rayons. L'appareil ainsi disposé, on l'expose à la lumière dont on veut mesurer l'intensité, puis on ajoute du perchlorure d'or jusqu'à ce que tout précipité ait cessé de se produire. Ce précipité recueilli sur un filtre, lavé, séché et fondu au feu, on le pèse. Le résultat indique exactement la quantité approximative de lumière diffuse qui a agi pendant la période d'exposition. Ainsi, par exemple, si devant une lumière on recueille 50 milligrammes d'or, et avec une seconde placée dans les mêmes conditions seulement 20, l'intensité de la première sera à la seconde comme 50 est à 20. M. Niepce de Saint-Victor a démontré que, dans ces expériences, la chaleur ne joue aucun rôle et que la lumière seule agit.

## CHAPITRE II

## RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE — MIROIRS

**LOIS DE LA RÉFLEXION.** — *Quand un rayon de lumière tombe sur une surface polie, il se réfléchit en faisant un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, et ces deux angles sont dans un même plan normal à la surface.*

Cet énoncé est le même que celui que nous avons donné pour la réflexion de la chaleur (*Chaleur*, page 490). Nous parlions déjà de l'identité

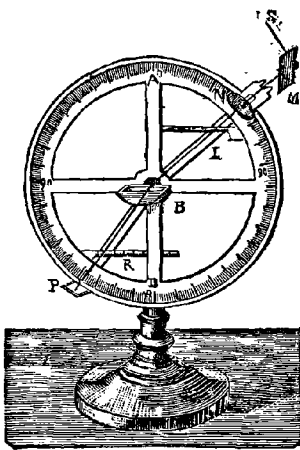


Fig. 145.

LOI DE LA RÉFLEXION.

de la lumière et de la chaleur, et nous disions que la loi commune de la réflexion était susceptible d'une vérification très rigoureuse. Pour cela, on se sert d'un appareil (*fig. 145*) qui consiste en un cercle de cuivre gradué, disposé verticalement. Le zéro de la graduation est en A, et celle-ci est tracée à droite et à gauche jusqu'à 90°. Deux règles de cuivre I et R tournent librement sur un tourillon central derrière le cercle. L'une d'elles porte une petite plaque de verre dépoli P, et l'autre une plaque opaque N ayant au centre une petite ouverture, et un miroir M, qui peut s'incliner plus ou moins, mais en restant toujours perpendiculaire au plan du cercle gradué. Enfin, au centre de l'appareil est un miroir B exactement horizontal. Ceci posé, l'on reçoit un rayon de lumière S sur le miroir M, que l'on incline de façon que le rayon réfléchi passe dans l'ouverture ménagée au centre de N et tombe sur le miroir B; là, il subit une seconde réflexion, et prend la direction BP, que l'on détermine en écartant ou en rapprochant la plaque P jusqu'à ce que l'image de l'ouverture de N vienne se former au centre. Alors on lit sur le limbe les nombres de degrés des angles d'incidence et de réflexion et l'on constate qu'ils sont égaux. On voit en même temps que ces angles sont dans un même plan perpendiculaire à la sur-

face, car, dans la construction, de l'appareil, on a eu soin que les règles fussent dans un plan parallèle au cercle, et conséquemment perpendiculaire à la surface du petit miroir B.

On démontre plus rigoureusement encore cette loi à l'aide d'un *théodolite*, instrument dont on se sert plus particulièrement en géodésie et en astronomie. Cet instrument (*fig.* à la page 393) consiste en un axe vertical A implanté au centre d'un cercle horizontal divisé C, appelé *cercle azimutal*. Un deuxième cercle divisé B est vertical, et mobile autour de l'axe A; les déplacements du plan de ce cercle se lisent sur le cercle azimutal. Une lunette L peut se déplacer dans un plan vertical en tournant autour du centre de B, et ses déplacements sont appréciés sur ce cercle. L'appareil porte des vis calantes qui permettent de le régler. Pour démontrer la loi, on dispose le théodolite de manière à viser avec la lunette L une étoile près de passer par son point de culmination. La lunette est alors dans la position 1 (*fig.* 146). Soit OZ la verticale qui passe par le centre du cercle, l'angle SOZ est la distance zénithale de l'astre observé. On fait alors tourner le cercle B de l'instrument de  $180^\circ$

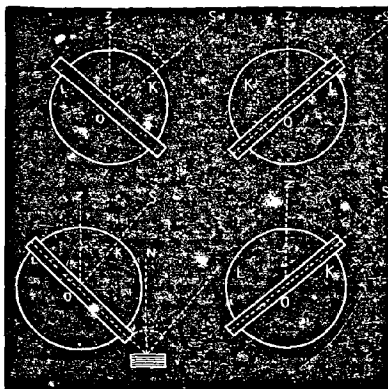


Fig. 146.

EXPÉRIENCE DU THÉODOLITE.

autour de l'axe A, ce qui amène la lunette dans la position 2. Pour pointer de nouveau l'étoile, il faut amener la lunette dans la position 3 en la faisant mouvoir autour du centre du cercle B. Si L et K sont les divisions du cercle qui correspondent aux deux positions de la lunette, il est évident que l'angle KOL est le double de SOZ, c'est-à-dire de la distance zénithale, de sorte que cette distance est connue, et que, de plus, les opérations précédentes ont fait connaître par quelle division du cercle A passait son diamètre vertical. On dispose alors auprès du théodolite un bain de mercure M, dont la surface est très réfléchissante et parfaitement horizontale; la normale est verticale. On vise avec la lunette l'image réfléchie de l'étoile, et on remarque que cette lunette se trouve alors dans la position LO précisément inverse de celle de la position 2. Or l'angle LOZ est égal à l'angle de réflexion  $r$  comme correspondant, et égal aussi à l'angle  $z$ , d'après les premières opérations; mais  $r$  est aussi égal à l'angle d'incidence  $i$ , car IS et OS sont parallèles; donc il faut que  $r$  et  $i$  soient égaux entre eux, puisque chacun d'eux est égal à  $z$ .

**INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE RÉFLÉCHIE. — RÉFLEXION IRRÉGULIÈRE. —**

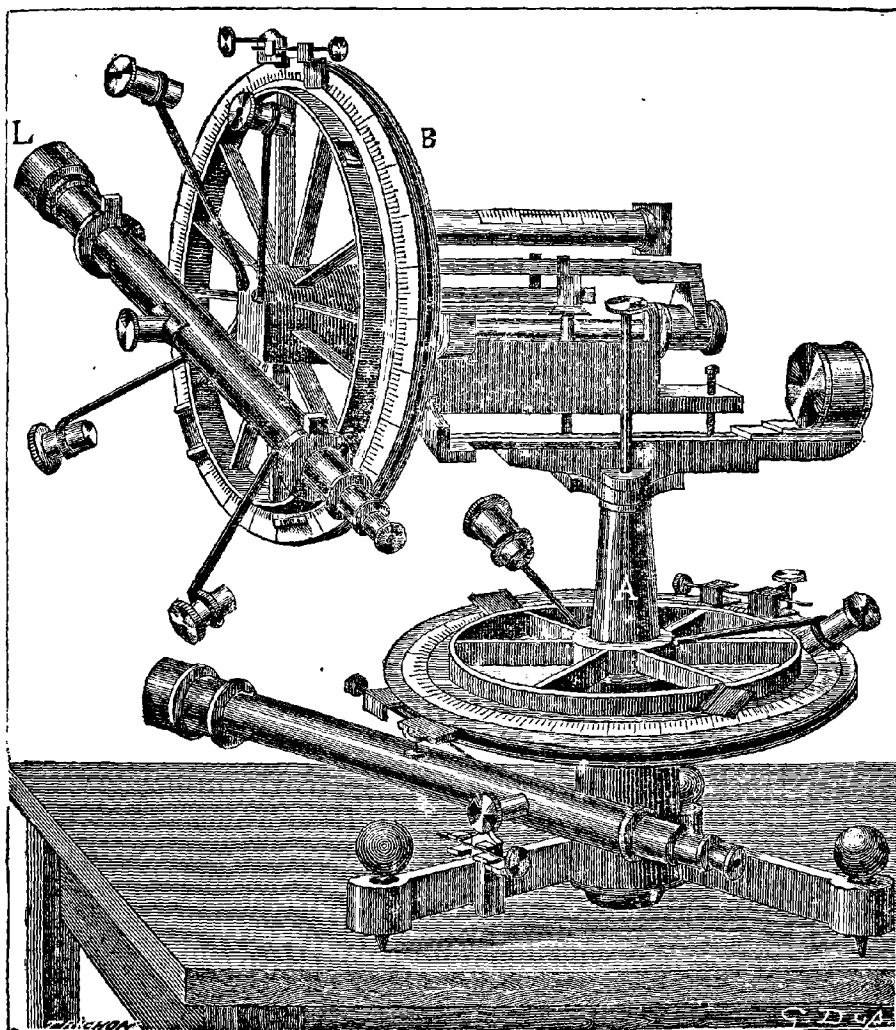
Dans les corps de même nature, l'intensité de la lumière réfléchie augmente avec le degré de poli de la surface réfléchissante et avec l'angle que forment avec cette surface les rayons incidents. Dans les corps de nature différente, et ayant un même angle d'incidence, la réflexion varie également suivant la nature de ces corps, et d'après les lois que nous avons indiquées pour les rayons calorifiques.

La *réflexion* dont nous venons de donner la loi s'applique exclusivement à celle qui s'opère sur les corps polis ; on la désigne sous le nom de *réflexion régulière* ou *réflexion spéculaire* (de *speculum*, miroir). Il y a une autre sorte de réflexion, la *réflexion irrégulière*, qui se produit sur les corps à surface rugueuse ; et alors la loi ci-dessus n'est plus rigoureusement vraie. Cette réflexion irrégulière porte le nom de *diffusion*, et la lumière ainsi réfléchie est la *lumière diffuse*. En vertu de cette réflexion, une surface frappée par un faisceau de lumière devient le siège de faisceaux dirigés dans toutes les directions de l'espace ; c'est ainsi que les corps opaques *éclairés* sont visibles et peuvent être considérés comme des corps lumineux. Si ces corps ne réfléchissaient la lumière que régulièrement, ce ne sont pas eux que nous verrions, mais l'image du corps lumineux dont ils nous renverraient la lumière : ainsi, placés sur le trajet d'un rayon de soleil réfléchi par un miroir, nous verrions l'image du soleil, mais nous ne verrions pas le miroir.

**MIROIRS.** — Un *miroir* est un corps opaque qui possède une surface polie propre à réfléchir la lumière régulièrement. Les miroirs destinés aux opérations délicates de la physique se construisent ordinairement avec des métaux. Les miroirs de verre *étamé* sont rejetés parce qu'ils ont deux surfaces réfléchissantes : la surface antérieure du verre qui est polie, et donne une réflexion peu intense et la surface de l'étamage qui réfléchit le plus grand nombre de rayons lumineux. On peut s'assurer facilement de cette double réflexion en regardant obliquement devant une glace la flamme d'une bougie. Cela fournit un moyen de s'assurer de l'épaisseur du verre : on appuie la pointe d'un crayon contre la glace. L'image la plus intense devant paraître derrière la couche d'étain à la même distance qu'est la pointe du crayon en avant, l'intervalle compris entre la pointe du crayon et la pointe de son image représente le double de l'épaisseur réelle du verre.

D'après la forme de leur surface, les miroirs se distinguent en *miroirs plans* et *miroirs courbes*, et ces derniers en *concaves*, *convexes*, *sphériques*, *paraboliques*, *coniques*, etc.

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE SUR LES MIROIRS PLANS. — Tout le monde connaît l'effet d'un miroir plan et sait que l'image d'un objet placé devant se forme, par la réflexion de la lumière, sur ce miroir. Voici ce qui



Theodolite (page 391).

se passe. Soit d'abord un point, la flamme d'une bougie, par exemple, placé devant un miroir (*fig. 147*). Le rayon de lumière qui part de ce point vers le miroir se réfléchit dans la direction RO de l'œil de l'observateur en formant un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Du point A abais-

sons la perpendiculaire AD sur le miroir, et prolongeons cette perpendiculaire et le rayon réfléchi OR jusqu'à ce qu'ils se rencontrent en A' derrière la surface du miroir. On a deux triangles ARD et DRA' qui sont égaux, comme ayant un côté commun RD adjacent à deux angles égaux. Étant égaux, toutes leurs parties sont égales, donc  $DA' = DA$ , c'est-à-dire qu'un rayon quelconque parti d'un point lumineux se réfléchit dans une direction telle, que son prolongement derrière le miroir vient couper la perpendiculaire AA' en un point A' symétrique du point A. Voilà pourquoi

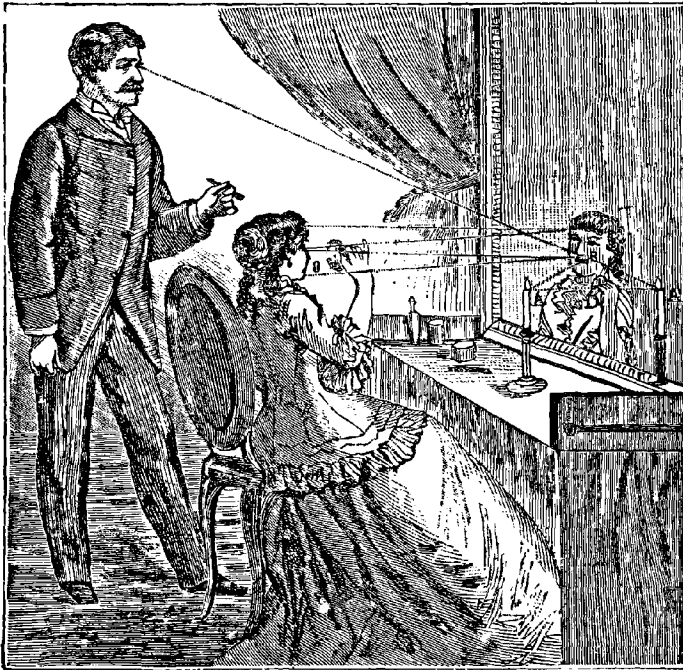


Fig. 147. — EFFET DES MIROIRS PLANS.

notre œil se fait illusion et croit voir le point A en A'. Donc, l'image d'un point, donnée par un miroir plan, est située derrière le miroir et à distance égale sur le prolongement de la perpendiculaire abaissée de ce point sur la surface du miroir. Ces images ne sont pas réelles, c'est une illusion de l'œil; on les appelle *images virtuelles*.

elles, par opposition aux *images réelles* qui sont produites dans les miroirs concaves et dans les lentilles. Si, au lieu d'un point, on considère un corps quelconque, il suffit, pour interpréter cette image, de reproduire le raisonnement ci-dessus pour chacun des points de ce corps. Dans la fig. 147, par exemple, les lignes indiquent comment les rayons, partant du front ou du menton de la femme qui se regarde dans le miroir, reviennent vers l'œil, pour donner l'image du front et du menton.

Nous avons remarqué ci-dessus que le verre, malgré sa grande diaphanéité, réfléchissait assez les objets pour donner des images, faibles, il est vrai, mais suffisantes pour qu'on ait dû ne pas se servir de cette substance lorsque les miroirs sont destinés à des opérations délicates. Il en



est de même pour l'eau et pour tous les liquides transparents. Ainsi, sur le bord de l'eau (*fig. 148*) on voit se former dans le liquide l'image renversée des objets situés sur la rive.

Lorsqu'un objet est situé entre deux miroirs qui forment entre eux un angle droit ou aigu, il donne des images dont le nombre croît avec l'inclinaison de ces miroirs. Si l'un des deux est perpendiculaire à l'autre, trois images sont reproduites (*fig. 149*) : les rayons  $OQ$  et  $OD$ , qui partent du point lumineux  $O$ , donnent, pour première réflexion, l'image  $O'$  pour l'un, et pour l'autre l'image  $O''$ , et le rayon  $OA$ , qui a subi deux réflexions en  $A$  et en  $B$ , produit la troisième image en  $O'''$ . Lorsque l'angle formé par les deux miroirs est de  $60^\circ$ , il se forme cinq images, et sept si l'angle est de  $45^\circ$ ; le nombre des images croît ainsi à mesure que l'angle diminue, effet qui résulte de



Fig. 148.

RÉFLEXION A LA SURFACE DE L'EAU.

ce que les rayons lumineux supportent d'un miroir à l'autre un nombre croissant de réflexions.

Si un objet lumineux est placé entre deux miroirs parallèles, le nombre des images produites est théoriquement infini, mais physiquement ce nombre est limité, parce que la lumière incidente n'étant jamais réfléchi tout entière, les images réfléchies sont de moins en moins brillantes

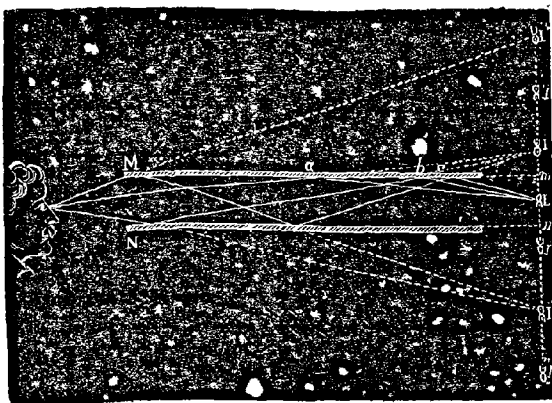


Fig. 149.

IMAGES SUR DES MIROIRS PLANS INCLINÉS.

et finissent par ne plus apparaître. La *fig. 150* montre comment le rayon lumineux  $La$ , réfléchi une seule fois sur le miroir  $M$ , donne une image  $I$ , à une distance  $mI = mL$ ; puis le rayon  $Lb$ , réfléchi une fois sur le miroir  $M$ , puis en  $N$ , produit l'image  $I'$ , à une distance  $nI' = nL$ ; de même le rayon  $Lc$ , après deux réflexions sur  $M$  et une sur  $N$ , forme l'image  $I''$  à une distance  $mI'' = mL$ ; et ainsi successivement. Quant aux images  $i$ ,

$i'$ ,  $i''$ , elles sont formées de la même façon par les rayons de lumière qui, partis de l'objet lumineux L, tombent d'abord sur le miroir N.

**APPLICATIONS DIVERSES DES MIROIRS PLANS.** — La réflexion de la lumière sur un ou plusieurs miroirs diversement agencés a donné lieu à de nombreuses applications utiles ou curieuses. Nous en citerons quel-

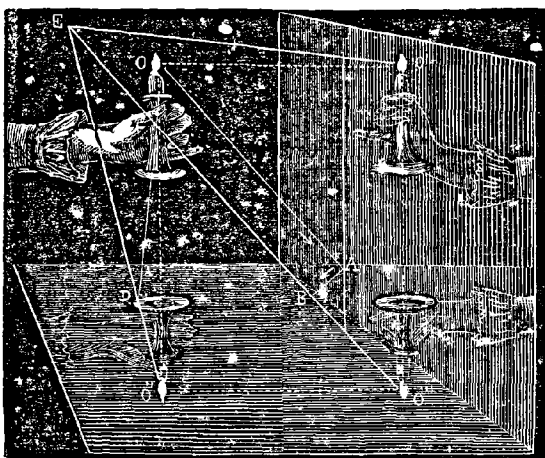


Fig. 150.

IMAGES MULTIPLES SUR DES MIROIRS MULTIPLES.

quelles-unes. En plaçant extérieurement des fenêtres des miroirs, mobiles autour d'une charnière, et appelés *espions*, on peut voir ce qui se passe dans la rue, soit pour n'ouvrir la porte qu'à ceux qui ne sont point importuns, soit pour les marchands, afin de surveiller leurs étalages du fond de leurs magasins. Sous le nom de *polémoscope*, un appareil composé de deux miroirs inclinés à  $45^\circ$  sur l'horizon permet à des officiers, cachés derrière un parapet ou un épaulement, de surveiller les mouvements de l'ennemi. Le miroir supérieur réfléchit les rayons lumineux provenant d'objets lointains, sur le miroir inférieur où l'on a une image de la plaine. La production des *spectres* au théâtre se fait à l'aide d'une glace sans tain, disposée sur une partie de la scène, et qui, à cause de la demi-obscurité faite à dessein dans la salle, est invisible pour les spectateurs (fig. 151). Derrière cette glace s'agitent les acteurs : sous la scène, est éclairé



Fig. 151. — LES SPECTRES AU THÉÂTRE.

vivement le personnage jouant le rôle du spectre; son image se réfléchit dans la glace, et semble sur la scène un fantôme qui vient se mêler à l'action. Le *décapité parlant* est encore une illusion produite par l'emploi des miroirs plans. Une personne est assise sous une table, de façon que sa tête seule ressorte, comme si elle était prise dans un carcañ. Elle est

cachée entre des miroirs disposés entre les pieds de la table, laquelle affecte la forme d'un angle dièdre dont l'arête est tournée vers le public. Ces miroirs réfléchissent les parois latérales de la salle, et ces images sont vues à une distance en arrière, qui est celle à laquelle se trouve le fond de la salle. Les tentures étant partout les mêmes, on croit en effet voir le fond de la salle, de sorte qu'il semble que rien n'existe entre les pieds de la table.

Il est d'autres applications plus sérieuses. Le *kaléidoscope* (du grec *kalos*, beau, et *eidos*, image), qui, inventé par Brewster en 1817, sert surtout de jouet d'enfant, est souvent utile aux fabricants et aux dessinateurs industriels pour trouver des modèles de dessins. C'est un simple tube de carton ou de métal, clos à chaque bout par des verres blancs et garni intérieurement dans sa longueur de deux lames de verre plus ou moins inclinées l'une sur l'autre. A l'une des extrémités on place des petits objets mobiles et diversement colorés, qui, par leur réflexion dans les lames de verre, produisent une infinité de dessins réguliers et très agréables à l'œil, que l'on peut varier à l'infini en tournant le tube.

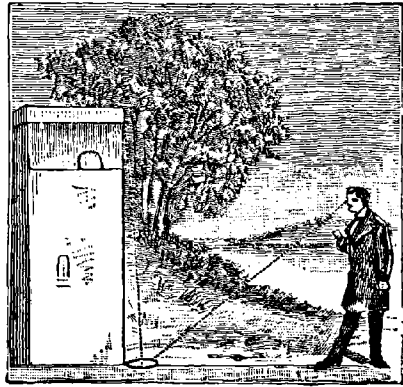


Fig. 152. — MESURE DES HAUTEURS.

Un miroir plan donne un moyen facile de mesurer la hauteur verticale des objets, tels que maisons, arbres, édifices, etc. On place bien horizontalement, sur le sol, le miroir plan; puis on s'éloigne dans la direction de la ligne qui joint le pied de l'objet à mesurer au miroir (*fig. 152*), jusqu'à ce qu'on aperçoive sur ce dernier l'image du sommet A. En vertu des principes de géométrie sur la similitude des triangles, la hauteur  $Bb$  de l'œil au-dessus du sol est alors à la hauteur de l'objet  $AC$  comme la distance horizontale  $bO$  est à la distance horizontale  $OC$  du pied de l'objet. En un mot, on a :

$$\frac{AC}{Bb} = \frac{OC}{bO}; \text{ d'où l'on déduit } AC = \frac{OC}{bO} \times Bb.$$

Enfin les miroirs plans sont appliqués dans le *sextant*, le *cercle de Borda*, les *héliotropes*, les *héliostats*, les *goniomètres*, etc.

Le *sextant* est un instrument qui sert aux marins pour mesurer les angles, et notamment la hauteur des astres et leur distance angulaire, et conséquemment, pour déterminer la position où est leur navire. Il est

basé sur ce principe que lorsqu'un rayon a subi deux réflexions successives sur deux miroirs plans, l'angle de déviation de ce rayon est rigoureusement double de l'angle des deux miroirs. Il se compose (fig. 153) d'un limbe gradué AB formant à peu près la 6<sup>e</sup> partie d'un cercle et portant deux petits miroirs en verre, l'un N fixé transversalement à l'un des rayons et étamé sur sa moitié inférieure seulement, l'autre M placé au centre du limbe et pouvant tourner autour de ce centre, à l'aide d'une

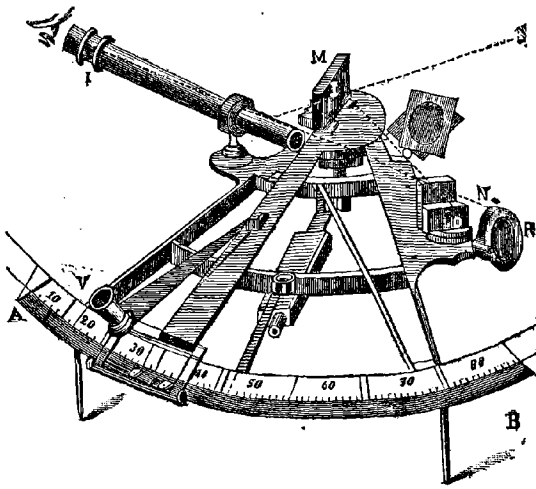


Fig. 153. — SEXTANT.

alidade avec laquelle il fait corps, portant un vernier V qui permet de lire les degrés sur le limbe AB. Une lunette L est fixée dans le plan du limbe, en face du miroir fixe N. Si, en mettant le limbe dans le plan de l'angle à mesurer, on place l'alidade de manière à rendre les deux miroirs parallèles, et que l'on vise l'objet R qui détermine l'un des côtés de cet angle, on verra non seulement cet objet directement au travers de la partie non étamée du miroir fixe N,

mais encore son image produite par réflexion successive sur les deux miroirs en O et en I et qui coïncidera avec lui-même. Que l'on déplace alors l'alidade, de sorte qu'avec le premier objet R, vu directement, vienne coïncider l'image par double réflexion de l'objet S qui détermine le second côté de l'angle, l'angle dont il aura fallu la faire tourner sera égal à la moitié de l'angle à mesurer lui-même. On n'aura donc qu'à lire sur la division du limbe le nombre de degrés dont l'alidade a tourné et à doubler ce nombre.

En effet (fig. 154), soit S l'un des points considérés; il doit être assez éloigné pour que les rayons qu'il envoie au miroir M et à la lunette puissent être considérés comme parallèles entre eux. Quand l'alidade est au zéro de la graduation, un rayon parti de S et réfléchi sur le miroir M, de manière à faire avec la normale N un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, se réfléchit de nouveau sur le miroir fixe *m* et arrive à la lunette L, comme s'il venait directement de S. Si l'on fait tourner le miroir M d'un angle  $\alpha$ , c'est alors un rayon parti du second point S' qui,

après réflexion sur les deux miroirs, pénètre dans la lunette. L'angle  $S'MS$  est celui qu'il faut mesurer. Or si  $mM$  était un rayon lumineux parti de  $m$ , il se réfléchirait dans la première position de  $M$  suivant  $MS$ , tandis que, dans la deuxième position du même miroir, il se réfléchirait suivant  $MS'$ . Mais les deux rayons réfléchis  $mS$  et  $mS'$  doivent faire entre eux l'angle  $2a$  : on peut le voir, car le rayon incident  $mM$  faisait avec le premier rayon réfléchi l'angle  $mMS = 2i$  ; quand le miroir a tourné, la normale, transportée de  $N$  en  $N'$ , a tourné aussi de l'angle  $a$  ; l'angle d'incidence est devenu  $i + a$ , et l'angle du rayon incident avec le rayon réfléchi  $MS'$  est devenu  $2i + 2a$ , ayant augmenté de  $2a$ . On a donc bien  $SMS' = 2a$ .

Un autre appareil, fondé sur le même principe, appelé *cercle de Borda*, diffère du sextant en ce qu'un cercle complet remplace l'arc divisé ; il a plusieurs avantages, entre autres celui de présenter une plus grande précision.

Nous nous contenterons de dire l'usage auquel sont destinés quelques-uns des autres instruments construits sur les principes de la réflexion de la lumière ; leur description nous entraînerait à des détails qui sortiraient du domaine de la physique.

L'*héliotrope* est un appareil destiné à faire voir à un observateur un point très éloigné, à l'aide de rayons solaires réfléchis en ce point ; on s'en sert surtout dans les grandes opérations géodésiques : au lieu de prendre pour sommet d'un triangle un clocher, par exemple, ce qui ne peut pas toujours se faire, on vise un point où se trouve situé un héliotrope. Les *héliostats* sont des miroirs plans, mus par un système d'horlogerie, de manière à suivre le mouvement du soleil et à en réfléchir les rayons dans une direction constante ; imaginés par S' Gravesande, ils ont été perfectionnés par Gambey, Silbermann et Foucault. Ce dernier a donné à ses héliostats, plus commodes et plus précis, le nom de *sidérostats*. Les *goniètres* sont des instruments destinés à mesurer les angles des cristaux ; le plus connu est le *goniètre à réflexion de Wollaston*.

Mais qu'il nous soit permis d'entrer dans quelques détails sur des expériences récentes de *télégraphie optique*, mode de communication rapide, basé sur l'emploi des miroirs plans, extrêmement simple, n'exigeant qu'un matériel des plus restreints, d'une installation immédiate et appelé à recevoir les applications les plus variées. Dans les localités qui

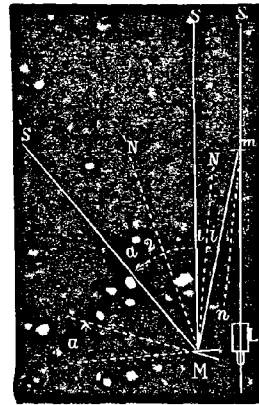


Fig. 154.

THÉORIE DU SEXTANT.

ne comportent pas l'établissement d'une ligne électrique, pour correspondre d'un village à l'autre, pour relier ensemble les diverses parties d'une exploitation agricole ou industrielle, ou d'une ligne de travaux très étendus, pour les chemins de fer ou les canaux, on utilisera certainement ces télégraphes optiques. Au point de vue militaire, ce système de télégraphie peut également être précieux. En temps de paix, on s'en servira pour établir des communications entre les différentes fractions d'un corps de troupe, réparties dans des positions peu éloignées. En temps de guerre, les télégraphes électriques nécessitent un matériel encombrant, sont quelquefois difficiles à établir, et impossibles dans les pays occupés par l'ennemi; la télégraphie optique aura son emploi assuré à côté du télégraphe de campagne.

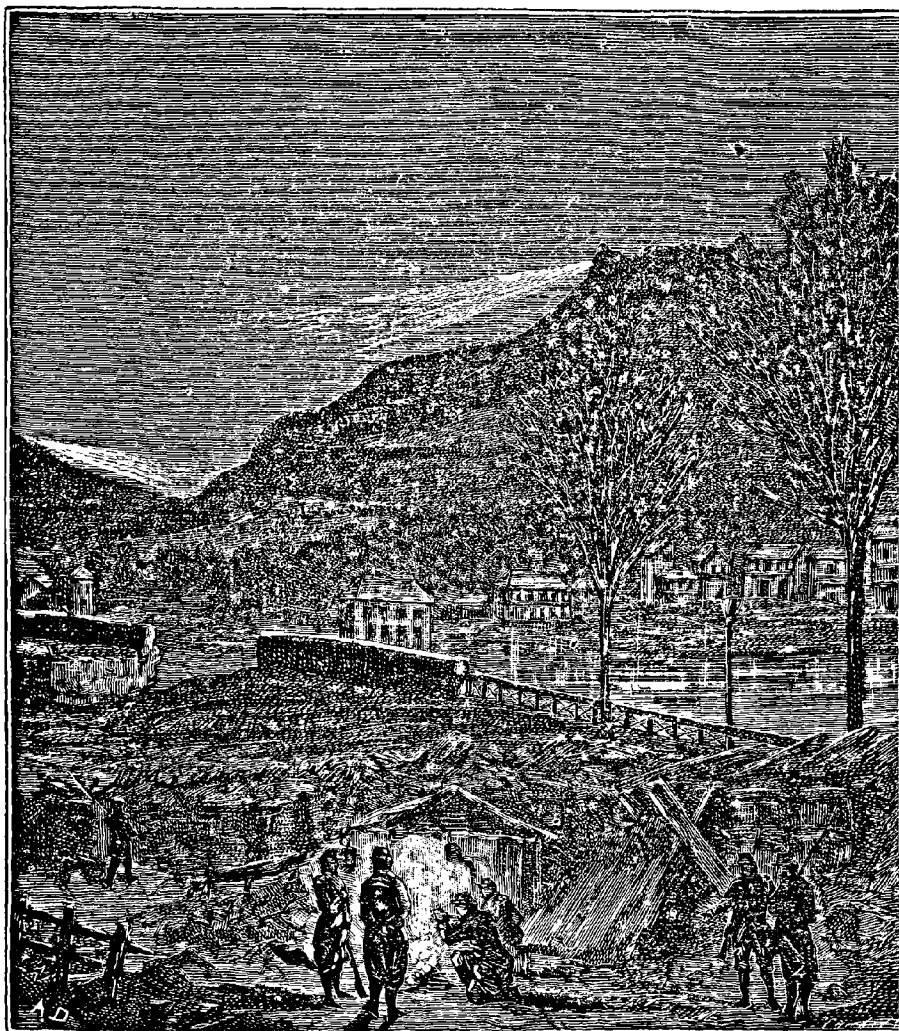
Cette question de correspondances échangées au moyen de la lumière ne date pas d'aujourd'hui. Dès le xvii<sup>e</sup> siècle, il y eut un télégraphe optique proposé par François Kessler. L'appareil se composait d'un tonneau dans lequel était disposée une lampe munie d'un réflecteur. Une trappe mobile placée devant le tonneau pouvait être levée ou abaissée au moyen d'un levier. Pour représenter la lettre A on soulevait la trappe une fois, pour la lettre B deux fois, pour la lettre C trois fois et ainsi de suite. Cette méthode avait le grave inconvénient d'exiger un temps très long pour transmettre quelques mots. En 1881, M. Godard a renouvelé, au moyen d'un appareil analogue, éclairé par une lampe électrique, et dont les signaux étaient semblables à ceux de la sténographie, des expériences commencées pendant le siège de Paris. En 1870, les Prussiens envoyaient des dépêches pendant la nuit, à l'aide de simples points lumineux blancs ou rouges, successivement émis ou s'éclipsant. Qui n'a pas vu alors, aux avant-postes du côté de Saint-Cloud, la douce clarté des petits fanaux prussiens dans les branches d'arbres (*fig.* à la page 401)?

L'étude de la télégraphie optique, reprise depuis quelque temps, principalement par l'administration des télégraphes militaires, a produit déjà quelques appareils.

Parmi les plus simples, nous citerons le *télélogue*, imaginé par M. Gaumet, ancien élève de l'école supérieure de guerre. Ce télégraphe optique se compose d'un *album* ou *livre de signaux*, d'une quarantaine de feuillets en toile noire mate, sur lesquels sont fixés les signaux argentés, lettres et chiffres, plus un signal d'avertissement formé par un rectangle argenté et quelques signes conventionnels. Il est muni de tiges disposées de manière à former un trépied, de sorte qu'on peut le placer ouvert, à la manière d'un tableau en face du poste récepteur. Celui-ci a une *lunette de réception*, longue-vue qui possède, sous un faible volume et un poids

léger, un grossissement considérable, et qui est installée sur un trépied. On aperçoit avec cette lunette les signaux sur l'album.

L'appareil de M. le colonel Mangin se compose (*fig. 155*) d'une boîte



Télégraphie optique pendant le siège de Paris (page 400).

rectangulaire A, divisée en deux parties par un diaphragme B percé d'un petit trou C. Sur le devant de la boîte est disposée une lentille biconvexe, et au-devant du trou C est placé un obturateur D, qui, à l'aide du levier M, peut déboucher ou obstruer l'ouverture C. Dans la partie postérieure de

la caisse est disposée une lampe munie d'un réflecteur. Pendant la nuit, il suffit d'imprimer à l'obturateur des mouvements longs ou brefs pour émettre des éclats longs ou brefs, représentant les traits et les points de l'alphabet Morse. L'appareil est muni d'une lunette L, fixée solidement

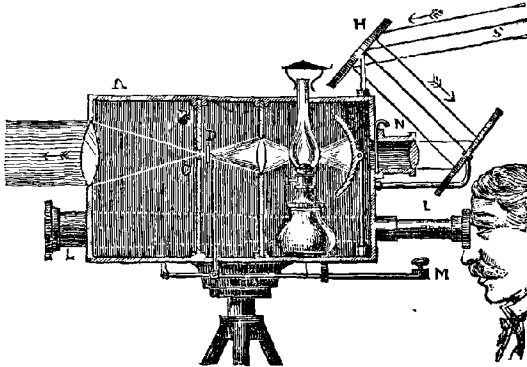


Fig. 155. — APPAREIL DU COLONEL MANGIN.

à la boîte à l'extérieur, avec laquelle on explore l'horizon pour découvrir le rayon de lumière de l'autre station. Pendant le jour, on enlève la lampe et son réflecteur, et on place, à l'extérieur de la boîte, une lentille N destinée à concentrer les rayons du soleil que deux petits miroirs plans, se manœuvrant à la main, font arriver à la lentille. Dans les temps sombres, on peut parfaitement communiquer de jour avec l'appareil de nuit, une lampe à pétrole suffisant à donner des signaux perceptibles jusqu'à 20 kilomètres. Cet appareil a déjà été perfectionné par l'inventeur, qui, à l'Exposition d'électricité de 1881, a remplacé son mode d'éclairage par celui d'une lampe électrique Reynier. Ainsi modifié, ce télégraphe optique semble appelé à rendre des services signalés.

L'héliographe de Leseurre, spécialement construit pour utiliser la lumière solaire, est destiné surtout aux pays qui, comme l'Algérie, jouissent presque continuellement du soleil et où l'établissement des lignes télégraphiques présente quelques difficultés. Voici comment M. Ternaut, dans son livre *les Télégraphes*, décrit cet appareil (fig. 156) :

« Afin de pouvoir correspondre aussi bien aux premières et aux dernières heures du jour qu'en plein midi, M. Leseurre, se rappelant que le soleil, dans son mouvement diurne, décrit un cercle autour de l'axe polaire, a placé dans la direction polaire un axe portant un miroir, dont la normale fait avec cet axe un angle égal à la moitié de la distance du soleil au pôle. En faisant tourner cet axe sur ses coussinets, chaque fois que, dans ce mouvement, la normale du miroir

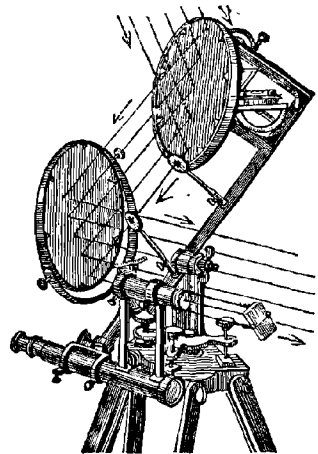


Fig. 156.

HÉLIOGRAPHE DE LESEURRE.



passera dans le méridien actuellement occupé par le soleil, le faisceau réfléchi jaillira vers le pôle. Un second miroir, dont le centre se trouve sur le prolongement de l'arbre du premier, de position évidemment fixe, et dont la direction est telle qu'il réfléchisse vers la station correspondante les rayons solaires réfléchis une première fois suivant la direction polaire, complète l'appareil. Rien de plus simple alors que la manœuvre : il suffit de faire exécuter à l'arbre du miroir mobile autant de rotations qu'on veut produire d'éclairs. M. Leseurre avait aussi imaginé un écran formé de persiennes mobiles. Si les lames de la persienne étaient ouvertes, le faisceau passait, sinon il était arrêté. Une manette manœuvrait l'ensemble des lames. Quant à la masse de lumière réfléchie, elle ne change pas pendant la journée, puisque l'inclinaison du miroir tournant sur le rayon réfléchi reste constante et égale. Mais comme la déclinaison solaire varie chaque jour, M. Leseurre avait disposé en avant du miroir tournant une lunette dont l'axe optique était bien parallèle à celui du miroir. En observant les rayons réfléchis à l'aide de cette lunette on s'assure que le centre de l'image solaire vient se placer sur le point de croisée des fils. Le réglage est facilité par l'addition, dans le réticule, de 2 fils parallèles à l'essieu du miroir, et distants du point de croisée d'un rayon de l'image solaire. On reconnaît, en effet, très simplement, qu'aux environs de la position d'éclair, le soleil réfléchi paraît décrire, lorsque le miroir se meut, une bande parallèle à l'essieu du miroir. »

Cet appareil est, comme on le voit, assez compliqué, et exige pour sa manœuvre des précautions que l'on ne peut pas toujours prendre convenablement en campagne. Aussi, sous ce rapport, l'*héliographe*, imaginé par M. Mance, paraît-il beaucoup plus pratique.

L'*héliographe* se compose d'un miroir pivotant dans un demi-cercle porté par un plateau, qui peut tourner au moyen d'un écrou et d'une vis sans fin, portés par un deuxième plateau fixé sur un trépied. Un trou percé au milieu du miroir permet de voir en avant, tout en restant placé derrière le miroir. En faisant faire une révolution complète au miroir, on balaye l'horizon d'un faisceau de lumière qui attire l'attention de la station correspondante. Une clef Morse, pouvant se rallonger et se raccourcir à volonté, sert à produire l'inclinaison du miroir. Une mire, placée à 4 mètres environ en avant de l'appareil, porte deux hausses, dont l'une est placée dans la direction de la station correspondante, et dont l'autre est disposée pour recevoir le rayon du soleil, réfléchi par le miroir, lorsque celui-ci est au repos. Aussitôt qu'on agit sur la clef Morse, les rayons sont transportés sur la hausse supérieure où ils sont oblitérés, ce qui indique à la station correspondante que l'on est en train de transmettre. Comme on le voit, l'appareil est très simple ; il ne pèse que six livres anglaises (2<sup>k</sup>,721), et il est alors facilement transporté par

un homme. De plus, il peut être aperçu à une distance considérable et la rotondité de la terre paraît être le seul obstacle à sa portée (1).

Ces télégraphes optiques sont d'ailleurs déjà passés dans la pratique. En 1879, on a employé en Angleterre des *héliographes*, composés d'un disque poli de 0<sup>m</sup>,30 de diamètre qui concentre les rayons du soleil, de la lune ou de tout autre foyer lumineux, et les renvoie, par réflexion, sous la forme d'une tache lumineuse à plus de cinquante milles. En 1880, pendant la guerre d'Afghanistan, le général Stewart transmet, entre autres, à une distance directe de plus de 64 kilomètres, un *héliogramme* impor-

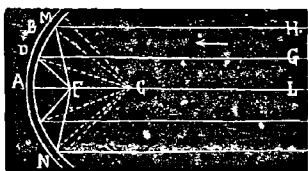


Fig. 157. — MIROIR CONCAVE.

tant, annonçant l'échec d'une tentative d'attaque des Afghans contre les troupes britanniques. A Saratoga, dans l'État de New-York, une lampe électrique, placée sur une tour, au centre d'un réflecteur parabolique a projeté à Ballaston Spa, malgré une nuit noire, une lumière assez vive pour que les personnes réunies en ce point, à plus de 12 kilomètres, aient pu lire leur journal et voir l'heure à leurs montres, grâce à la lumière qui leur était lancée du haut de la tour.

**RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE SUR LES SURFACES COURBES.** — Les *miroirs sphériques* sont des calottes sphériques formant une portion généralement assez petite de la sphère dont ils font partie. Suivant que la réflexion est produite sur sa surface interne ou externe, le miroir est dit *concave* (fig. 157), ou *convexe*. Le centre C de la sphère dont a été détaché le miroir est le *centre de courbure* ou *centre géométrique*, et le point A le *centre de figure*. La droite indéfinie AL, menée par les centres A et C, est l'*axe principal* du miroir, et une droite qui passe seulement par C est un *axe secondaire*. L'angle MCN, formé par l'union du centre avec les extrémités du miroir, est son *ouverture*. On appelle enfin *section principale* d'un miroir la section obtenue en le coupant par un plan passant par l'axe principal. Les lois de la réflexion sur les miroirs plans s'appliquent aux miroirs courbes, en considérant ceux-ci comme formés de surfaces planes très petites, qui en sont les *éléments*. La *normale* à la surface courbe en un point donné est, en conséquence, la perpendiculaire à l'élément correspondant, ou, ce qui revient au même, au plan tangent qui le contient.

On donne le nom de *foyers* aux points où concourent les rayons réfléchis ou leur prolongement : il y a les *foyers réels* et les *foyers virtuels*.

(1) *Chronique industrielle*, 1882.

Dans les miroirs concaves, on distingue le *foyer principal* et le *foyer conjugué*. Si l'on dirige sur le miroir MN un faisceau de rayons parallèles HGL, ceux-ci se réfléchissent en faisant l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion, et tous ces rayons se coupent au même point F, qui est le *foyer principal*. On constate alors que ce point F est le milieu de CA; la distance FA est la *distance focale*, qui est, on le voit, égale à la moitié du rayon du miroir.

Si, d'un point lumineux X, on fait tomber sur le miroir concave un faisceau lumineux (fig. 158), on voit que les rayons réfléchis viennent se couper en un second point  $f$ , que l'on appelle le *foyer du premier*. Réciproquement, si le point lumineux était en  $f$ , les rayons réfléchis deviendraient les rayons incidents, et les rayons incidents les rayons réfléchis; le point  $f$  a donc pour foyer le point X et ces deux points sont

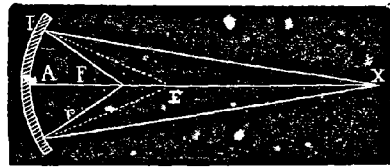


FIG. 158. — Foyers conjugués.

les *foyers conjugués* l'un de l'autre. On remarque que les points X et  $f$  sont placés à une distance plus grande du miroir que le foyer F; de plus, le miroir qui faisait converger en F les rayons parallèles ne fait plus converger qu'en un point plus éloigné  $f$  les rayons divergents de X. Quand le point lumineux est en  $f$ , la divergence des rayons incidents est devenue plus grande; la convergence des rayons réfléchis a diminué. Si

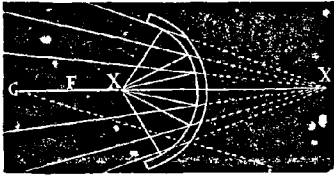


FIG. 159. — Foyer virtuel.

le point lumineux est au foyer F, les rayons réfléchis sortent du miroir parallèlement entre eux. Quand le point lumineux vient se placer entre le foyer et le miroir (fig. 159), la divergence des rayons incidents est devenue trop grande, ils ne convergent plus après réflexion, ils divergent seulement moins; si l'on prolonge au delà du miroir la direction des rayons réfléchis, on obtient le *foyer virtuel* du point lumineux.

**FORMATION DES IMAGES DANS LES MIROIRS SPHÉRIQUES.** — La formation des images dans les miroirs concaves se déduit facilement de l'explication des foyers conjugués et des foyers virtuels. Ajoutons que, si le point lumineux est situé sur un axe secondaire, c'est sur ce même axe que se trouve le foyer. Les miroirs concaves donnent lieu à deux sortes d'images, les *images réelles* et les *images virtuelles*. Les premières se produisent lorsque l'objet est au delà du centre de courbure du miroir, ou entre ce centre et le foyer principal, et alors un œil placé dans une

position convenable apercevra une image *renversée* de l'objet, plus petite si l'objet est situé au delà du centre, plus grande s'il est placé entre ce centre et le foyer principal, égale s'il est placé à peu près au centre. La formation de cette image est facile à expliquer. Soit, en effet, (*fig. 160*) un corps  $AB$  éclairé, placé au delà du centre du miroir  $DE$ . Du point  $A$  partent des rayons lumineux qui, après la réflexion, viennent converger en un point conjugué  $a$ , facile à déterminer ; en menant par le point  $A$  le rayon parallèle à l'axe, celui-ci, après la réflexion, vient passer au foyer principal ; son intersection avec l'axe secondaire  $AC$  est le point  $a$ . Une construction analogue donne le foyer conjugué  $b$  du point  $B$ .

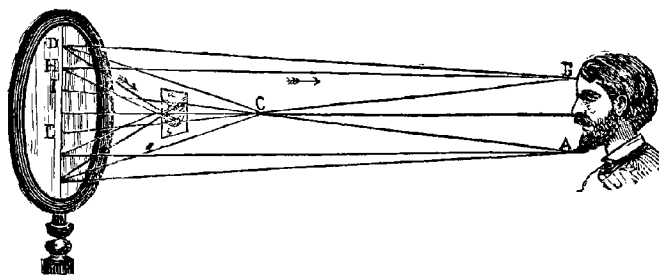


Fig. 160. — IMAGE RÉELLE REÇUE SUR UN ÉCRAN.

Les points compris entre  $A$  et  $B$  ont évidemment leurs foyers conjugués dans les points intermédiaires entre  $a$  et  $b$ . Donc, un œil placé au delà de  $ab$  recevra les rayons qui viennent des différents points de  $AB$  et apercevra, par conséquent, une image renversée  $ab$  de l'objet. Réciproquement, si l'objet éclairé était  $ab$ , l'image serait  $AB$  pour un œil placé au delà de cette ligne.

Si l'objet est situé entre le miroir concave et son foyer principal, l'image est *virtuelle*, et dans ce cas l'image est droite et plus grande que l'objet. Soit un objet  $AB$  ainsi placé (*fig. 161*). Les rayons lumineux partis du point  $A$  forment après la réflexion un faisceau divergent, dont le point de concours est en  $b$ . Pour déterminer ce point, il suffit de mener par le point  $A$  un rayon parallèle à l'axe principal ; le rayon réfléchi passe par le foyer et son prolongement va couper l'axe secondaire au point  $b$ . On détermine de même le point  $a$ , foyer conjugué du point  $B$ . Les points intermédiaires ont leurs foyers situés en  $a$  et en  $b$  ; l'œil placé en avant du miroir recevra donc des rayons dont les points de concours sont les différents points de  $ab$ , et verra, par conséquent, une image qui est droite et évidemment plus grande que l'objet.

Dans les miroirs *convexes*, quelle que soit la distance de l'objet placé devant eux, l'image est toujours virtuelle, toujours droite et plus petite que l'objet (*fig. 162*). Leur théorie s'établit en répétant les mêmes constructions et les mêmes raisonnements que pour les miroirs concaves.

**APPLICATIONS DES MIROIRS SPHÉRIQUES.** — Les miroirs sphériques sont appliqués à l'éclairage de certains objets que l'observateur, placé derrière le miroir, peut observer : c'est là le principe d'instruments employés par les médecins, tels que l'*ophthalmoscope*, imaginé en 1851 par Helmholtz pour éclairer et explorer les milieux de l'œil; le *laryngoscope*, pour soumettre à l'inspection de la vue l'arrière-gorge, l'isthme du gosier et les parties du larynx les plus profondément situées, l'*endoscope*, etc. Le premier de ces instruments (*fig. 163*) se compose d'un miroir métallique, fortement éclairé et percé à son centre, qui se place devant l'œil de l'observateur, et d'une lentille biconvexe qui se place devant l'œil du patient. Le *laryngoscope* (*fig. 164*) a, on le voit, une disposition analogue.

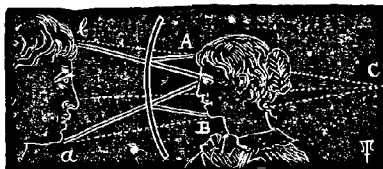


Fig. 161. — IMAGE VIRTUELLE.

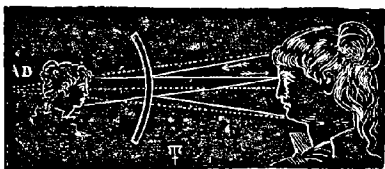


Fig. 162. — MIROIRS CONVEXES.

Les miroirs concaves forment la pièce essentielle des télescopes et sont utilisés comme réflecteurs dans les théâtres, les appartements et surtout dans les phares *catoptriques* dont nous parlerons ci-après.

Ils servent encore, et principalement, pour produire de grands effets calorifiques. Nous avons cité (*Chaleur*, page 492) le miroir ardent que l'opticien Villette avait construit pour Louis XIV. Voici ce qu'en racontent les journaux du temps :

« Le miroir, de trente-quatre pouces de diamètre, vitrifiait en un moment les briques et les cailloux, de quelque densité qu'ils pussent être ; il consumait en un instant les bois les plus verts et les réduisait en cendres ; il fondait de même en un instant toutes sortes de métaux. Quelque dur que soit l'acier, il ne lui résistait pas mieux que les autres métaux, et il fondait de telle manière qu'une partie coulait et que l'autre se résolvait en étincelles, qui formaient des étoiles irrégulières de la largeur d'une pièce de trente sols, mais si pénétrantes que rien ne peut exprimer l'activité et la violence de ce feu. Celui de quarante-quatre pouces de diamètre est encore plus actif ; son point brûlant ou *focus* est éloigné de la glace de trois pieds et sept pouces. Il est de la largeur d'une pièce de cinq sols ou d'un

sol marqué, et c'est là que se fait la réunion et l'assemblage de tous les rayons du soleil, et où paraissent les admirables effets du feu le plus violent et le plus actif du monde, si bien que la lumière en cet endroit est si brillante que les yeux ne peuvent non plus la supporter que celle du soleil. Outre la propriété de brûler qui surprend dans ce miroir, on y remarque encore diverses représentations curieuses. Il renvoie les images de quinze pieds de distance et davantage; si bien qu'un

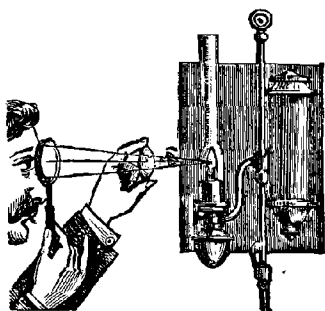


Fig. 163. — OPHTHALMOSCOPE.

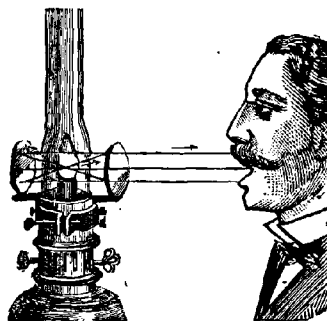


Fig. 164. — LARYNGOSCOPE.

homme se voyant dans ce miroir un bâton ou l'épée à la main, cette main paraît si bien hors du miroir, que, s'il fait semblant de porter un coup à l'endroit de sa face contre sa propre image, il ne peut s'empêcher d'être effrayé. »

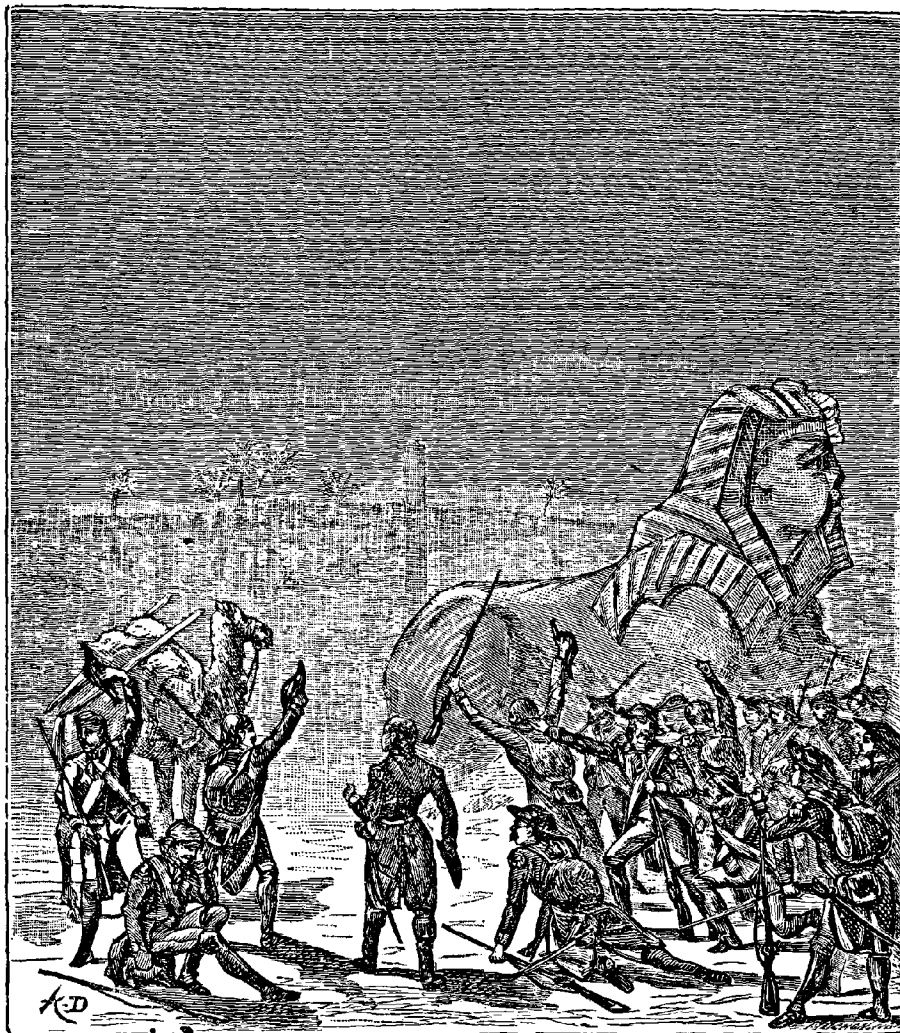
Les miroirs convexes ne servent que dans le *télescope de Cassegrain*, abandonné aujourd'hui; aux paysagistes, pour obtenir une image réduite de la vue qu'ils veulent reproduire; dans les jardins, où, sous le nom de *globes périscopiques*, ils forment des sphères de verre argentées intérieurement et qui donnent l'image diminuée des différentes parties du jardin.

## CHAPITRE III

### RÉFRACTION

**RÉFRACTION.** — En passant obliquement d'un milieu dans un autre, d'une densité inégale, de l'air dans l'eau, par exemple, un rayon lumineux subit une déviation, un changement de direction, auquel on a donné le nom de *réfraction*. On constate facilement ce phénomène en plongeant

à moitié un bâton dans l'eau, et en le regardant de côté; il apparaît brisé; ou bien en recevant, dans une cuve en verre pleine d'eau, un rayon lumineux, introduit dans une chambre obscure par une petite



Voilà que le désert, aux voyageurs surpris,  
Déroule à l'orient de fortunés abris (page 414).

ouverture, on voit à travers les parois de verre que ce rayon dévie dès qu'il pénètre dans le liquide. Cela était connu dès la plus haute antiquité, et nous avons dit (*Introduction*, page 15) qu'Euclide expliquait par la *réfraction* le grossissement du soleil et de la lune à l'horizon.

Il cite même l'expérience suivante, souvent répétée dans les cours de physique, pour démontrer la *réfraction* de la lumière.

Si l'on met une pièce de monnaie dans un vase vide à parois opaques, de manière que, placé à une certaine distance, on puisse à peine en apercevoir le bord, et si l'on y verse ensuite de l'eau, à mesure que le niveau s'élèvera, la pièce semblera s'avancer vers le côté opposé du vase, et bientôt, sans changer de position, on l'apercevra tout entière. Il faut donc que la lumière ne vienne pas en ligne droite de la pièce vers l'œil. Il est, en effet, facile de constater qu'elle se propage en ligne droite dans l'eau et en ligne droite dans l'air; mais qu'elle se brise, en s'inclinant sur la surface liquide, lorsqu'elle passe de l'eau dans l'air.

Ainsi s'expliquent l'élévation apparente du fond d'une rivière ou d'un lac limpide dans lequel on plonge le regard; la nécessité, dans la pêche au fusil, de viser le poisson dans une direction plus inclinée, et la déformation, le déplacement, le rapetissement ou le grossissement des objets considérés par transparence à travers une carafe pleine d'eau.

Il est nécessaire, pour qu'il y ait réfraction, que le rayon lumineux pénètre *obliquement* dans le milieu d'une densité autre que celle du milieu d'où il part; s'il arrivait perpendiculairement à la surface qui sépare les deux milieux, il n'y aurait pas déviation.

On appelle *rayon incident* le rayon qui part d'un objet et arrive à la surface de séparation des deux milieux; *rayon réfracté*, la direction qu'il suit dans le second milieu. Si l'on mène une perpendiculaire à la surface de séparation, l'angle formé par cette perpendiculaire avec le rayon incident est l'*angle d'incidence*, et l'angle formé avec le rayon réfracté, l'*angle de réfraction*. Selon que ce rayon réfracté s'approche ou s'éloigne de la perpendiculaire, on dit que le second milieu est plus ou moins *réfringent* que le premier.

**LOIS DE LA RÉFRACTION. — INDICES DE RÉFRACTION.** — Les lois de la réfraction, dont la découverte est due au savant hollandais Snellius et à Descartes, s'énoncent ainsi :

1° *Le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant pour les mêmes milieux.*

2° *Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux.*

Pour démontrer ces deux lois, on se sert d'un appareil analogue à celui dont nous avons parlé pour démontrer les lois de la réflexion (*fig.* à la page 390), en remplaçant le miroir plan placé au centre du cercle gradué par un petit vase de verre semi-cylindrique, de façon que



la surface du liquide arrive exactement à la hauteur du centre du cercle. Soit alors (*fig. 165*) RO un rayon incident dirigé dans le plan vertical du limbe. En passant de l'air dans l'eau, ce rayon prendra la direction OL, c'est-à-dire se rapprochera de la perpendiculaire FO, élevée au point où le rayon incident touchera la surface du liquide AB. Mesurant alors, sur le limbe, l'angle d'incidence ROF et l'angle de réfraction LOD, on voit que les sinus RS, LP, c'est-à-dire les perpendiculaires abaissées sur la perpendiculaire des points où la circonférence coupe les rayons sont dans un rapport qui est constant; si LP, par exemple, est les  $\frac{3}{4}$  de RS, que l'on diminue ou que l'on augmente l'angle d'incidence, l'angle de réflexion diminuera ou augmentera, mais le sinus LP' sera toujours les  $\frac{3}{4}$  du sinus RS'.

Il est évident *à priori* que le rayon lumineux, rebroussant chemin, repasserait par les mêmes points et que le rapport des sinus resterait le même. Ce principe, connu sous le nom de *principe du retour inverse*, est très usité en optique.

Ce rapport constant entre le sinus de l'angle d'incidence et celui de l'angle de réfraction s'appelle l'*indice de réfraction*. Sa valeur numérique varie avec la nature des milieux considérés. Si l'on suppose que le rayon lumineux passe du vide dans une substance, cet indice est l'*indice absolu de réfraction*. Il ne dépend que de la nature de la substance et constitue un caractère physique très important.

*Tableau des indices de réfraction.*

Acide arsénieux.....	1,745	Éther.....	1,358
Agate blonde.....	1,5373	Flint-glass.....	1,605
Air.....	1,000294	Glace de de Saint-Gobain.....	1,543
Albumine.....	1,360	Grenat almandin.....	1,772
Alcool.....	1,675	Humeur aqueuse de l'œil.....	1,337
Alun.....	1,441	— vitrée.....	1,339
Boracite.....	1,667	Opale incolore laiteuse.....	1,442
Cristallin entier.....	1,384	— chatoyante.....	1,446
— enveloppe extérieure....	1,377	— jaune foncé.....	1,450
— enveloppe moyenne....	1,379	Quartz fondu.....	1,457
— enveloppe centrale.....	1,399	Sel gemme.....	1,5437
Crown-glass.....	1,534	Soufre fondu.....	2,148
Diamant incolore.....	2,428	Spath-fluor vert.....	1,435
— brun.....	2,487	Verre antique.....	1,519
Eau.....	1,336	Vide.....	1,000

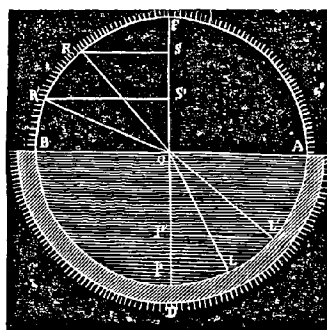


Fig. 165.

LOIS DE LA RÉFRACTION.

**ANGLE LIMITE, RÉFLEXION TOTALE.** — *Lorsqu'un rayon lumineux tend à sortir d'un milieu plus dense, et conséquemment plus réfringent, dans un milieu moins dense, sous un angle plus grand que l'angle limite de  $90^\circ$ , le rayon est totalement réfléchi à l'intérieur; il y a RÉFLEXION TOTALE.* Une expérience bien simple met en évidence ce principe. Plongez

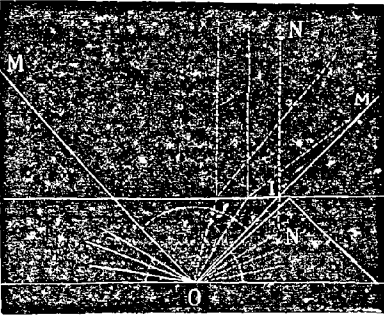


Fig. 166. — RÉFLEXION TOTALE.

une cuiller dans un verre plein d'eau, puis placez l'œil au-dessous de la surface liquide, et regardez obliquement cette surface, vous y voyez, comme dans un miroir, l'image de la partie inférieure de la cuiller. Soit, en effet (*fig. 166*), un point lumineux *O* placé dans l'eau. Parmi les rayons lumineux qu'il émet, il en est qui se réfractent, mais l'un d'eux *OI* donne lieu à un angle de réfraction égal à  $90^\circ$ , c'est-à-dire qu'il sort en rasant la surface, parce que l'indice de réfraction est plus petit que l'unité. L'angle *OIN'* est l'angle limite : Tous les rayons qui font avec la perpendiculaire un angle plus grand ne réfractent plus, ils se réfléchissent; ceux-là seuls réfractent qui sont compris dans le cône *MOM'*.

Pour le passage de l'eau dans l'air, la valeur de l'angle limite est de  $48,35^\circ$ ; il est de  $41^\circ$  pour le passage du verre dans l'air.

**EFFETS DE LA RÉFRACTION, HALOS, SPECTRE DU BROCKEN, CERCLE D'ULLOA, ETC. — MIRAGE.**

— Les différentes couches de l'air ayant toutes des densités différentes suivant leur hauteur, il en résulte que la lumière du soleil et des astres ne nous arrive jamais en ligne droite, et que nous ne voyons jamais ces astres au lieu où ils sont en réalité. Mais comme, en traversant les couches successives de l'atmosphère, la lumière ne rencontre pas de changement brusque de densité, elle ne se brise pas non plus brusquement, comme en passant, par exemple, de l'air dans l'eau ou dans le verre; elle suit une légère courbe au lieu d'une ligne brisée. La réfraction que la lumière des astres éprouve en traversant les couches successives de l'atmosphère nous fait jouir plus longtemps de leur présence sur l'horizon, car elle

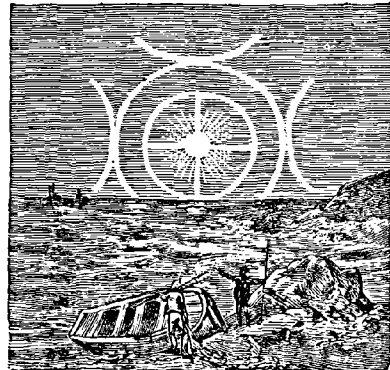


Fig. 167. — HALO SOLAIRE.

avance leur lever et retarde leur coucher. C'est à cette réfraction que nous devons l'aurore qui précède l'éclat du jour, et le crépuscule qui précède les ténèbres de la nuit.

C'est encore par la réfraction des rayons solaires au travers de petites aiguilles de glace flottant dans l'atmosphère que sont dus certains phénomènes lumineux très curieux, connus sous les noms génériques de *gloires*, *anthélies*, *apothéoses*, dont la théorie n'est d'ailleurs encore qu'imparfaitement connue.

Les *halos* sont deux cercles lumineux (*fig. 167*) d'un rouge pâle en dedans, blancs ou bleuâtres en dehors et à contours assez diffus, que l'on observe quelquefois autour du soleil, quand l'atmosphère contient de légères vapeurs. On appelle *parhélies* des images généralement diffuses du soleil que l'on observe sur le diamètre horizontal du halo intérieur, et qui, rouges du côté du soleil, présentent, depuis ce côté jusqu'au côté opposé, toutes les couleurs du spectre. Les halos et les parhélies sont souvent accompagnés d'arcs accessoires, bordés de rouge en dedans et tangents aux extrémités des diamètres. Ces phénomènes peuvent être produits par la lune et prennent alors les noms de *parasélène* ou *halo lunaire* (*fig. 168*). Quelquefois un grand cercle blanc, appelé *cercle d'Ulloa*, entoure les apothéoses (*fig. 169*).

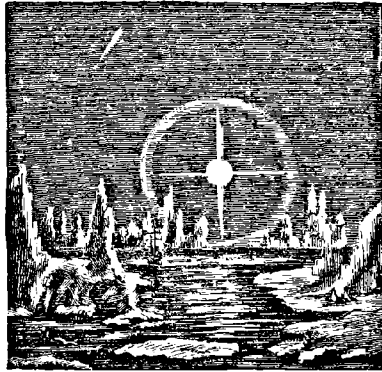


Fig. 168. — PARASÉLÈNE.

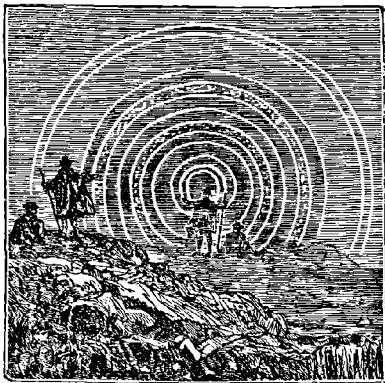


Fig. 169. — CERCLE D'ULLOA.

Étant placé sur une éminence, le dos tourné au soleil, et regardant un nuagé ou un brouillard en face de lui, un observateur voit parfois son ombre projetée sur le brouillard. Quelquefois aussi la tête de l'ombre paraît environnée de couronnes irisées. Ces phénomènes se produisent assez souvent sur le Brocken, en Hanovre; ils constituent le fameux *spectre du Brocken* (*fig. 170*), qui a donné à cette montagne une célébrité superstitieuse. C'est là un des effets du *mirage*, phénomène dû à la *réflexion totale*.

Tout le monde a entendu parler de ce phénomène magique. Les pro-

diges de la *Fata Morgana*, dans le golfe de Naples, si célèbres dans la Sicile et l'Italie méridionale, ne sont qu'un effet de mirage. A certains moments, on voit dans les airs des ruines, des colonnes, des châteaux, des palais, et une foule d'objets qui semblent se déplacer et qui changent d'aspect à chaque instant. Toute cette féerie est une représentation d'objets terrestres, invisibles dans l'état ordinaire de l'atmosphère, et qui



Fig. 170. — SPECTRE DU BROCKEN.

deviennent apparents et mobiles quand les rayons de la lumière qu'ils envoient se meuvent en lignes courbes, dans des couches d'inégales densités.

Bernardin de Saint-Pierre cite un fait de mirage remarquable :

« Un phénomène très singulier m'a été raconté par notre célèbre peintre Joseph Vernet, mon ami. Étant en Italie, il se livrait particulièrement à l'étude du ciel et de la lumière. Un jour, il fut bien surpris d'apercevoir dans les cieux la forme d'une ville renversée : il en distinguait parfaitement les clôtures, les tours,

les maisons. Il se hâta de dessiner ce phénomène, et, résolu d'en connaître la cause, il s'achemina, suivant le même rhumb de vent, dans les montagnes ; mais quel fut son étonnement de trouver, à sept lieues de là, la ville dont il avait vu le spectre, et dont il avait le dessin dans son portefeuille. »

Pendant la fameuse campagne d'Égypte de 1798, l'armée française fut témoin des phénomènes de mirage les plus remarquables (*fig.* à la page 409). Fatigués par des marches forcées, sous un soleil brûlant et dans une atmosphère étouffante et chargée de sable, baignés de sueur et tourmentés par une soif ardente, les soldats allaient, désespérés, lorsque...

Soudain des cris de joie, éclatant dans la nue,  
Raniment dans les cœurs l'espérance perdue :  
Voilà que le désert, aux voyageurs surpris,  
Déroule à l'orient de fortunés abris :  
Une immense oasis, dans des vapeurs lointaines,  
Avec ses frais vallons, ses humides fontaines,  
Son lac étincelant, ses berceaux de jasmin,  
Surgit à l'horizon du sablonneux chemin.  
Salut ! belle oasis, île de fleurs semée,  
Vase toujours chargé des parfums d'Idumée !  
Cette nuit, Bonaparte et ses soldats errants  
Fouleront les sentiers de tes bois odorants ;  
Et, sur les bords fleuris de tes fraîches cascades,

Sous la nef des palmiers aux mouvantes arcades,  
 Dans le joyeux bivouac qui doit les réunir,  
 Des tourments du désert perdront le souvenir.  
 Doux rêves de bonheur! L'oasis diaphane,  
 Fantôme aérien, trompe la caravane :  
 Les crédules soldats, qu'un prestige séduit,  
 Vers le but qui s'éloigne errent jusqu'à la nuit.  
 Alors, comme un jardin qu'une fée inconnue  
 De sa baguette d'or dissipe dans la nue,  
 L'île miraculeuse, aux ombrages trompeurs,  
 Se détache du sol en subtiles vapeurs,  
 Disperse, en variant leurs formes fantastiques,  
 Ses contours onduleux, ses verdoyants portiques ;  
 Et, des yeux fascinés trompant le fol espoir,  
 Mêle ses vains débris aux nuages du soir (1).

Les savants qui faisaient partie de l'expédition furent quelque temps eux-mêmes, comme toute l'armée, le jouet de cette cruelle illusion ; mais Monge en eut bientôt découvert et expliqué la cause.

Les couches inférieures de l'atmosphère, échauffées par le sable, prennent des densités qui vont en décroissant à mesure qu'elles sont plus voisines du sol. Les rayons lumineux, partant d'un point élevé et pénétrant dans ces couches, passent sans cesse d'un milieu plus dense dans un milieu moins dense ; l'obliquité de leur incidence sur les couches successives va donc en augmentant de plus en plus. Enfin, ils rencontrent une couche à la surface de laquelle ils subissent la réflexion totale et produisent, pour l'œil qu'ils rencontrent, une image par réflexion. Si ces différences de densité dans l'air se présentent autrement que dans les couches horizontales, le phénomène se produit sous un autre aspect.

Le soubassement sud-ouest de la Bourse de Paris est formé d'un mur vertical en pierre de taille, sans aucune partie saillante, dans une étendue d'environ 78 mètres. Lorsque, l'été, entre midi et trois ou quatre heures, ce mur est frappé par les rayons solaires, il présente les phénomènes de mirage avec une grande intensité. Si un observateur, affirme M. J. Rambosson, place son œil un peu en avant du prolongement du mur, il voit sa surface disparaître tout à coup, et, un peu en avant de la surface, il aperçoit une mince couche d'air, plus ou moins agitée, qui a la propriété de réfléchir tous les objets qui sont près du mur ou de son prolongement ; ainsi la corniche qui surmonte le soubassement se réfléchit si exactement, qu'au premier abord on croit que l'image fait partie de l'objet. Si une personne appuie sa tête sur ce mur, un peu plus loin de l'observateur,

(1) Barthélemy et Méry, *Napoléon en Égypte*.

une grande partie de la tête de cette personne, et quelquefois son corps tout entier, se mire sur la mince couche d'air comme dans un miroir. L'image est un peu tremblante et déformée; mais, si l'air n'est pas agité, on distingue facilement tous les traits et toutes les parties du vêtement. A la déformation près, l'image paraît aussi brillante et aussi nette que le corps lui-même.

Le mirage se manifeste aussi très bien sur les murs des fortifications de Paris, surtout du côté sud. Quoique ces murs ne soient couverts d'aucun enduit, et qu'ils soient formés avec de la pierre meulière dont la surface présente beaucoup d'irrégularités, cependant, comme la forme générale en est plane, et que l'on y trouve des fonds de 150 mètres de longueur, deux personnes ayant un œil appliqué près de ces murs, à 100 ou 150 mètres de distance, aperçoivent très bien l'image l'une de l'autre réfléchie chacune sur la mince couche d'air chaud qui monte le long de ces murs, lorsque le soleil est un peu brillant et qu'il fait peu de vent. Si l'on choisit les murs dans le prolongement desquels on peut voir au loin la campagne, et si l'on observe les images réfléchies avec une lunette, on peut voir jusqu'à des arbres entiers avec leurs branches et leurs feuilles. Si le prolongement de la muraille rencontre une route fréquentée, on distingue très bien, à la lunette, les images réfléchies des passants, des chevaux et des voitures, lorsqu'ils se présentent près du prolongement du mur. A un degré plus ou moins intense, ces phénomènes ont lieu tous les jours, ou du moins sur toutes les surfaces éclairées par le soleil, sur les parapets des ponts, les marches des églises, etc.

Citons enfin, comme expliquant, par le phénomène du mirage, certaines apparitions fantastiques, ces lignes de M. Paul de Saint-Victor, relatives à la rencontre qui rendit fou Charles VI.

« Il chevauchait courbé sur les rênes, suant sous sa lourde robe de velours noir. Tout à coup un homme demi-nu s'élança d'un taillis, arrêta son cheval par la bride, et lui cria : « Roy ! ne chevauche plus avant, mais retourne, car tu es trahi ! » D'où sortait ce fantôme de sinistre augure ? Le moyen âge y a vu une apparition de l'Esprit prophétique qui habite les forêts. Quoi qu'il en soit, c'est une scène digne de Shakspeare que cette attaque de la Folie, embusquée au coin d'un bois, et tenant à bout portant la raison d'un roi. Charles se cabra devant le spectre hagard qui lui barrait le passage, puis il rentra dans son noir silence, couvant le délire qui fermentait dans sa tête avant d'éclater. La forêt donnait dans une lande brûlée et aride et le soleil redoublait d'ardeur. Froissart insiste sur cette température de mirages qui dut, sans doute, grossir démesurément aux yeux du malade l'apparition fantastique... »

TRANSMISSION A TRAVERS LES MILIEUX DIAPHANES. — PRISMES. —  
 Quand la lumière traverse des lames à faces parallèles, les vitres d'une  
 fenêtre, par exemple, si le rayon qui parvient à l'œil a traversé perpendi-



Néron regardait les combats des gladiateurs à travers une grosse émeraude (page 420).

culairement la lame, il n'est point réfracté; aucune déviation n'a pu se  
 produire. S'il est arrivé obliquement, le rayon *émergent* est parallèle au  
 rayon incident. Pour le démontrer, soit MN (fig. 171) une lame de cristal  
 à faces parallèles, SA un rayon incident, DB le rayon émergent, *i* et *r*

les angles d'incidence et de réfraction à l'entrée du rayon, et enfin  $i'$  et  $r'$  les mêmes angles à la sortie. En A, le rayon supporte une première réfraction, dont l'indice est  $\frac{\sin i}{\sin r}$ ; en D, il réfracte de nouveau; ce que l'on indique par  $\frac{\sin i'}{\sin r'}$ . Or, d'après le principe du retour inverse, nous avons  $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{\sin r}{\sin i}$ . Les deux perpendiculaires AG et DE étant parallèles, les angles  $r'$  et  $i'$  sont égaux, comme alternes-internes; en conséquence,

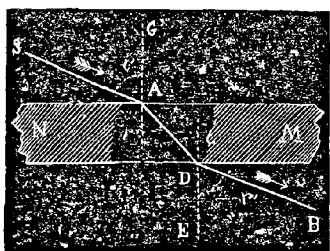


Fig. 171.

RÉFRACTION PAR UNE LAME  
A FACES PARALLÈLES.

puisque les numérateurs des deux rapports sont égaux, les dénominateurs le sont aussi; donc  $r'$  et  $i$  sont égaux; d'où il suit que DB est parallèle à SA.

On appelle *prisme*, en optique, tout milieu transparent terminé par cinq faces, dont deux opposées sont triangulaires et les trois autres rectangulaires. Ceux dont on fait usage habituellement sont en cristal, en crown ou en flint-glass (1), supportés par un pied métallique et susceptibles de se placer soit horizontalement, soit verticalement, soit dans toute autre position inclinée (fig. 172). La droite suivant laquelle les deux faces se rencontrent s'appelle *arête* ou *sommet* du prisme; l'angle qu'elles forment est l'*angle réfringent*; toute section perpendiculaire à l'arête du prisme se nomme la *section principale*.

On se sert quelquefois aussi du *prisme à eau*, à faces mobiles, qui se compose (fig. 173) de deux plaques de cuivre parallèles B et C, fixées en E et en A; entre elles, deux lames de verre  $m$  et  $n$ , mobiles autour d'une charnière, peuvent se mouvoir à frottement dur, de sorte qu'elles forment un vase hermétique que l'on remplit d'eau. En inclinant plus ou moins ces lames de verre, on obtient un prisme à angle variable.

Il est facile de déterminer la marche de la lumière dans les prismes (fig. 174). Soit un point lumineux L, contenu dans le plan de la section principale ABC, et LI un rayon incident. Ce rayon se réfracte en I, en se rapprochant de la normale, si le milieu où il entre est plus réfringent, et il suit une

(1) Le cristal et le flint-glass se fabriquent avec du sable blanc, du carbonate de potasse purifié, de l'oxyde rouge de plomb, un peu de nitre et de potasse. Le flint-glass est plus riche en plomb que le cristal. Le crown-glass remplace le plomb par de la chaux et un peu d'oxyde de manganèse. Ces verrés sont remarquables par leur transparence et leur pureté.



direction IE, déterminée par l'égalité ci-dessus  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{3}{2}$ . En E, le rayon éprouve une nouvelle réfraction; il s'éloigne alors de la normale et suit une direction EO, déterminée par l'égalité  $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{2}{3}$ .

D'après cela, la lumière, se brisant deux fois dans le même sens, décrit une ligne brisée LIEO, et l'œil qui reçoit le rayon émergent EO, voit l'objet L en *l*, c'est-à-dire que les objets vus à travers un prisme apparaissent déviés vers l'arête qui sépare les faces d'incidence et d'émergence. La déviation imprimée ainsi à la lumière se mesure par l'angle LDL, formé par les rayons incidents et émergents, et nommé *angle de déviation*. Cet angle augmente avec l'indice de réfraction et avec l'angle réfringent du prisme; il varie également d'après l'angle d'incidence du rayon lumineux à son entrée dans le prisme; la déviation décroît avec cet angle, mais seulement jusqu'à une certaine limite, qui se détermine par le calcul.

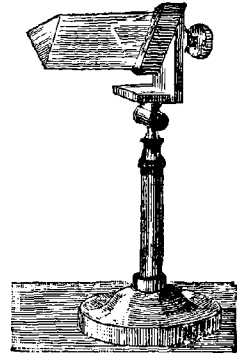


Fig. 172. — PRISME.

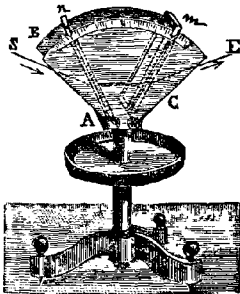


Fig. 173.

PRISME A EAU.

Pour démontrer que l'angle de déviation augmente avec l'indice de réfraction de la substance du prisme, on se sert d'un prisme composé de diverses substances. En regardant au travers de ce prisme une ligne droite, par exemple, on aperçoit seulement des tronçons de ligne à des hauteurs différentes. Pour démontrer que l'angle de déviation augmente avec l'angle réfringent du prisme, on se sert du prisme à angle variable, du *prisme à eau*. En recevant un rayon lumineux dans ce prisme, on constate que la déviation du rayon émergent augmente à mesure que l'on incline davantage les plateaux.

Les prismes dont la section principale est un triangle rectangle isocèle présentent une application importante de la réflexion totale. En effet, soit ABC (fig. 174) la section principale d'un tel prisme, O un point lumineux et OH un rayon perpendiculaire à la face BC. En entrant dans le cristal, sans se réfracter, ce qui est une propriété du cristal de roche, du flint-glass et de quelques autres corps, il va former sur la grande face AB un angle égal à B, c'est-à-dire de 45 degrés, c'est-à-dire plus grand que l'angle limite du cristal qui est de 41°,48. D'après cela, le rayon OH supporte en H la réflexion

totale qui lui imprime la direction HI, perpendiculaire à la seconde face AC. Il s'ensuit que la grande face du prisme produit, dans ce cas, l'effet d'un miroir plan, dans lequel la réflexion s'est effectuée sans perte, et qu'un œil placé en I voit en O' l'image du point O. Nous verrons plus loin que cette propriété des prismes rectangulaires s'utilise dans un grand nombre d'instruments d'optique.

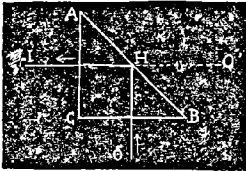


FIG. 174.

RÉFLEXION TOTALE  
DANS UN PRISME.

**LENTILLES.** — On désigne, en optique, sous le nom de *lentilles* des disques de verre compris entre deux surfaces sphériques, ou entre une surface plane et une surface sphérique. D'après leur forme, on leur donne différents noms. Les lentilles 1, 2, 3 (*fig. 175*) sont dites lentilles *divergentes*, parce que leurs faces, s'écartant du centre vers les bords, elles ont la propriété de faire diverger les rayons qui les traversent; la 1<sup>re</sup> est *ménisque divergent* (du grec *méniscos*, croissant); la 2<sup>e</sup> *plan-concave*, la 3<sup>e</sup> *biconcave*. Les lentilles 4, 5, 6 sont dites lentilles *convergentes*, parce que leurs faces, se rapprochant du centre vers les bords, elles font converger les rayons; la 4<sup>e</sup> est *biconvexe*, la 5<sup>e</sup> *plan-convexe* et la 6<sup>e</sup> *ménisque convergent*. On les construit généralement aujourd'hui avec le flint-glass ou le crown-glass.

L'invention des lentilles paraît remonter à la plus haute antiquité. Sénèque, entre quelques autres auteurs anciens, fait mention de globes de verre remplis d'eau, servant à augmenter les dimensions d'objets peu visibles, et l'on a retrouvé, dans les ruines de Ninive, des lentilles en cristal de roche que l'on suppose avoir été taillées au point de vue de l'optique plutôt que pour servir d'ornement. On cite également Salomon se servant de boules pour grossir les objets, et Néron regardant les combats des gladiateurs à travers une grosse émeraude. Mais la construction de lentilles, où les verres lenticulaires se trouvent combinés de manière à augmenter dans une grande mesure la puissance de la vision des objets éloignés, ne date guère que du xvii<sup>e</sup> siècle. « A la honte de nos sciences, dit Descartes dans sa *Dioptrique*, une si admirable invention n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune. Il y a environ

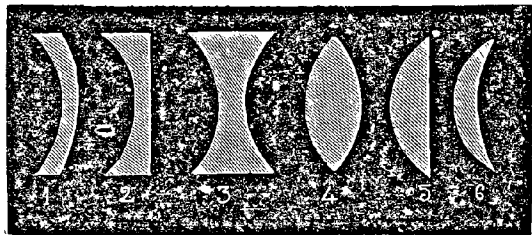


Fig. 175. — LENTILLES.

trente ans (1609), Jacques Metius (Metzu), lunetier à Alkmaer, en Hollande, homme qui n'avait jamais étudié, mais prenait plaisir à faire des miroirs et des verres brûlants, ayant à cette occasion des verres de différentes formes, s'avisa de regarder au travers de deux, dont l'un était convexe et l'autre concave, et les appliqua si heureusement que la première lentille en fut composée. » Quelques-uns même attribuent cet heureux hasard aux enfants de Metzu qui, en jouant, avaient placé l'un contre l'autre un verre concave et un verre convexe. D'autre part, on a cité souvent les opticiens Jansen et Lippershey, de Middelbourg, comme ayant inventé cet instrument, si précieux que l'on peut dire qu'en lui se résume toute la partie pratique de l'optique.

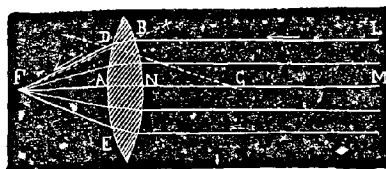


Fig. 176.

FOYER PRINCIPAL DES LENTILLES.

Nous nous bornerons à l'étude des lentilles *biconvexes* (1) et *biconcaves* (4), parce qu'elles sont le plus généralement employées et que leurs propriétés s'appliquent respectivement à toutes les lentilles convergentes ou divergentes.

**PROPRIÉTÉS DES LENTILLES BICONVEXES.** — Dans les lentilles, comme dans les miroirs, on nomme *foyer* le point où vont concourir tous les rayons réfractés ou leur prolongement. Les lentilles biconvexes, comme les miroirs courbes (page 404) ont un *foyer réel* et un *foyer virtuel*.

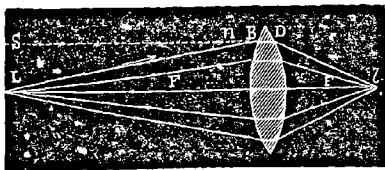


Fig. 177.

FOYERS CONJUGUÉS DES LENTILLES.

Lorsque les rayons lumineux qui tombent sur la lentille sont parallèles à l'axe principal (fig. 176), un rayon incident LB s'approche de la normale au point d'incidence B, puis s'en écarte au point d'émergence D, et, après avoir ainsi deux fois dévié, va couper l'axe principal en F. Tous les autres rayons se réfracteront de la même manière, et le calcul prouve qu'ils vont tous converger très sensiblement à ce même point F, pourvu que l'arc DE ne dépasse pas 10 à 12 degrés. Ce point F est dit le *foyer principal* et la distance FA la *distance focale principale* de la lentille. Ce point est toujours le même pour une même lentille ; mais il varie avec le rayon de la courbure et l'indice de réfraction de celle-ci. Dans les lentilles dont on se sert ordinairement, c'est-à-dire de crown-glass, le foyer principal coïncide presque exactement avec le *centre de courbure*. Une lentille est dite à

long ou à court foyer, suivant que la distance focale est grande ou petite. Ajoutons que seuls les rayons voisins de l'axe tombent au foyer. Ceux qui passent près des bords de la lentille rencontrent l'axe un peu plus tôt, en vertu d'un effet désigné sous le nom d'*aberration de sphéricité*.

Si l'objet lumineux L (fig. 177) est situé au delà du foyer principal, en comparant la marche du rayon divergent LB avec le rayon SB parallèle à l'axe, on voit que le premier forme avec la normale un angle  $LBn$  plus grand que  $SBn$ ; l'angle de réfraction sera donc plus grand, de sorte

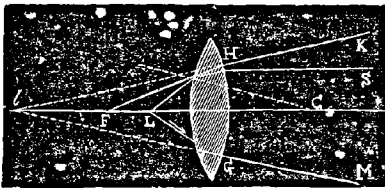


Fig. 178.

FOYER VIRTUEL DES LENTILLES.

qu'après avoir traversé la lentille il rencontre l'axe en un point  $l$  plus éloigné que le foyer principal F. Comme tous les rayons partant du point L concourent sensiblement au même point  $l$ , ce point  $l$  est le *foyer conjugué* du point L, dénomination qui exprime une relation telle entre les points L et  $l$ , que si l'on place

le point lumineux en  $l$ , le foyer sera en L.

D'après cela, plus on approche de la lentille la source lumineuse L, plus s'accroît la divergence des rayons émergents, et plus s'éloigne le foyer conjugué  $l$ ; et lorsque L coïncide avec le foyer principal F, les rayons émergents sont parallèles à l'axe: il n'y a plus de foyer conjugué, ou, ce qui revient au même, il y en a une infinité. Dans ce cas, l'intensité de la lumière décroît fort peu, et une seule lumière peut éclairer à de grandes distances.

Dans les lentilles biconvexes, le foyer est *virtuel* quand l'objet lumineux L est placé entre la lentille et le foyer principal (fig. 178). En effet, les rayons incidents LH, formant avec la normale des angles plus grands que les rayons FH émis par le foyer principal, il en résulte qu'après leur émergence, les premiers s'éloignent de l'axe plus que les seconds, et forment les faisceaux divergents HK, GM. Ces rayons ne peuvent donner naissance à aucun foyer *réel*; tous leurs prolongements concourent en un point  $l$  situé sur l'axe, lequel point est le foyer *virtuel* de L. Plus le point L est proche de la lentille, plus le foyer virtuel  $l$  s'approche du foyer principal F; plus il se rapproche de F, plus  $l$  s'en éloigne.

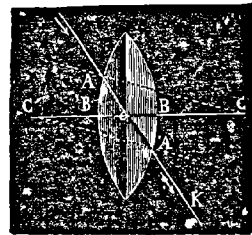


Fig. 179.

CENTRE OPTIQUE.

Dans toute lentille, il existe un point appelé *centre optique*, situé sur l'axe, qui jouit de cette propriété que tous les rayons lumineux qui passent par lui ne supportent pas de déviation angulaire, c'est-à-dire que les

émergents sont parallèles aux incidents. Pour le démontrer, soient  $C$  et  $C'$  les centres des surfaces sphériques de la lentille (*fig. 179*), menons les rayons parallèles  $CA$ ,  $C'A'$  et considérons la droite  $AA'$  comme un rayon réfracté.

Il sera facile de construire le rayon incident  $KA$  qui lui aurait donné naissance. Or, au point  $A'$  l'angle de réfraction intérieure étant le même qu'au point  $A$ , l'angle d'émergence devra être égal à l'angle d'incidence; les rayons  $KA$ ,  $A'K'$  sont donc parallèles entre eux. Les triangles  $COA$ ,  $C'O'A'$  étant semblables, le point  $O$  divise la droite  $CC'$  en deux parties, dont le rapport est le même que celui des rayons  $CA$ ,  $C'A'$  des deux faces de la lentille. Donc, si au lieu de deux rayons parallèles  $CA$ ,  $C'A'$ , on en mène deux autres quelconques, mais toujours parallèles, le rayon réfracté intérieur passera encore par le point  $C$ ; il en sera de même de tous les rayons réfractés correspondant à des rayons incidents et émergents parallèles.



Fig. 180. — IMAGES RÉELLES  
DANS LES LENTILLES BICONVEXES.

Ajoutons tout de suite que, dans les lentilles biconcaves ou dans les ménisques, le centre optique se détermine de la même façon; dans les lentilles plan-concaves, ce point est à l'intersection même de l'axe par la face courbe.

Si l'on néglige, comme cela se fait ordinairement, l'épaisseur de la lentille et toutes les grandeurs inférieures à cette épaisseur, on voit que les lignes  $KA$ ,  $A'K'$  et le rayon intérieur  $AA'$  forment une seule ligne droite, et que l'on peut considérer le rayon  $KK'$  comme ayant traversé la lentille, sans éprouver aucune déviation. Toute ligne droite qui passe par le *centre optique* est dite *axe secondaire*; tout rayon qui suit

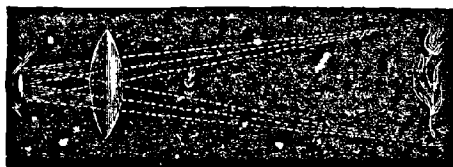


Fig. 181. — IMAGES VIRTUELLES  
DANS LES LENTILLES BICONVEXES.

la direction d'un axe secondaire est regardé comme traversant la lentille sans subir de réfraction.

Pour déterminer expérimentalement le *foyer principal* d'une lentille biconvexe, il suffit de l'exposer aux rayons solaires, en ayant soin que l'axe principal soit bien parallèle à ceux-ci. Recevant ensuite sur un écran le faisceau émergent, le point où concourent tous les rayons est le foyer cherché, qui, généralement, dans les lentilles en crown-glass, est

au centre de courbure. Les foyers conjugués se déterminent de la même façon, en plaçant un écran de chaque côté de la lentille.

**FORMATION DES IMAGES DANS LES LENTILLES BICONVEXES.** — Les lentilles biconvexes, comme les miroirs, produisent des images réelles et des images virtuelles. Ces images sont constituées par l'ensemble des foyers de chacun des points de l'objet.

Soit (*fig. 180*) un objet fortement éclairé et placé devant une lentille. Les divers points de cet objet pourront être considérés comme autant de

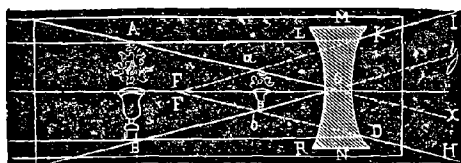


Fig. 182.

IMAGES DANS LES LENTILLES BICONCAVES.

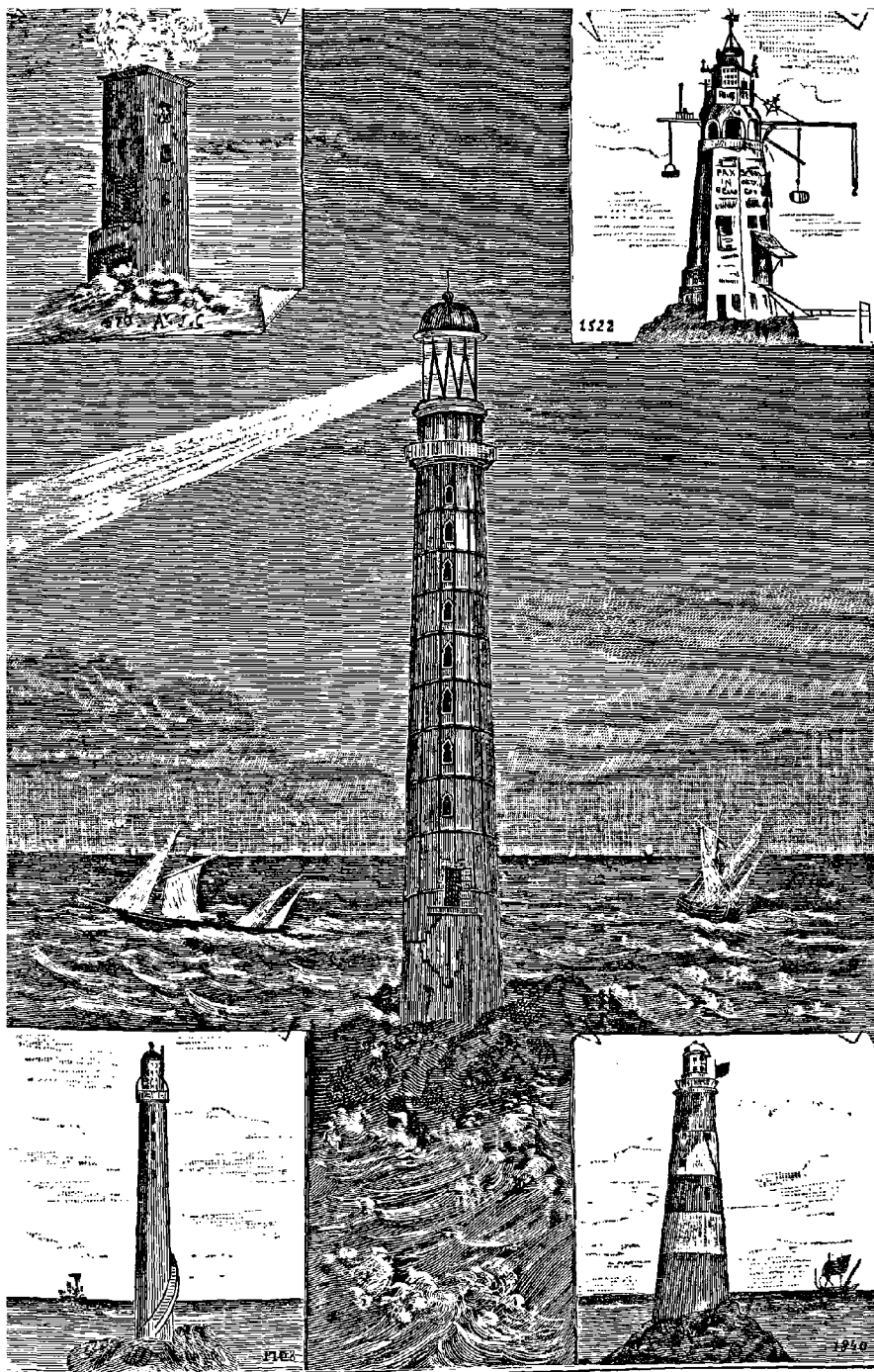
points lumineux ayant chacun leur foyer. Si l'on construit les foyers correspondant aux points le plus haut et le plus bas de l'objet, on voit qu'il y a renversement, et, comme l'ensemble des foyers constitue l'image de l'objet, on voit que cette image est réelle et ren-

versée. Cependant l'image ne sera réelle qu'autant que les foyers qui la constituent le seront aussi, c'est-à-dire dans le cas seulement où l'objet est plus éloigné de la lentille que ne l'est le foyer principal. L'image sera égale à l'objet quand ce dernier se trouvera à une distance de la lentille double de la distance focale principale; l'image deviendra plus grande que l'objet si l'on rapproche celui-ci de la lentille, et plus petite dans le cas contraire. L'image s'éloignera à l'infini quand l'objet passera par le foyer principal.

Si l'objet est situé entre le foyer principal et la lentille (*fig. 181*), l'image devient *virtuelle*. L'œil ne pourra en avoir l'impression qu'en se plaçant derrière la lentille, sur le trajet des faisceaux réfractés; alors il lui semblera voir l'objet, non pas où il est, avec ses dimensions véritables, mais plus loin, avec des dimensions plus grandes. Cela tient à ce que le faisceau lumineux, venu d'un point quelconque, semble, après réfraction, venir du point correspondant.

**LENTILLES BICONCAVES.** — Dans les lentilles *biconcaves*, les foyers sont toujours *virtuels*, quelle que soit la distance où est placé l'objet; la construction et le raisonnement indiqués pour les lentilles convexes sont en tous points applicables aux lentilles biconcaves. Les images sont toujours *virtuelles*. Soit, en effet, un objet AB (*fig. 182*), placé devant une lentille biconcave MN. Menons par le centre optique O les axes secondaires Ax, By des points extrêmes A et B de l'objet. Tous les rayons, tels que AL,

PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Les phares.

Liv. 156.





BR, émis par ces points, s'écarteront de leurs axes respectifs en traversant la lentille, de sorte que l'œil, en les recevant, verra l'image du point A en *a* et celle du point B en *b*, aux points de rencontre des axes avec les prolongements des rayons réfractés KI, DH. L'image *ab* de l'objet AB sera donc *virtuelle, droite et plus petite* que l'objet, et sera d'autant plus petite que l'objet sera plus éloigné.

**PHARES.** — Nous reviendrons ci-après sur les applications des lentilles aux instruments d'optique proprement dits, tels que lunettes, télescopes, microscopes, etc.; mais nous dirons d'abord ici une de leurs applications les plus importantes, leur application aux *phares* (*fig.* à la page 425).

« Pendant longtemps, on a regardé les entrées des ports et les embouchures des fleuves ouverts à la navigation comme les seules parties des côtes qu'il fût nécessaire d'éclairer. Dans l'antiquité, les grandes cités maritimes possédaient chacune un phare que l'on comptait parmi ses monuments. L'an 470 de la fondation de Rome, sous le règne de Ptolémée Philadelphie, Sostrate de Gnide construisait, dans l'île de Pharos, à l'entrée du port d'Alexandrie, un phare qui fut rangé parmi les sept merveilles du monde et qui existait encore au commencement du XII<sup>e</sup> siècle de notre ère. D'après Edrisi, géographe arabe, qui vivait à cette époque, la tour de Pharos était carrée et mesurait 100 brasses de hauteur. Denys de Byzance parle d'un phare qui était placé à l'embouchure du Chrysorroas, dans le Bosphore de Thrace. Le phare d'Ostie avait été construit, d'après Suétone, à l'imitation de celui de Pharos, par l'empereur Claude. Caligula, lors de son expédition dans les Gaules, avait fait élever à Boulogne un phare qui s'écroula en 1644, par suite de l'éboulement d'une falaise; cette tour était octogonale et pouvait avoir une hauteur de 60 mètres. La plupart du temps, c'était sur des points culminants du rivage, sans construire un édifice spécial, que les anciens allumaient leurs signaux. Des feux de bois ou de charbon, soigneusement entretenus pendant la nuit, constituaient leurs foyers de lumière.

» Très négligé au moyen âge, l'éclairage maritime fut repris à l'époque de la Renaissance. Vers le milieu du XVI<sup>e</sup> siècle, un phare monumental fut construit à l'entrée du port de Gênes. Quelques années plus tard, la première pierre du fameux phare de Cordouan fut posée, à l'embouchure de la Gironde, sur un rocher que les eaux recouvrent de trois mètres en haute mer. Cet admirable monument, construit par Louis de Foix, de 1584 à 1610, est décrit en ces termes par M. Léonce Renault :

« Il se composait de la plate-forme circulaire, que défendait un large parapet, » et de la tour qui était divisée en quatre étages, non compris la lanterne. Le » rez-de-chaussée présentait un grand vestibule de forme carrée, et quatre petits » réduits, qui servaient de logements et de magasins. Des escaliers, placés dans » les embrasures des portes d'entrée et des deux fenêtres, conduisaient dans les » caves et dans la citerne. La cage du grand escalier se trouvait en face de » l'entrée. Au premier étage, qui portait le titre, probablement peu justifié, » d'*appartement du Roi*, était une salle de même dimension que le vestibule, » mais plus richement décorée, d'où l'on pouvait se rendre sur une première

» galerie extérieure. Une chapelle de forme circulaire occupait le second étage ;  
 » elle était éclairée par deux rangs de fenêtres, couverte par une voûte sphérique  
 » et ornée de pilastres corinthiens et d'élégantes sculptures. Au-dessus de la  
 » seconde galerie, le dôme de la chapelle était accusé au dehors et était découpé  
 » par des lucarnes richement ornées, qui formaient le second rang des fenêtres  
 » de cette salle. Il était surmonté d'un pavillon circulaire, voûté et décoré de  
 » pilastres composites, dont l'entablement était couronné par la balustrade à jour  
 » d'une galerie extérieure conduisant dans la lanterne. Cette lanterne, de dimen-  
 » sions assez restreintes, était exécutée en pierre de taille et se composait de  
 » huit arcades dont les pieds-droits étaient ornés de  
 » colonnes, et dont la coupole se terminait par la che-  
 » minée destinée au dégagement de la fumée du foyer.  
 » La hauteur du foyer au-dessus de l'horizon n'était que  
 » de 35 mètres. »

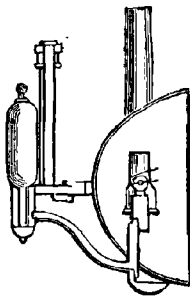


Fig. 183.

LAMPE D'UN PHARE  
CATOPTRIQUE.

» Dans les dernières années du xvii<sup>e</sup> siècle, on alluma, en France, les phares des *Baleines* (île de Ré), de *Chassiron* (île d'Oleron), de *Stiff* (île d'Ouessant), du cap *Fréhel* (Côtes-du-Nord) et du *Havre*. De 1740 à 1780, on alluma ceux de *Saint-Mathieu* (près de Brest), du fort de *Bouc*, de *Cayeux*, de *Planier* (près de Marseille), de *La Hève* et de *L'Ailly*.

» Vers la fin du xviii<sup>e</sup> siècle, les appareils *catoptriques* (d'un mot grec signifiant *miroir*) furent appliqués à l'éclairage des phares. En 1782, quatre-vingts lampes, accompagnées chacune d'un réflecteur en forme de segment sphérique, étaient installées dans la lanterne de Cordouan. Ces lampes, munies de mèches plates, éclairaient mal et produisaient beaucoup de fumée : les réflecteurs renvoyaient la lumière en tous sens, au lieu de la concentrer dans les directions utiles. L'insuffisance de ce mode d'éclairage provoqua des plaintes de la part des navigateurs et leur fit réclamer le retour aux feux de charbon qu'on avait, depuis quelques années, substitués aux feux de bois. Teulère, ingénieur en chef de la province, proposa, dans un remarquable mémoire daté du 26 mai 1783 : de remplacer les lampes à mèche plate par des lampes à double courant d'air ; de donner à chaque réflecteur la forme d'un *paraboloïde*, au fond duquel on placerait la flamme, de manière à concentrer la lumière dans un faisceau horizontal (*fig. 183*) ; d'animer l'appareil d'un mouvement de rotation autour d'un axe vertical, pour promener successivement la lumière sur tous les points de l'horizon. Après quelques essais, on construisit, d'après les idées de Teulère, un grand appareil *catoptrique* qui fut établi sur la tour de Cordouan, nouvellement exhaussée. Les réflecteurs, au nombre de douze, étaient répartis en trois groupes ; ceux d'un même groupe étaient superposés et dirigés dans le même sens. Les trois faisceaux de lumière ainsi obtenus étaient espacés de 120 degrés, c'est-à-dire qu'ils divisaient la circonférence en trois parties égales. La rotation était calculée de manière à faire succéder les éclats de deux en deux minutes. Ce système d'éclairage constituait un immense progrès ; aussi fut-il adopté par la plupart des puissances maritimes. Sauf les proportions et quelques détails de construction, nos appareils catoptriques actuels les plus usités sont entièrement conformes à ceux de Teulère.

» La propriété que possèdent les lentilles convergentes de réfracter, parallèlement à leur axe, les rayons de lumière émanés de leur foyer principal les appelait à remplir un office analogue à celui des réflecteurs paraboliques. Cependant, si l'on eût voulu conserver, comme d'habitude, la continuité de leurs surfaces convexes, leur exécution en grand aurait exigé une telle masse de verre, qu'aucun avantage pratique n'aurait pu résulter de leur application à l'éclairage des phares. Fresnel (1) imagina, afin de rendre possible l'emploi des lentilles, de les composer d'une partie centrale entourée d'anneaux concentriques (*fig. 184*), en saillant les uns sur les autres, et représentant, pour ainsi dire, les bords d'une série de lentilles de divers rayons, mais à foyer principal commun. Buffon avait déjà, à l'insu de Fresnel, proposé d'établir les *lentilles à échelons*, mais il les supposait formées d'une seule pièce. Fresnel, au contraire, composait sa lentille d'une série de pièces séparées, fondues et travaillées à part, puis assujetties au moyen de colle de poisson. Le profil fut formé d'un côté par une ligne droite, de manière à favoriser l'exécution ; les centres, les rayons et les amplitudes des arcs de cercle de la face opposée furent calculés de manière à réduire autant que possible l'*aberration de sphéricité* en même temps que l'épaisseur du verre.

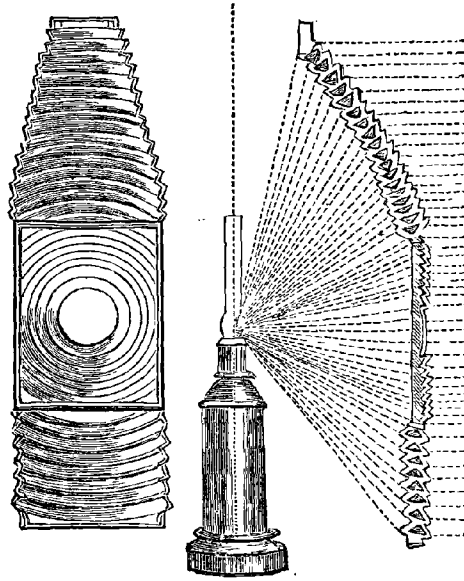


Fig. 184.

LENTILLE A ÉCHELONS, FACE ET PROFIL.

» En faisant tourner ce profil autour de son axe principal, on engendre la lentille à éléments *annulaires*, qui sert à construire l'appareil dioptrique des phares à *éclipses*. A cet effet (*fig. 185*), on dispose plusieurs de ces lentilles de manière à former un prisme régulier, à base polygonale, ayant pour axe la verticale qui passe par leur foyer commun. Qu'une source de lumière occupe ce foyer et qu'on fasse tourner le tambour lenticulaire autour de son axe, on obtiendra les mêmes effets qu'avec l'appareil de Teulère ; mais, tandis que les réflecteurs absorbent au moins 50 pour 100 de la lumière incidente, les lentilles à échelons absorbent 10 fois moins.

» Si, donnant au côté rectiligne du profil une position verticale, on fait tourner ce profil autour de la parallèle à ce côté menée par le foyer principal, on engendre une nouvelle lentille à échelons dont la forme générale est celle d'une surface

(1) FRESNEL (Augustin-Jean), célèbre physicien français (1788-1827), d'abord ingénieur des ponts et chaussées dans le département de la Drôme, puis attaché en 1819 au service des phares, abandonna le service pour se livrer à la science pure. Nommé examinateur à l'École polytechnique, membre de l'Institut, il reçut la médaille d'or de la Société Royale de Londres. Son application des lentilles à échelons à l'éclairage des phares a immortalisé son nom.

cylindrique (fig. 186). Les rayons de lumière émanés du foyer sont alors réfractés horizontalement, dans tous les sens, et l'on obtient un phare à *feu fixe*.

» Pour utiliser le plus complètement possible les rayons de lumière émanés de la lampe située au foyer commun de toutes les lentilles qui composent l'appareil dioptrique, Fresnel imagina de faire recevoir les rayons supérieurs, qui eussent été perdus, par des lentilles trapézoïdales; celles-ci sont disposées tout autour de la lampe, suivant une inclinaison telle, que les rayons se trouvent réfléchis hori-

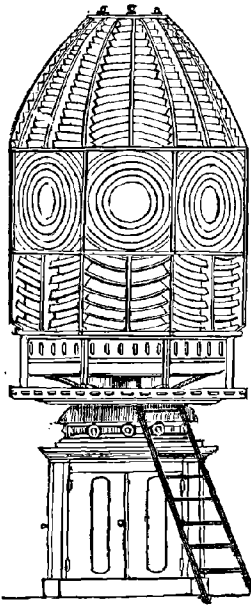


Fig. 185.

APPAREIL LENTICULAIRE  
D'UN  
PHARE A ÉCLIPSES.

zontalement, par des miroirs formant éventail, et vont renforcer les faisceaux des lentilles verticales. Depuis, au lieu des lentilles inclinées et des miroirs réflecteurs, on recueille les rayons qui ne tombent pas sur les lentilles verticales, par des séries de couronnes de miroirs de verre étamé, convenablement inclinés, ou encore par des séries de prismes où les rayons lumineux subissent la réflexion totale.

» Dans un appareil *catoptrique*, on peut multiplier les lampes pour obtenir un feu plus puissant; mais, dans un appareil lenticulaire, l'usage d'une seule lampe est obligatoire. C'est pourquoi Fresnel et Arago ont cherché à augmenter la puissance de la flamme. Le bec de lampe à plusieurs mèches concentriques, placées

chacune entre deux courants d'air, a permis d'obtenir une grande intensité lumineuse avec une flamme d'un faible volume (1). »

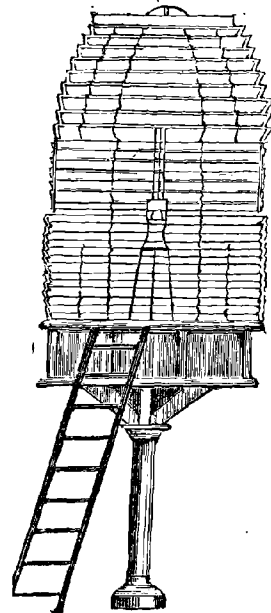


Fig. 186.

APPAREIL LENTICULAIRE  
D'UN  
PHARE A FEU FIXE.

Le nombre des phares allumés sur les côtes de France est de 330 :

43 Phares de 1 <sup>er</sup> ordre, dont le diamètre des appareils optiques qui les éclairent est de	1 <sup>m</sup> ,84
6 Phares de 2 <sup>e</sup> ordre.	— 1 <sup>m</sup> ,40
44 Phares de 3 <sup>e</sup> ordre.	— 1 <sup>m</sup> ,00
225 Phares de 4 <sup>e</sup> ordre ou fanaux.	— 0 <sup>m</sup> ,50
10 Feux flottants.	— 0 <sup>m</sup> ,375

Ils peuvent être encore divisés, d'après leurs caractères distinctifs, en 7 genres principaux : feux fixes, feux à éclipses, feux fixes variés par

(1) Lucas (Félix), *Etude historique et statistique sur les voies de communication, phares, balises, etc.* (Exposition universelle de Vienne, 1873). — *Notices sur les modèles, cartes et dessins relatifs aux travaux des ponts et chaussées* (Exposition universelle à Paris, 1878). Ministère des travaux publics.

des éclats, feux scintillants, feux alternativement fixes et scintillants, feux clignotants, feux diversement colorés.

Nous donnons le tableau de nos phares du premier ordre :

PHARES.	FORME DE LA TOUR.	Hauteur du foyer.		CARACTÈRE DU FEU.
		mètres.	milles.	
Dunkerque .....	Cylindrique.	59	25	A éclipses par minute.
Calais .....	Octogonale.	58	20	Fixe, éclats, éclipses.
Cap Gris-Nez .....	Cylindrique.	69	30	A éclipses.
La Canche (2 phares) .....	Octogonale.	53	20	Fixes.
Cap de L'Ailly .....	Carrée.	93	27	A éclipses.
Fécamp .....	Carrée.	114	18	Fixe.
Cap de La Hève (2 phares) ..	Carrées.	121	27	Fixes.
Fatouville .....	Octogonale.	123	20	Fixes, éclats rouges.
Pointe de Barleur .....	Cylindrique.	72	22	A éclipses.
Cap de La Hague .....	Cylindrique.	47	18	Fixe.
Cap Fréhel .....	Octogonale.	79	24	A éclipses.
Roches-Douvres .....	Métallique, 16 pans.	55	25	Scintillant, éclipses.
Héaux de Bréhat .....	Cylindrique.	45	18	Fixe.
Ile de Bas .....	Cylindrique.	68	24	A éclipses.
Pointe du Stiff .....	2 tours cylind. accolées.	83	18	Fixe.
Pointe de Créac'h .....	Cylindrique.	68	24	Éclipses, éclats rouges et blancs.
Ile de Sein .....	Cylindrique.	45	18	Fixes, avec éclats.
Bec du Raz de Sein .....	Carrée.	79	18	Fixe.
Pointe de Penmarck .....	Cylindrique.	41	22	A éclipses.
Ile de Groix .....	Carrée.	59	18	Fixe.
Belle-Ile .....	Cylindrique.	84	27	A éclipses.
Ile d'Yeu .....	Cylindrique.	54	18	Fixe.
Les Baleines .....	Octogonale.	50	24	A éclipses.
Chassiron .....	Cylindrique.	50	18	Fixe.
Cordouan .....	Cylindrique.	60	27	A éclipses.
Dunes de Hourlin (2 phares) ..	Carrées.	54	20	Fixes.
Bassin d'Arcachon .....	Cylindrique.	51	18	Fixe.
Dunes de Contis .....	Cylindrique.	50	24	A éclipses.
Biarritz .....	Cylindrique.	73	22	A éclipses.
Cap Béarn .....	Cylindrique.	229	20	Fixe.
Mont d'Agde .....	Carrée.	126	27	A éclipses.
La Camargue .....	Cylindrique.	38	18	Fixe.
Planier .....	Cylindrique.	40	20	A éclipses.
Porquerolles .....	Carrée.	80	20	Fixe, à éclats.
Cap Camarat .....	Carrée.	130	27	A éclipses.
Antibes .....	Cylindrique.	103	20	Fixe.
Cap Corse .....	Cylindrique.	82	22	A éclipses.
Golfe de Galvi .....	Carrée.	88	20	Fixe.
Golfe d'Ajaccio .....	Carrée.	98	20	Fixe, à éclats.
Mont Pertusato .....	Carrée.	99	27	A éclipses.
Porto-Vecchio .....	Carrée.	66	20	Fixe, à éclats.
Alstro .....	Octogonale.	94	20	Fixe.

Le même volume que nous avons cité nous donne, relativement à l'application de la lumière électrique à l'éclairage des phares, les renseignements officiels suivants :

« L'application de la lumière électrique à l'éclairage des phares remonte déjà à quinze ou vingt ans, et, depuis lors, ce nouveau système ne s'est pas répandu aussi rapidement qu'on aurait pu le supposer. En France, il n'y a encore que quatre phares électriques, ceux du cap de La Hève, celui de Planier et celui du cap Gris-Nez. Ce n'est

pas que les machines destinées à produire les courants électriques ou à les transformer en lumière aient présenté des imperfections ou donné lieu à des accidents ; il faut reconnaître, au contraire, qu'elles ont fonctionné avec toute la régularité désirable. Mais tous les phares importants de France sont depuis longtemps installés avec les appareils optiques destinés à recevoir un éclairage à l'huile, de sorte que, pour y introduire la lumière électrique, il faut commencer par sacrifier le capital que représentent ces appareils et s'imposer ensuite une dépense au moins aussi importante pour l'installation du nouveau mode d'éclairage. Tel est le motif qui a fait ajourner l'emploi de l'électricité. Cependant les appareils lenticulaires établis dans les premières années qui ont suivi l'invention de Fresnel commencent à présenter des dégradations qui nuisent à leur efficacité pour la concentration de la lumière ; les miroirs sont partout plus ou moins altérés. A mesure qu'il deviendra nécessaire de renouveler ces anciens appareils, on aura à examiner si, eu égard aux circonstances locales, il est avantageux de les remplacer par des appareils d'éclairage électrique. »

Cependant d'autres raisons encore s'opposent, selon quelques-uns, à la généralisation de l'emploi de l'électricité pour l'éclairage des phares.

Dans un mémoire lu en 1882 devant l'Association britannique, M. John R. Wigham a comparé le gaz à la lumière électrique pour l'éclairage des phares, et il résulte de ce mémoire que, pour cette application spéciale, le gaz est préférable à la lumière électrique.

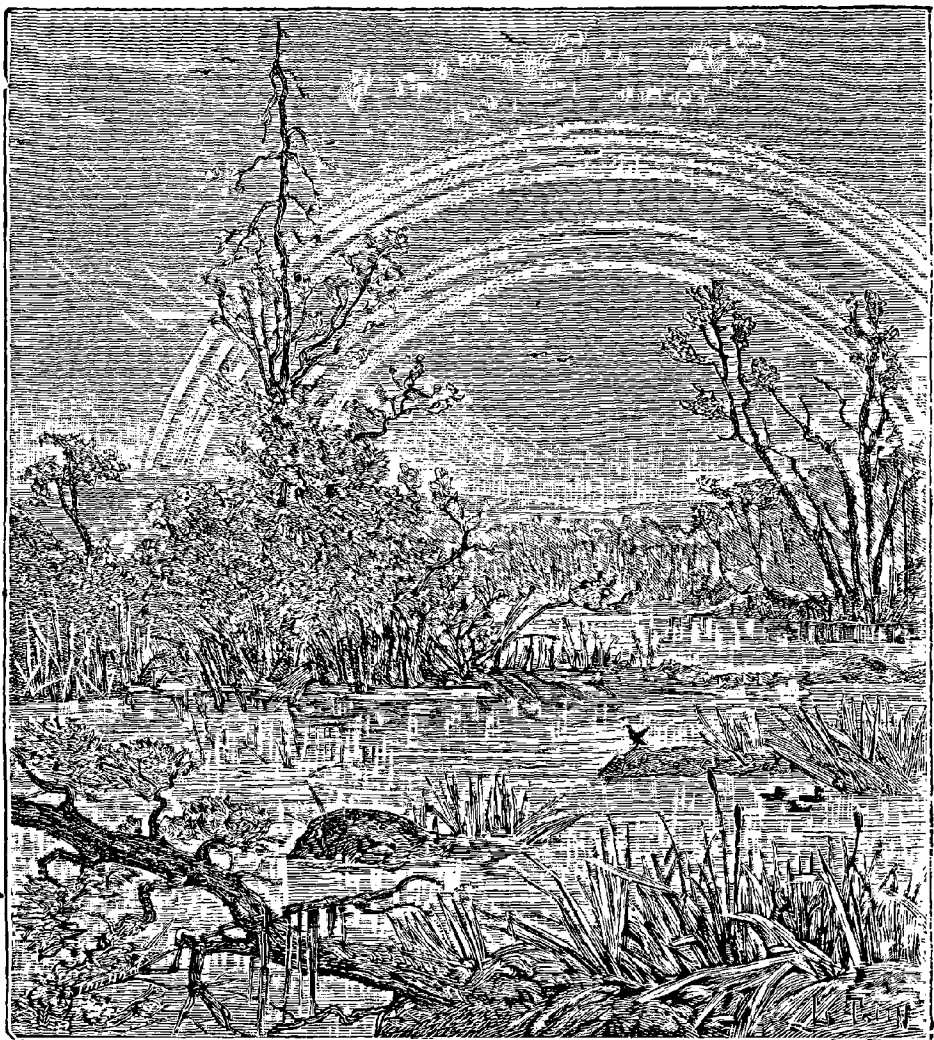
Des expériences récentes ont été faites en Angleterre, à la tour des signaux du Parlement. On plaça deux lumières côte à côte, et on les observa de Primrose Hill. La lumière électrique était produite par une puissante machine Gramme et placée au foyer d'un magnifique appareil lenticulaire ; le gaz était employé dans un appareil dioptrique de premier ordre à feu fixe. Le résultat des expériences, qui durèrent fort longtemps, fut que la lumière électrique était beaucoup plus éclatante que le gaz par le beau temps, qu'elle était moins brillante que lui dans les temps brumeux, et que, par les temps de brouillards, le gaz restait visible après que la lumière électrique avait été obscurcie. Le résultat fut le même avec les lumières nues, employées sans appareil lenticulaire. D'autres expériences, faites au phare de Howth Bailey, ont donné les mêmes résultats.

En résumé, on peut faire à l'application de la lumière électrique pour l'éclairage des phares les deux objections suivantes : 1° Par le beau temps, cette lumière trouble le marin, qui ne peut être certain de la distance qui le sépare d'elle ; suivant l'état de l'atmosphère, son éclat est le même, qu'on la voie de dix kilomètres ou d'un kilomètre de distance ; 2° Dans les temps de brouillards, où l'on a surtout besoin de lumière, la lumière électrique est plus aisément éteinte par le brouillard que le gaz, dans les appareils employés actuellement dans les phares.

De plus, le prix d'installation de l'éclairage électrique dans un phare

est plus du double de celui de l'installation de l'éclairage au gaz ou à l'huile.

Néanmoins, une loi de 1882 a prescrit l'exécution de phares électriques sur les côtes de l'Océan, de la Manche, de la mer du Nord et de la Médi-



L'arc-en-ciel (page 438).

terrannée. L'éclairage peut y être gradué sur l'éclat de l'atmosphère, c'est-à-dire qu'on peut le forcer lorsque la transparence de l'air n'est point parfaite. Les machines à vapeur que l'on possède permettent, en outre, de munir les phares de signaux acoustiques à grande portée.

## CHAPITRE IV

## DISPERSION

**SPECTRE SOLAIRE. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.** — Ce que Platon déclarait hors du pouvoir de l'homme, la *décomposition de la lumière*, Newton le fit. C'est à ce phénomène, produit par le passage d'un rayon lumineux à travers un prisme, que l'on a donné le nom de *dispersion*.

Les recherches optiques de l'illustre savant anglais, rapporte

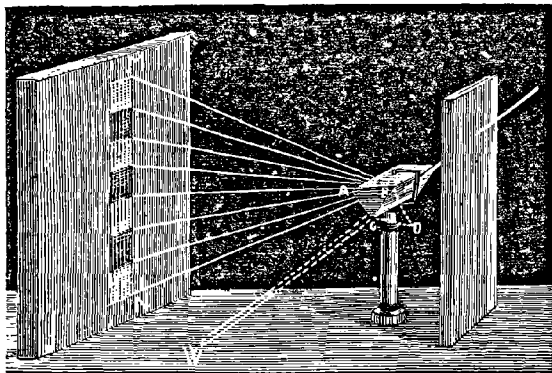


Fig. 187. — SPECTRE SOLAIRE.

M. Hoeffler, paraissent remonter à l'année 1666; mais ce ne fut qu'en 1668 qu'il fit l'expérience capitale du *spectre solaire*. Après s'être procuré un prisme de verre, il pratiqua une ouverture H dans le volet fermé d'une chambre obscure (*fig. 187*), et y fit passer un rayon de soleil, qui, après s'être réfracté aux deux surfaces AC, BC du prisme ABC,

présentait sur le mur opposé MN ce qu'on appela depuis *spectre solaire* ou *prismatique* : c'était une figure allongée du soleil, environ cinq fois plus longue que large, et composée des sept couleurs de l'arc-en-ciel : le *rouge*, l'*orange*, le *jaune*, le *vert*, le *bleu*, l'*indigo* et le *violet*, disposés par des dégradations continues et dans le même ordre que l'arc-en-ciel. « C'était pour moi, dit Newton, un grand plaisir de voir se produire de cette façon des couleurs aussi vives qu'intenses. » Mais ce plaisir fut bientôt troublé. Newton s'aperçut avec surprise que ce phénomène de coloration ne se conciliait pas avec les lois établies de la réfraction. La disproportion excessive entre la longueur du spectre et la largeur excita au plus haut point sa curiosité. Il ne pouvait guère se persuader que l'épaisseur variable du



verre ou la limite d'ombre eût déterminé un pareil effet. Il varia dès lors ses expériences en employant des verres de différentes épaisseurs, en faisant passer la lumière par des ouvertures plus ou moins grandes, en plaçant le prisme en avant de l'ouverture au lieu de le tenir derrière, etc.; mais le résultat fut toujours le même. Croyant alors que cette *dispersion* des couleurs était produite par quelque inégalité ou autre accident de la masse vitreuse, il prit un second prisme BCD, et le plaça de manière que la lumière, déviant de la même quantité en sens contraire, dût suivre la route RR' : il pensait que l'effet normal du prisme ABC serait ainsi neutralisé par le second prisme BCD, et que toute irrégularité serait augmentée par la multiplicité des réfractions. Le résultat fut que la lumière, que le premier prisme avait dispersée en la forme oblongue MN, était réduite par le second prisme à la forme circulaire W, d'une régularité parfaite. La longueur de l'image MN ne provenait donc pas de quelque défaut du prisme. Enfin, après de nombreux

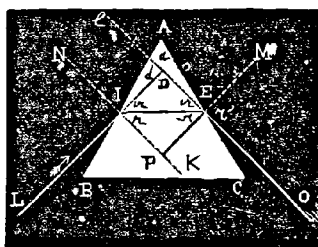


Fig. 188.

RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE  
AU MOYEN DES PRISMES.

et vains essais pour trouver la cause de l'élongation du spectre coloré, il fit cette expérience capitale : Il plaça derrière la face BC du prisme une planchette percée d'un petit orifice, de manière à laisser passer isolément chacun des rayons colorés en MN. Quand le petit orifice était, par exemple, près de l'arête C, il n'y eut d'autre rayon que le rouge qui put tomber sur N. Il mit alors derrière l'espace rouge, en avant du mur, une autre planchette, également percée d'un petit orifice, et derrière cette planchette, il plaça un second prisme de manière à recevoir la lumière rouge qui passait par l'orifice de la seconde planchette. Ces dispositions prises, il tourna le premier prisme ABC, de telle façon que tous les rayons colorés traversassent successivement les deux orifices, et il marqua les places de ces rayons sur le mur. La différence de ces places lui permit de constater que les rayons rouges étaient moins réfractés par le second prisme que les rayons orange, les rayons orange l'étaient moins que les jaunes, et ainsi de suite, jusqu'aux rayons violets qui étaient les plus réfractés de tous. Cette expérience définitive permit à Newton d'établir ces principes :

1° *La lumière blanche du soleil est composée d'une infinité de rayons diversement colorés parmi lesquels on distingue sept couleurs principales ;*

2° *Les couleurs élémentaires du spectre solaire sont simples et inaltérables ;*

3° *Les rayons diversement colorés du spectre solaire ont une réfrangibilité différente.*

Cette théorie de la composition de la lumière est confirmée par la recomposition de la lumière blanche, c'est-à-dire en réunissant les diverses couleurs du spectre. On effectue cette recomposition, soit en ramenant au parallélisme tous les rayons qui forment le spectre solaire, soit en les réunissant tous en un même point.

La première expérience se fait en recevant le spectre formé par un premier prisme ABC (*fig. 188*) sur un second prisme DKII de même angle

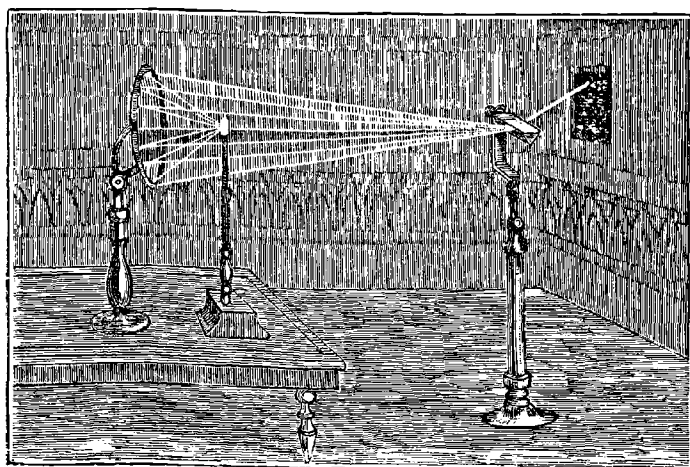


Fig. 189. — RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE AU MOYEN D'UN MIROIR.

réfringent et tourné en sens inverse. Ce second prisme ramène au parallélisme les rayons séparés par le premier, de sorte que le rayon émergent E arrivant sur l'écran est incolore, comme le rayon incident I.

On les réunit au même point en faisant passer un faisceau de lumière au travers d'un prisme, puis en recevant le spectre sur une lentille biconvexe un peu grande, au foyer de laquelle on place un petit écran. Les sept couleurs du spectre concourant au foyer, une image circulaire, parfaitement blanche, s'y forme. On arrive au même résultat en remplaçant la lentille par un miroir concave (*fig. 189*). Les sept faisceaux colorés, se réfléchissant sur le miroir, forment à son foyer une image blanche, ce qui prouve bien que la réunion des sept lumières du spectre reproduit la lumière blanche.

Un mode de recomposition de la lumière, fondé sur la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, est dû à Newton. Sur un disque de carton ou de verre de 0<sup>m</sup>,30 ou 0<sup>m</sup>,40, mobile autour d'un axe

vertical (*fig. 190*), on peint une série de secteurs, colorés, aussi exactement que possible, des teintes du spectre, et ayant des angles au centre proportionnels aux longueurs de ces teintes dans le spectre lui-même. Si l'on imprime à ce disque un mouvement de rotation rapide, toutes les bandes colorées viennent se peindre simultanément dans l'œil, et le disque, dans l'intervalle des zones noires, paraît blanc ou du moins d'un blanc grisâtre.

**THÉORIE DE NEWTON SUR LA COLORATION DES CORPS OPAQUES  
— COULEURS COMPLÉMENTAIRES.**

— Les sept couleurs qui forment la lumière blanche, et qui, en vertu de leur différence de réfrangibilité, se séparent en traversant un prisme, sont dites couleurs *simples* ou *primitives*. Les corps colorés décomposent seulement la lumière, et la couleur propre de chaque corps dépend de son pouvoir réfléchissant par rapport à chacune des diverses couleurs primitives. Ceux qui les réfléchissent toutes sont blancs, ceux qui n'en réfléchissent aucune sont noirs, comme nous l'avons déjà dit (page 380). Que l'on prenne une rose et qu'on la porte dans le spectre solaire, au milieu d'une chambre obscure, elle paraîtra successivement rouge, orangée, jaune, verte, selon la bande du spectre dans laquelle elle sera placée, ce qui prouve que sa couleur dépend uniquement de l'espèce de lumière que sa constitution lui permet de réfléchir.

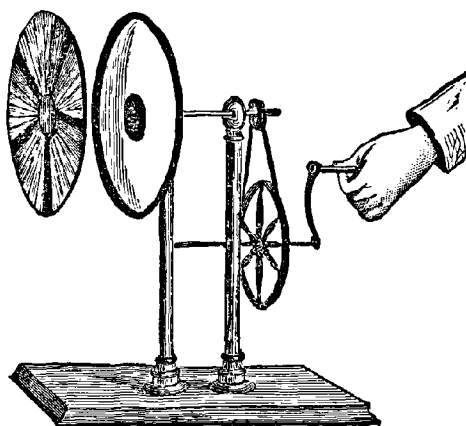


Fig. 190. — DISQUES DE NEWTON.

Rappelons encore que les différents faisceaux du spectre ne sont pas colorés, mais que, d'après le nombre des vibrations de l'éther correspondant à chacun d'eux, ils ont la propriété de faire naître en nous telle ou telle sensation de couleur. Quant aux nuances si variées que nous offrent les corps colorés, elles résultent, non seulement de ce que ceux-ci réfléchissent à la fois plusieurs espèces de couleurs, mais qu'ils les réfléchissent à des degrés très divers. Ainsi, un corps qui réfléchira en même temps la lumière jaune et la lumière bleue sera vert, et d'un vert variant avec la quantité de lumière bleue ou jaune qu'il réfléchit. En effet, en se servant d'écrans percés de diverses ouvertures, de façon à laisser passer

telle portion du spectre que l'on veut, on obtient des couleurs composées. Le tableau suivant, donné par M. Helmholtz, fait connaître le résultat de la combinaison, deux à deux, des cinq couleurs élémentaires les plus nettes du spectre scolaire : il se consulte comme une *table de Pythagore*.

	Rouge.	Jaune.	Vert.	Bleu.	Violet.
Rouge.	Rouge.	Orangé.	Jaune terne.	Rose.	Pourpre.
Jaune.	Orangé.	Jaune.	Vert jaunâtre.	Blanc.	Rose.
Vert.	Jaune terne.	Vert jaunâtre.	Vert.	Vert bleuâtre.	Bleu pâle.
Bleu.	Rose.	Blanc.	Vert bleuâtre.	Bleu.	Indigo.
Violet.	Pourpre.	Rose.	Bleu pâle.	Indigo.	Violet.

On donne le nom de *couleurs complémentaires* à celles dont la réunion forme le blanc. Ainsi le bleu est complémentaire du jaune ; le vert et le rouge, donnant un jaune terne presque blanc, sont aussi complémentaires l'un de l'autre, etc.

**ARC-EN-CIEL.** — Le phénomène de l'*arc-en-ciel* est une conséquence de la *dispersion*. Ce magnifique phénomène qu'un poète décrit ainsi :

Sept rubans colorés composent ce portique,  
Qui, simple en ses contours, mais d'un aspect magique,  
Semble aux fils de la terre une porte des cieux,

est produit simplement par le passage de la lumière du soleil à travers les gouttes de pluie, qui, faisant l'effet de prismes, la réfractent et la décomposent. Pour les païens, ces splendides couleurs semblaient dignes de parer une déesse ; ils y voyaient la trace laissée par Iris, la messagère des dieux.

... De Junon l'agile messagère  
Glisse dans l'air sur une aile légère ;  
De ses couleurs le mélange éclatant  
Brille à sa suite ; il peint en un instant  
L'immensité des célestes campagnes,  
Descend en arc au-dessus des montagnes,  
Touche les pins, les chênes, et parait,  
En l'éclairant, embraser la forêt.

Ce météore se produit lorsque la lumière du soleil vient à tomber sur un nuage qui se résout en pluie (*fig.* à la page 433). Les rayons amenés, par une réflexion subie dans l'intérieur même de la goutte d'eau, à l'œil d'un spectateur qui tourne le dos au soleil, y produisent la sensation d'un arc formé de bandes colorées ; ces bandes offrent les mêmes nuances que le spectre solaire, et dans le même ordre, la bande rouge étant extérieure à l'arc, et la bande violette intérieure. On aperçoit quelquefois un second arc qui enveloppe le précédent, et dont les bandes sont rangées dans un ordre inverse : il est produit par des rayons colorés qui ont subi deux réfractions dans l'intérieur des gouttes d'eau, avant d'arriver à l'œil de l'observateur. On peut produire des arcs-en-ciel en jetant de l'eau en l'air, de manière qu'elle s'éparpille ; les jets d'eau, les cascades, la rosée qui humecte les prairies, nous offrent ce phénomène, lorsque l'on est placé convenablement pour l'observer, c'est-à-dire lorsque les gouttelettes étant éclairées par les rayons du soleil, on les regarde d'une certaine distance, en tournant le dos à cet astre. La lumière de la lune peut aussi produire un arc-en-ciel, surtout quand elle est pleine, et qu'elle brille de tout son éclat ; mais les couleurs en sont toujours pâles et fauves.

**PROPRIÉTÉS DU SPECTRE.** — Les couleurs du spectre possèdent des propriétés lumineuses, calorifiques et chimiques. Ainsi, il résulte des expériences de Fraunhofer (1) et de Herschel que la plus grande intensité lumineuse réside dans le jaune et la moindre dans le violet. L'intensité calorifique varie également. Leslie, le premier, remarqua qu'elle va en croissant du violet au rouge ; Herschel en place le maximum sur la face obscure qui termine le rouge, et Bérard dans le rouge même. Seebeck explique ces différences par la nature des prismes réfringents, puisque, avec un prisme d'eau, il rencontrait le maximum d'intensité dans le jaune, avec un d'alcool dans l'orangé et enfin avec un prisme de crown au milieu du rouge. Melloni confirma les expériences de Seebeck avec son thermo-multiplicateur (*Chaleur*, pages 484 et 499), et constata que le maximum s'éloigne d'autant plus du jaune vers le rouge que la substance du prisme est plus diathermane.

Dans un grand nombre de phénomènes, la lumière solaire se comporte comme un agent chimique. Ainsi le protochlorure de mercure et le chlorure d'argent des plaques photographiques noircissent sous l'in-

(1) FRAUNHOFER (Joseph), opticien bavarois (1787-1826). On lui doit la construction d'instruments très précis, et des études précieuses sur la lumière.

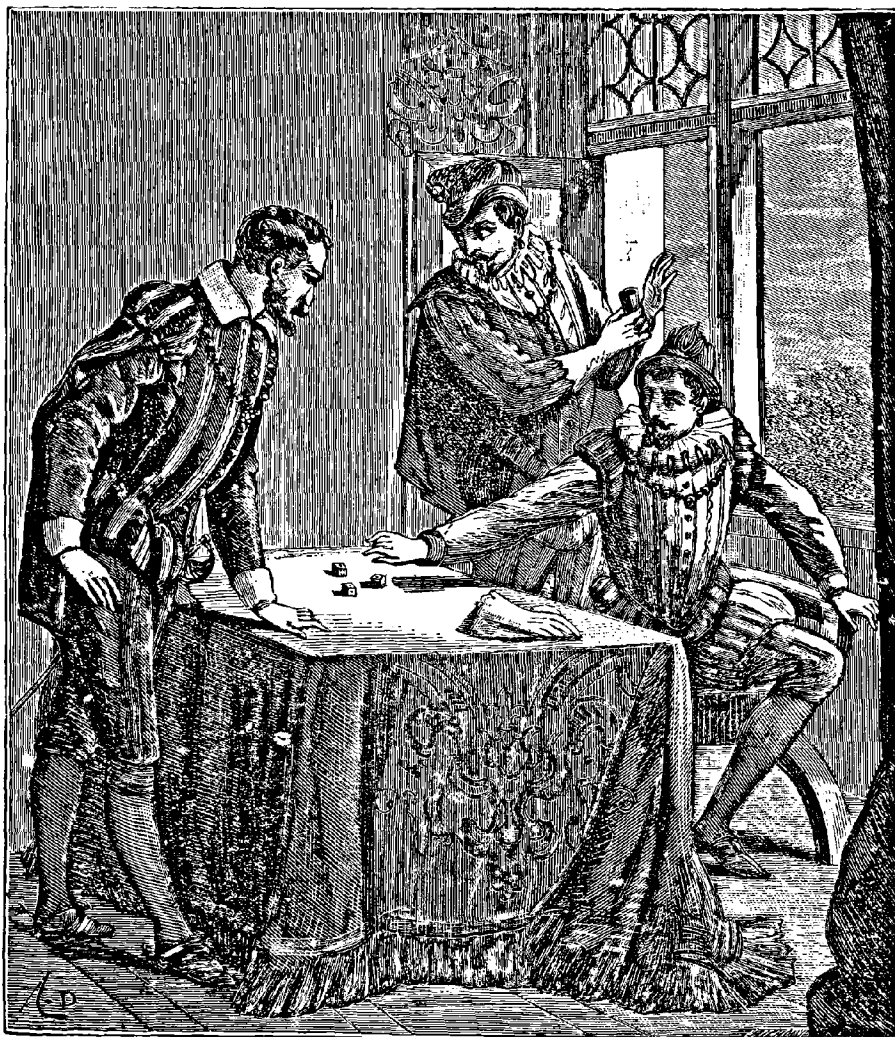
fluence de la lumière; de même, cette influence forme des combinaisons, comme celle qui altère les rideaux et les tentures de nos appartements, l'oxygène de l'air se combinant avec la matière colorante de l'étoffe; enfin elle contribue avant toutes choses à la production de la matière verte des plantes. Toutefois, toutes les couleurs du spectre ne possèdent pas la même action; celles qui jouissent de cette propriété sont appelés *rayons chimiques*. M. E. Becquerel a de plus découvert, dans le spectre solaire, deux autres sortes de rayons: les uns, qu'il appelle *continueurs*, n'exercent par eux-mêmes aucune action chimique, mais la continuent quand elle est commencée; les autres, appelés *phosphorogéniques*, rendent lumineux certains corps dans l'obscurité (page 381). Il a reconnu que le spectre phosphorogénique se tient dans l'indigo, près du violet.

Cette question de la lumière comme agent chimique est d'une grande importance pratique. L'action de la lumière sur les plantes et même sur les hommes est bien connue. Ce sont les rayons lumineux qui fabriquent littéralement les végétaux en leur permettant de s'assimiler le carbone de l'acide carbonique répandu dans l'air; tout le monde a constaté que les plantes s'étiolent et finissent par mourir lorsqu'on les conserve dans l'obscurité. L'homme a tout autant besoin de lumière que le végétal; les rayons lumineux exercent une action particulière sur la peau, et, sans doute, sur tout le système nerveux, et facilitent la circulation, les sécrétions, etc. Les habitants des lieux privés de lumière, les prisonniers, les ouvriers des mines, ceux qui vivent dans les rues étroites, dans les appartements obscurs, présentent une sorte de langueur, d'atonie générale; la peau est pâle, l'œil terne; leur sang s'appauvrit; ils sont sujets aux scrofules, aux hydropisies, au rachitisme, et particulièrement aptes à contracter les maladies épidémiques. Au contraire, les habitants de la campagne ont le sang chaud, coloré; ils sont pleins de vigueur. La différence d'air entre pour beaucoup, il est vrai, dans ces résultats. Il est clair que l'air de la ville ne saurait être comparé à l'air pur des champs; mais l'air de la campagne doit à la lumière une partie de ses propriétés toniques.

Les rayons chimiques sont surtout les rayons violets; mais, selon les uns, les rayons verts et rouges sont les plus actifs; les rayons rouges et jaunes ont le plus d'influence sur le développement des plantes et sur la santé des animaux. De nombreuses expériences ont été faites sur ce sujet. Un agronome américain, le général Pleasanton, a transmis récemment à l'Académie des sciences de Paris ses observations et le résumé de ses essais, entrepris depuis quinze ans.

Voici brièvement les faits. En avril 1861, le général planta, dans une

serre garnie de verres violets, des boutures de vigne d'un an, de la grosseur de 7 millimètres environ, et de trente espèces différentes de raisins. En quelques semaines, les boutures, plantées au ras du sol, s'étaient cou-



Ils virent tout à coup apparaître sur leurs dés des taches sanglantes (page 461).

vertes de feuillages et avaient projeté leurs pousses sur les murs, jusqu'au toit. A cinq mois, elles mesuraient déjà 15 mètres de longueur sur 0<sup>m</sup>,03 de diamètre à la base. On estime qu'une vigne, provenant d'une jeune pousse, exige de cinq à six ans pour produire une seule grappe

de raisin. Sous l'influence de la lumière violette, la vigne de la serre donna au bout de dix-sept mois 1,200 livres de raisin. La deuxième année, en 1863, elle produisit dix tonneaux de raisins exempts de maladie. Les vigneronns avaient prédit que ces vignes s'épuiseraient rapidement; depuis le jour où elles ont été plantées, elles ont continué à fournir la même récolte, avec une nouvelle pousse de bois et de feuillage non moins extraordinaire.

L'influence de la lumière violette ne lui paraissant plus contestable, le général Pleasanton répéta ses expériences sur des animaux. Le 3 novembre 1869, il plaça trois petites truies et un verrat dans un compartiment dont le toit était couvert de verres violets, et trois autres truies et un verrat dans un autre compartiment garni de verres blancs. Ces animaux avaient tous environ deux mois; les quatre premiers pesaient 167 livres et demie, les quatre autres 203 livres. Ils furent soignés par la même personne, avec la même nourriture, en qualité et en quantité semblables, et aux mêmes heures. Le 3 mai 1870, en pesant les six truies, on obtint les résultats suivants : compartiment aux verres violets : poids primitif, 122 livres, nouveau poids, 520; compartiment aux verres blancs : poids primitif, 144, nouveau poids, 530. Augmentation dans le premier cas, 398; dans le second, 386. On voit donc, en définitive, que le gain en faveur des animaux nourris derrière des verres violets sur les animaux élevés derrière des verres blancs est de 12 livres. L'accroissement en vaut la peine. La comparaison des deux verrats donna le même résultat.

Il était bon de recommencer l'expérience sur une autre espèce; cette fois, on choisit un jeune taureau Alderney, tellement malingre qu'on désespérait de pouvoir l'élever; on le plaça sous des verres violets. Au bout d'un jour, on remarqua déjà un changement dans la santé de l'animal; il s'était relevé, se promenait et prenait lui-même sa nourriture. Au bout de quelques jours, sa faiblesse avait complètement disparu, et il devint, à l'âge de 14 mois, un des plus beaux types de l'espèce.

Ajoutons que des expériences de M. Paul Bert, poursuivies depuis plusieurs années, sont en contradiction formelle avec ces résultats, du moins en ce qui concerne les végétaux. M. Paul Bert a trouvé que les plantes dégénéraient dans le vert, dans le violet, le rouge, le jaune, etc., et ne s'accroissaient que dans la lumière blanche. Plongés dans la lumière verte, les végétaux meurent comme s'ils étaient placés dans l'obscurité absolue. La végétation se fait moins mal dans le bleu; dans le violet et le rouge, il y a aussi étiolement et dépérissement manifeste. M. Paul Bert en conclut que tous les rayons à la fois sont indispensables à la vie végétale.

Quoi qu'il en soit, la lumière bleue du ciel, dans certaines contrées



favorisées, joue certainement un certain rôle dans les éléments du climat. Qui n'a éprouvé sur soi-même l'influence d'un ciel bleu, d'un ciel nuageux et brumeux? Le problème a donc besoin d'être examiné de très près et par une méthode d'une grande précision, avant qu'il soit permis de poser des conclusions certaines; mais évidemment il y a là un problème que résoudra l'avenir (1).

**RAIES DU SPECTRE. — SPECTROSCOPE.** — Les diverses couleurs du spectre solaire ne sont pas continues; il manque des rayons pour un grand nombre de degrés de réfrangibilité; c'est pourquoi, dans toute la largeur du spectre, on observe des lacunes, qui apparaissent sous la forme

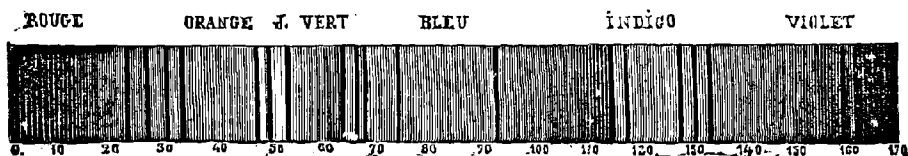


Fig. 191. — RAIES DU SPECTRE SOLAIRE.

de raies plus ou moins étroites, perpendiculaires aux bords, irrégulièrement espacées, et que l'on appelle *raies du spectre* (fig. 191). Dès 1802, Wollaston signala ces raies; mais ce fut Fraunhofer qui, le premier, les étudia vers 1815, en donna la description et un dessin exact, dans lequel il indique, au moyen des lettres de l'alphabet A, a, B, C, D, E, b, F, G, H les plus apparentes, que l'on appelle *raies de Fraunhofer*. La raie A est dans le rouge très sombre, puis vient un groupe de raies a; la raie double B est plus loin, dans le rouge; entre le rouge et l'orange se trouve la raie C; à la limite du jaune et de l'orange est une double raie D, facile à reconnaître. Dans le vert est d'abord situé un groupe E, très près du jaune, puis trois raies b. F est à la limite du vert et du bleu; c'est la seule raie importante de cette région. Dans le bleu, à l'entrée du violet, est un groupe présentant l'apparence de cannelures, ce sont les raies G; enfin deux groupes H, nombreux et voisins, se trouvent dans le violet. Dans le spectre solaire, ces raies occupent des positions fixes, qui permettent de mesurer avec exactitude l'indice de chaque couleur simple. Dans les spectres formés par une lumière artificielle, ou par celle des étoiles, la position des diverses raies varie, et, dans ceux que donne la lumière électrique, les raies obscures sont remplacées par des raies brillantes. Enfin, dans le spectre solaire lui-même, certaines raies, comme

(1) De Parville, *Causeries scientifiques*, 1871.

celles de Fraunhofer, ont toujours un même éclat; mais celui des petites raies intermédiaires dépend de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et de l'état de l'atmosphère au moment de l'expérience. On attribue la fixité de l'éclat de certaines raies au soleil; celles dont l'éclat varie sont ainsi par suite de l'absorption par l'atmosphère, ce qui les a fait appeler *rayons atmosphériques ou telluriques*.

Fraunhofer a compté dans le spectre solaire plus de 600 raies plus ou moins obscures, et il en dessina 354. Brewster a porté ce nombre à 2,000.

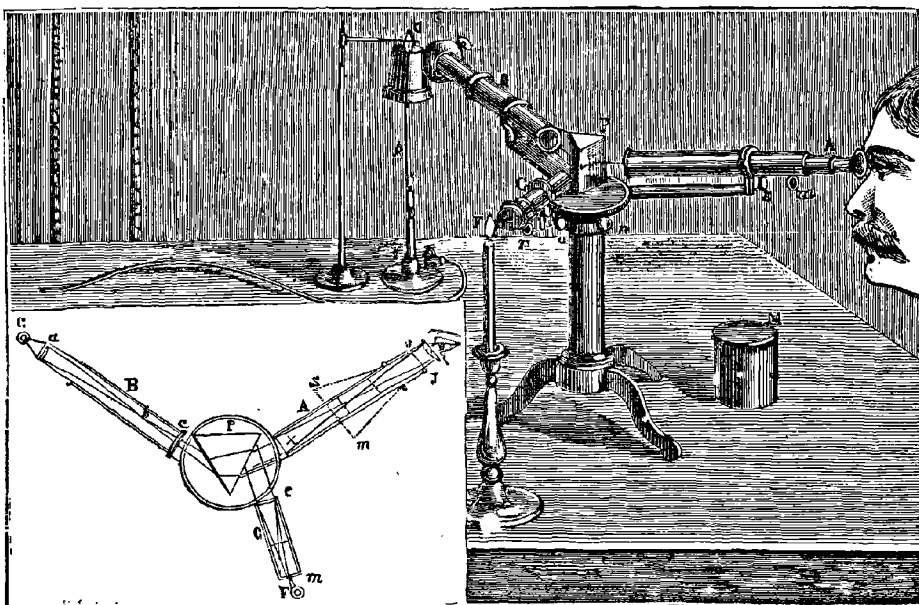


Fig. 192. — SPECTROSCOPE.

En recevant les rayons réfractés successivement à travers plusieurs prismes, non seulement on a trouvé depuis plus de 3,000 raies; mais encore on a vu que beaucoup de raies, considérées jusqu'alors comme simples, étaient, en réalité, composées de raies de teintes diverses.

Pour explorer le spectre, on se sert aujourd'hui d'un instrument qui remplace avantageusement la fente pratiquée dans une chambre obscure pour laisser passer le rayon de soleil. Cet appareil, imaginé par Kirchoff et Bunsen et perfectionné par Duboscq et Grandeau, se compose (*fig. 192*) de trois lunettes réunies sur un pied commun, et dont les tubes font face à un prisme de flint-glass P, autour duquel peut seule tourner la lunette A, que l'on fixe au moyen de la vis de pression *n* à la place que l'on veut lui donner. Le bouton *m* sert à la placer au foyer, c'est-à-dire à éloi-

guer ou à approcher l'oculaire, de façon que l'on voie bien l'image du spectre; enfin le bouton *s* permet d'incliner plus ou moins la lunette. Le faisceau émis par la flamme *G*, dont on veut étudier le spectre, rencontre une première lentille *a*, qui fait converger les rayons en un point *b*, foyer principal d'une autre lentille *c*, où ils sont rendus parallèles, et pénètrent dans le prisme. En en sortant, la lumière se décompose, et les sept raies du spectre tombent sur la lentille *x* qui forme en *i* une image réelle et renversée, que regarde l'observateur au moyen d'un *microscope simple* *Z*, qui donne en *ss'* l'image virtuelle du spectre en l'agrandissant. La lentille *c* sert à mesurer la distance relative des rayons du spectre; c'est pourquoi elle porte, à son extrémité antérieure, un *micromètre* divisé en 250 parties égales, en *m*, c'est-à-dire correspondant au foyer d'une lentille *e*, qui envoie sur le prisme un faisceau parallèle. Une portion de ce faisceau se réfléchit sur la face du prisme, se joint à celui venant de la lunette *A*, et reproduit en clair, sur le spectre même, une image parfaitement limpide du micromètre, avec laquelle on mesure les distances relatives des divers rayons. La lunette micrométrique est, en outre, pourvue de vis: *i*, qui indique le foyer; *o*, qui sert à faire mouvoir le micromètre latéralement au sens du spectre, et *r* à incliner plus ou moins la lunette pour se servir ou non du micromètre.

**ANALYSE SPECTRALE.**— Depuis Fraunhofer, un grand nombre de physiciens ont étudié les raies du spectre, parmi lesquels Becquerel, Draper, Stokes, Foucault, Plucker et Talbot; mais, en 1860, Kirchoff et Bunsen découvrirent une importante application du spectre solaire, sur laquelle ils basèrent une nouvelle méthode d'analyse chimique, appelée *analyse spectrale*.

La flamme d'une lampe, d'un bec de gaz ou de toute autre source, ne contenant aucune trace de vapeur métallique, donne des spectres d'une continuité parfaite, c'est-à-dire dans lesquels on n'aperçoit aucune trace obscure. Mais si l'on introduit dans ces flammes une substance métallique, on voit aussitôt apparaître, dans leurs spectres, des raies excessivement brillantes, disposées dans le même sens que les raies obscures du spectre solaire, et dont la couleur, le nombre et l'étendue varient selon la nature du métal. Par exemple, si l'on regarde à travers un prisme une flamme contenant un sel de soude, on voit apparaître une raie jaune caractéristique. Le *calcium* est caractérisé par trois raies (rouge, jaune et vert); le *rubidium* par une magnifique raie rouge, de sorte que la vue de ces raies colorées permet d'affirmer, dans la flamme observée, l'existence des métaux auxquels elles sont dues. Et il suffit de quantités

infinitésimales d'une substance dans une flamme pour que sa présence soit immédiatement signalée par les raies du spectre. C'est par ce moyen que l'on a pu découvrir dans les eaux minérales, dans des résidus de fabrique, où jamais jusqu'alors on n'en avait soupçonné la présence, des métaux nouveaux, le *césium*, le *rubidium*, le *thallium*. Il y a quelques années, un chimiste, M. Lecoq de Boisbaudran, examinait au spectroscope de la blende (1) de la mine de Pierrefitte. Le spectre de la lumière émise par cette blende, chauffée à une haute température, montra tout à coup un système de raies qui ne faisaient pas partie du catalogue des raies déjà enregistrées. Il y avait donc un corps nouveau. En 1875, M. de Boisbaudran avait trouvé ce corps : un métal, auquel il a donné le nom de *gallium*. Après l'avoir découvert, sans le voir, il a fini par l'isoler.

D'un autre côté, on a remarqué que si, devant la flamme très chaude d'un métal, on place la vapeur de ce même métal à une plus basse température, les raies brillantes qui le caractérisaient sont remplacées par des raies obscures. Ce phénomène, que l'on a appelé l'*inversion des raies*, est tout aussi caractéristique que le premier. L'observation des flammes et des corps lumineux n'étant nullement entravée par la distance, on a pu alors étudier facilement la lumière des astres. Ces corps donnent, en effet, pour la plupart, des spectres dans lesquels toutes les raies obscures proviennent d'une absorption par les gaz et les vapeurs de l'astre ; par l'inversion des raies, les raies noires s'illuminent des teintes qu'elles ont fait disparaître : on a un spectre provenant de la réunion des vapeurs à l'état incandescent, une superposition d'autant de spectres qu'il y a de substances gazeuses mélangées. En partant de ce principe, on a reconnu dans le soleil un grand nombre des corps simples qui constituent notre globe, et l'on a remarqué l'absence de certains autres sels, tels que le lithium, l'aluminium, le zinc, le cuivre. On a reconnu de même que la plupart des étoiles, donnant un spectre analogue à celui du soleil, ont une grande analogie de constitution ; on a vu que beaucoup des substances de la terre se trouvaient dans certaines étoiles et manquaient dans d'autres ; que le *sodium*, par exemple, répandu dans presque tous les astres, n'existe pas dans Sirius.

L'étude des astres par l'*analyse spectrale* est poursuivie avec ardeur par un grand nombre de savants. Récemment, un physicien anglais, M. Huggins, communiquait à un journal scientifique, le *Journal du Ciel*, un résumé de ses recherches sur les caractères différents qu'affecte la

(1) La blende est du sulfure de zinc naturel. Pour le *calcium*, le *rubidium*, le *césium*, l'*indium*, le *thallium*, le *gallium*, voir notre CHIMIE.

lumière, suivant qu'elle vient à nous de différentes étoiles. Selon lui, les étoiles blanches (*Sirius*, *Wéga*) ont une lumière qui, analysée, accuse nettement la flamme de l'hydrogène et très peu nettement les autres substances qu'on remarque si bien dans la lumière de notre soleil. Les étoiles jaunes (la *Chèvre*, *Altaïr*, le *Soleil*) forment un deuxième groupe, caractérisé par les raies que l'on voit ordinairement dans la lumière du soleil. Enfin, les étoiles rouges (*Arcturus*, *Aldébaran*) présentent dans leur lumière plus de raies que notre soleil, montrant ainsi un état de la matière dans lequel les combinaisons chimiques sont plus avancées ; en sorte qu'il y a entre ces trois groupes une différence, sur la nature de laquelle on ne saurait encore se prononcer, mais qui suggère naturellement l'idée d'une différence d'âge. Ce genre d'étude de la lumière n'est encore qu'à son début, et la solution définitive du problème est réservée aux siècles futurs.

**ACHROMATISME.** — La lumière blanche, en traversant les lentilles, donne lieu à une conséquence fâcheuse. La distance focale dépend, avons-nous dit, de l'indice de réfraction de la substance dont elle est formée ; mais cet indice varie suivant la couleur. Ainsi le foyer des rayons violets doit se faire plus près de la lentille que le foyer des rayons rouges, puisque leur réfrangibilité est plus grande. Une lentille biconvexe tend donc à donner sept images diversement colorées de l'objet qu'on regarde à travers ; elles se superposent en partie ; les sept couleurs se recombinaient dans la partie centrale ; mais, sur les bords, cette superposition n'est pas complète : les images extrêmes du spectre, surtout le rouge et le bleu, débordent sur les autres et donnent lieu à des contours irisés ou colorés, ce qui est intolérable dans les instruments d'optique. Cette coloration fâcheuse est connue sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*. Pendant longtemps, on crut ce défaut impossible à corriger, et Newton lui-même ; car il avait affirmé que la lumière ne pouvait être divisée sans se décomposer, et que la dispersion était proportionnelle à la réfraction. Sans reconnaître l'erreur de Newton, le physicien Hall, vers 1733, construisit des lunettes dans lesquelles l'inconvénient d'aberration de réfrangibilité avait disparu mais il ne publia pas sa découverte. Ce fut seulement en 1757, qu'un opticien de Londres, Dollond, démontra qu'en juxtaposant deux lentilles, l'une biconvexe de crown-glass, l'autre biconcave de flint-glass, on obtenait une lentille parfaitement *achromatique* (de deux mots grecs signifiant *sans couleur*). En effet, en combinant convenablement les courbures de ces deux lentilles, elles deviennent également dispersives et en sens inverse, puisque l'une est divergente et l'autre convergente ; il en

résulte deux effets qui se compensent quant à la coloration, mais non quant à la réfraction ; le rayon de lumière blanche qui traverse la lentille en sort sans coloration, mais encore convergent, et va former sur l'axe un foyer unique.

#### ABSORPTION DE LA LUMIÈRE PAR LES MILIEUX TRANSPARENTS. —

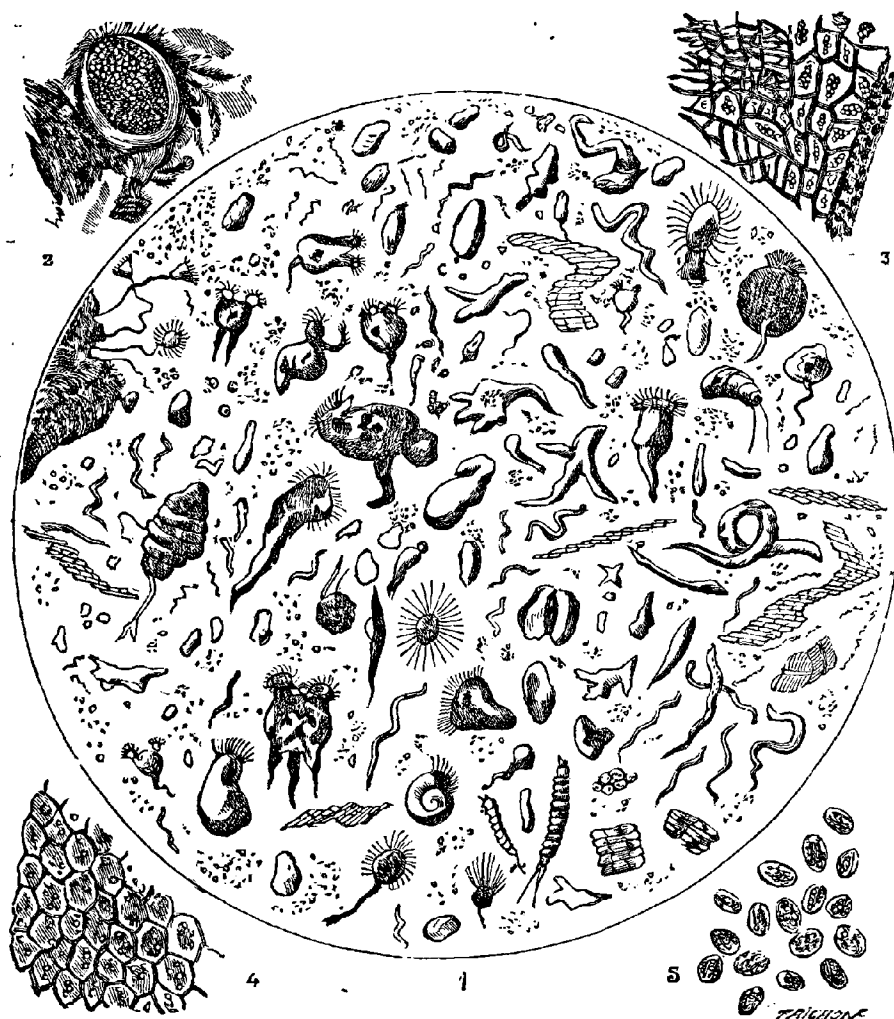
Aucune substance n'est absolument transparente, puisque le verre, l'eau, l'air même éteignent peu à peu la lumière qui les traverse, et finissent, s'ils sont en épaisseur suffisante, par empêcher l'action qu'elle produit sur notre rétine. On n'ignore pas que l'épaisseur de l'atmosphère empêche la lumière de certaines étoiles d'arriver jusqu'à nous. Cette annihilation de la lumière porte le nom d'*absorption*. On lui donne pour cause la réflexion que la lumière subit sur les différentes molécules de la substance transparente. De même, les substances diaphanes ne laissent pas passer également tous les rayons constituant la lumière blanche ; s'il en était ainsi, elles seraient toutes incolores, ce qui n'est pas. C'est pourquoi l'air nous semble d'azur, l'eau verte, quand on les regarde en grandes épaisseurs. Ce fait donne encore lieu au phénomène connu sous le nom de *dichroïsme* (du grec *dicroos*, de deux couleurs), que présentent certains corps, qui offrent des couleurs très différentes selon qu'on les regarde sous une épaisseur plus ou moins grande. Ainsi une dissolution de perchlorure de chaux est verte sous une faible épaisseur, et d'une teinte d'un brun rouge sous une épaisseur plus grande ; la teinture de tournesol est bleue sous une épaisseur un peu forte et rouge violacé en lames minces. Ces substances s'appellent *polychroïques*. C'est encore par un effet de l'*absorption* que les rayons du soleil sont moins intenses lorsque cet astre est à l'horizon que lorsqu'il est au zénith.

## CHAPITRE V

### VISION

**STRUCTURE DE L'ŒIL HUMAIN.** — L'*œil*, et plus particulièrement le *globe oculaire*, est l'organe de la *vision*, c'est-à-dire de ce phénomène en vertu duquel la lumière, émise ou réfléchiée par les corps, produit en nous la sensation qui nous révèle leur existence. Ce globe est formé par des

enveloppes membraneuses et par des humeurs transparentes renfermées dans ces enveloppes, qui concourent à en faire un instrument d'optique des plus parfaits.



APPLICATIONS DU MICROSCOPE (page 468).

1. Goutte d'eau (250 D). — 2. Œil de mouche. — 3. Fragment d'hépatique.  
— 4. Fragment d'une fleur de giroflée. — 5. Grains de pollen.

L'enveloppe la plus extérieure et la plus résistante de l'œil (*fig. 193*), occupant environ les quatre cinquièmes du globe, se nomme *sclérotique*; c'est sur elle que s'attachent les muscles qui meuvent le globe de l'œil :

la partie antérieure est appelée vulgairement le blanc de l'œil ; la partie postérieure est opaque. Sur la partie antérieure de la sclérotique s'en-chaîne, par un biseau de sa face externe, une petite membrane circulaire transparente, ressemblant à de la corne, appelée *cornée transparente*, et représentant un segment de sphère plus petite surajoutée à une plus grande. Cette membrane est d'une couleur différente pour chaque individu ; mais cette coloration ne lui est point propre : c'est celle de l'*iris*, que sa transparence nous permet de voir. La *choroïde* est placée à la

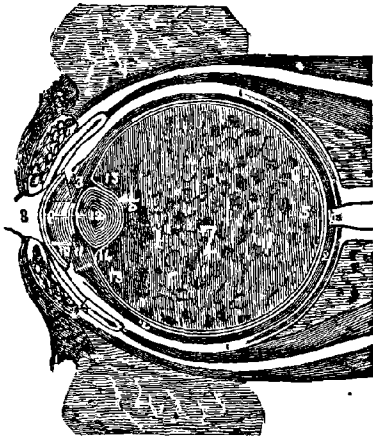


Fig. 193.

## STRUCTURE DE L'ŒIL HUMAIN.

1. Sclérotique. — 2. Choroïde. — 3. Ligament ciliaire continuant la choroïde en avant. — 4. Procès ciliaires continuant la choroïde en arrière. — 5. Rétine. — 6. Membrane hyaloïde. — 7. Corps vitré. — 8. Cornée. — 9. Iris. — 10. Chambre antérieure. — 11. Chambre postérieure. — 12. Cristallin. — 13. Division de la membrane hyaloïde en deux lames qui enveloppent le cristallin. — 14. Capsule cristalline. — 15. Nerf optique.

partie interne de la sclérotique et la tapisse en noir à l'aide d'un enduit ou *pigmentum*, qui manque dans plusieurs espèces d'animaux, mais qui est nécessaire chez l'homme pour absorber la lumière. La partie antérieure de cette membrane se prolonge sous la forme d'un voile mobile, appelé *iris*, placé derrière la cornée transparente, et percé par une ouverture, la *pupille* ou *prunelle*, susceptible d'agrandissement ou de diminution, selon le plus ou moins d'intensité des rayons lumineux. Les corps réfringents, après la cornée, sont : 1° le *corps vitré*, masse molle, transparente comme de la gelée, qui remplit les trois quarts postérieurs de l'œil, offrant antérieurement une dépression lenticulaire, et partagé en une multitude de cellules par une membrane, qui se subdivise en deux lames pour embrasser le cristallin ; 2° le *cristallin*, lentille formée de

couches concentriques, logé dans une dépression du corps vitré, plus dense au centre, plus convexe en arrière et renfermé dans une capsule propre, transparente, appelée *capsule cristalline* ; 3° l'*humour aqueuse*, qui occupe deux espaces séparés par l'iris et désignés sous les noms de *chambres antérieure* et *postérieure*, celle-ci moins grande que l'autre. Entre l'iris et la choroïde est le *corps ciliaire*, espèce d'anneau grisâtre qui entoure le cristallin et résulte de la réunion des *procès ciliaires*, c'est-à-dire des replis saillants de la choroïde, placés les uns à côté des autres, au nombre de 60 à 80, logés dans les enfoncements de la partie antérieure du corps vitré et formant des rayons convergents derrière



l'iris. Entre les membranes d'enveloppe et les parties réfringentes de l'œil, entre l'enduit noir de la choroïde et le corps vitré, s'étale la *rétilne*, membrane médullaire nerveuse, qui présente chez l'homme et chez le singe seulement, au niveau de l'axe oculaire, une *tache jaune* avec un pertuis à son centre. En dedans de cette tache se trouve la communication de la rétine avec le *nerf optique*, à travers la choroïde et par plusieurs ouvertures de la membrane.

**MÉCANISME DE LA VISION.** — La forme et la densité des parties réfringentes de l'œil, ainsi que les mouvements du diaphragme oculaire, s'accommodent parfaitement aux propriétés et aux lois de la lumière.

En effet, les rayons lumineux partis de chaque point d'un objet éclairé forment des cônes, dont le sommet correspond au point que l'on regarde, et dont la base est appliquée à la partie antérieure de la cornée. Ils traversent cette membrane transparente, et vont, en convergeant à travers les humeurs de l'œil, se réunir en un point quelconque de la rétine, pour y peindre les objets dont ils sont émanés et y produire une impression qui est transmise au cerveau par le nerf optique.

Examinons la manière dont se comporte celui de ces cônes qui serait supposé procéder de la partie centrale de l'objet et dont l'axe se confondrait avec celui de l'œil. Cet axe, perpendiculaire à la cornée, ne se réfracte pas; ce même mode d'incidence sur les autres milieux de l'œil l'empêche d'éprouver de leur part aucune déviation; il parvient donc sur la rétine au point opposé à celui de son entrée dans l'œil. Mais les rayons latéraux de ce cône subissent une réfraction, en raison de leur incidence oblique sur la cornée et de la différence qui existe entre la densité de cette membrane et celle de l'air atmosphérique; ils se réfractent donc fortement en se rapprochant de la perpendiculaire. L'humeur aqueuse, moins dense que la cornée, diminue un peu la déviation qui avait été imprimée par cette membrane. Au delà, nouvelle réfraction convergente très forte, opérée par le cristallin. Les rayons latéraux, rapprochés de leur perpendiculaire, éprouvent peu de changement en traversant l'humeur vitrée, dont la force réfringente est un peu plus faible. On appelle *cône objectif* celui dont le sommet est à l'objet et la base à la cornée, et *cône oculaire* celui dont la base correspond à celle du premier et dont le sommet est à la rétine.

Plus habilement composé que les instruments d'optique, le cristallin empêche par sa structure l'*aberration de sphéricité* (page 422). La moindre consistance de cette lentille à la circonférence diminue l'excès de con-

vergence qui devait dépendre de la plus grande obliquité des rayons excentriques ; de telle sorte que ces rayons peuvent confondre leur foyer avec ceux qui tombent plus près du centre. Cette inégale densité des couches du cristallin, en neutralisant les effets de la plus ou moins grande obliquité des rayons est, sans doute, ce qui empêche la décomposition de la lumière, c'est-à-dire l'*aberration de réfrangibilité* (page 447). L'achromatisme oculaire peut dépendre encore de l'interposition du cristallin entre deux humeurs moins réfringentes que lui, l'inverse produisant le même effet que dans les lunettes achromatiques. L'inégale réfrangibilité des rayons lumineux qui traversent la cornée, sans passer par la pupille, contribue aussi aux couleurs de l'iris. Cette membrane, séparée de l'œil, paraît transparente dans toute son étendue ; c'est qu'alors on la voit à l'aide de la lumière simplement réfléchie, tandis que, au milieu des humeurs de l'œil, elle nous apparaît à l'aide de rayons lumineux réfractés avant et après leur réflexion sur cette membrane.

Les autres cônes lumineux ont également chacun une perpendiculaire à la tangente d'un point de la cornée, du cristallin et du corps vitré. Ces perpendiculaires ne doivent éprouver aucun changement de direction pendant leur trajet dans le globe de l'œil. Enfin les filets de lumière, qui ont une origine commune avec chaque perpendiculaire latérale, doivent se réunir avec elles sur tel ou tel autre point de la rétine. Les perpendiculaires des cônes lumineux s'entre-croisent donc, en formant dans le centre optique du cristallin deux angles opposés par le sommet ; l'angle intérieur, qui se prolonge jusqu'à l'objet, s'appelle *angle visuel*.

Ainsi les images des objets se peindraient renversées. Mais les lois physiques s'arrêtent à la rétine ; là commence l'empire des lois vitales, et nous voyons les objets dans leur rectitude, parce que nous rapportons les impressions aux points d'où procèdent les rayons lumineux. S'il n'en était pas ainsi, si le toucher avait dû rectifier d'abord la sensation, les animaux verraient les corps renversés, et nous accorderions une direction droite aux images que les expériences de physique nous montrent en sens inverse dans la chambre obscure. On peut opposer de semblables raisons à l'opinion qui consisterait à admettre que les objets ont dû paraître doubles dans le premier âge, et antérieurement à l'expérience acquise par le toucher. Ainsi les animaux, qui n'ont qu'un toucher imparfait, voient les objets simples, et notre esprit ne rectifie pas l'erreur de nos sens, quand le défaut d'harmonie dans l'activité nerveuse ou la disposition des milieux réfringents nous fait apercevoir les objets doubles.

**VISION DISTINCTE. — ROLE DES DEUX YEUX DANS LA VISION. — STÉRÉOSCOPE.** — N'est-ce pas encore pour recevoir simultanément l'impression des deux côtés que les yeux convergent, et que les pupilles se contractent en même temps et au même degré? Ainsi, dans l'état ordinaire, les deux impressions se confondent dans une sensation commune. Si la duplicité de l'image apparaît ordinairement quand la vision s'exerce d'une manière passive, c'est que les organes de cette fonction ont, chez beaucoup de sujets, une force inégale, de telle sorte qu'alors les deux yeux rapportent, chacun isolément, une impression faible, tandis que l'un d'eux agit presque exclusivement, si l'objet excite notre attention. On dira que si l'action isolée d'un œil, et sans doute de l'un et de l'autre alternativement, n'était pas nécessaire à l'exactitude de la fonction, on n'aurait pas le soin de fermer un œil pour atteindre plus sûrement le but avec une arme à feu. Mais, à cette objection, on peut opposer que nous parvenons aisément à traverser une ouverture étroite avec le secours des deux yeux, tandis que nous éprouvons beaucoup de difficulté si nous employons un œil seulement. Lorsque l'inégalité de force des deux yeux est peu prononcée, l'emploi simultané de l'œil plus faible aide à la sensation de l'autre œil et la fortifie. Si la disproportion est plus grande, l'œil plus faible se détourne et devient nul pour la vision. Alors a lieu le *strabisme* (du grec *strabismos*, difformité de celui qui *louche*), qui tient encore à la faiblesse d'un muscle droit latéral, à une déviation du cristallin ou à une différence dans la force des deux moitiés de la rétine.

Wheastone a prouvé, par de nombreuses expériences, une différence essentielle entre la vision avec les deux yeux et la vision avec un œil. Avec la première, nous pouvons obtenir une perception exacte du relief des corps, c'est-à-dire les voir avec leurs trois dimensions, tandis que ce sont exclusivement les objets que nous connaissons bien, c'est seulement par une sorte de raisonnement qu'avec un seul œil nous pouvons sentir ce relief. En effet, dans la vision bioculaire, lorsque l'objet est placé à une petite distance, comme les deux yeux convergent, il en résulte que la perspective varie pour chacun d'eux, que les deux images sont sensiblement inégales, ce dont il est facile de s'assurer en regardant alternativement un même objet avec chaque œil ; de la simultanéité de ces deux images résulte la perception du relief, comme le démontre l'appareil connu sous le nom de *stéréoscope*.

Euclide et Galien, rapporte M. Figuiet, connaissaient déjà ce fait, que l'accouplement de deux images dissemblables reçues dans les deux yeux donne la sensation du relief. Porta, Gassendi, et plus récemment

Harris, le docteur Smith, de Haldat, avaient conçu l'idée d'un instrument produisant l'effet du relief en faisant coïncider deux images à peu près semblables par leur mutuelle réflexion sur des miroirs plans convenablement placés. En 1838, Wheastone exécuta cet instrument et lui donna le nom de *stéréoscope* (du grec *stereos*, solide, et *scopeo*, voir); mais bientôt il fut oublié. Vers 1850, le physicien écossais David Brewster, qui avait construit un nouveau stéréoscope, vint à Paris et fut mis en rapports,

par le savant abbé Moigno, avec un habile opticien, Jules Dubosq, qui se chargea de construire le nouvel instrument. Le succès fut alors assuré, et le stéréoscope devint aussitôt populaire.

Cet appareil se compose (fig. 194) d'une boîte, partagée en deux portions par une cloison; au fond de chacune d'elles sont deux dessins représentant un objet vu de l'œil gauche et ce même objet vu de l'œil droit, placés le premier en C,

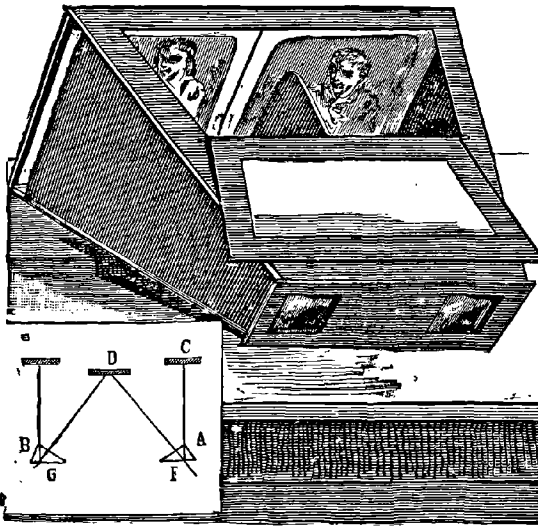


Fig. 194. — STÉRÉOSCOPE.

le second en E. Deux prismes F et G dévient les rayons venus des deux dessins, et les dirigent vers les yeux placés en H et en I, qui voient ces dessins comme s'ils étaient superposés en D. Tout se passe donc comme si l'objet réel, se trouvant en D, chaque œil le voyait comme il le doit voir, les deux axes optiques HD, ID, ayant entre eux l'écartement qu'ils doivent posséder naturellement. Un couvercle à charnière, étamé en dedans, placé sur la face supérieure de l'appareil, et que l'on ouvre plus ou moins, réfléchit la lumière du jour. Pour rendre la vision nette, il faut faire naître les images à la distance de la vision distincte; on y parvient en plaçant une lentille devant chaque prisme, ou, plus simplement, en courbant les faces des prismes pour leur faire produire l'effet des lentilles.

**VISION DISTINCTE. — MYOPIE. — PRESBYTISME.** — On appelle *distance de la vision distincte* la distance à laquelle doivent être placés les objets pour être perçus le plus clairement possible. Le *point visuel*, c'est-à-dire

le point exact de cette vision distincte, n'est pas le même pour tous ; ordinairement pourtant, quand il s'agit de petits objets, de caractères d'imprimerie, par exemple, il est de 0<sup>m</sup>,25 à 0<sup>m</sup>,30 de l'œil. Les humeurs de cet organe sont-elles plus abondantes, les surfaces convexes plus fortement exprimées ; on ne peut apercevoir d'une manière distincte que les objets rapprochés. Les yeux présentent-ils une disposition inverse ; la vue peut atteindre les corps les plus éloignés, et discerne plus difficilement ceux qui sont à une plus petite distance. Dans le premier cas, il y a *myopie* (du grec *muops*, qui cligne les yeux), et dans le second, *presbytie* (du grec *presbytès*, vieillard, parce que les vieillards ont généralement ce genre de vue) ; les forces réfringentes sont augmentées dans l'un, elles sont diminuées dans l'autre. Pour la myopie, on emploie des verres concaves qui retardent la réunion des rayons lumineux ; pour la presbytie, on a recours aux verres convexes qui hâtent le rassemblement de ces rayons. Depuis quelques années, on se sert, pour les lunettes des myopes et des presbytes, de verres dont l'usage a été importé d'Angleterre en France par Biot, et qui sont connus sous le nom de verres *périscopiques* (de deux mots grecs : *peri*, autour, *scopeo*, voir) ; ces verres, qui sont concaves-convexes, permettent la vision dans tous les sens et ne fatiguent pas la vue. La myopie est plus fréquente chez les jeunes gens ; la presbytie s'observe plutôt chez les vieillards, et serait plus fréquente si l'augmentation de densité du cristallin ne compensait alors les effets qui doivent résulter de la diminution des humeurs de l'œil et de la moindre convexité de la cornée. Mais ces défauts de la vision ne dépendent pas seulement de la disposition des parties réfringentes de l'œil ; ils doivent encore être attribués quelquefois aux divers degrés d'énergie de la rétine. En effet, l'intensité de la lumière s'affaiblit en raison de la distance ; dès lors, cet affaiblissement doit être plus ou moins sensible pour tel ou tel individu.

En deçà et au delà du point de la *vision distincte* sont des limites entre lesquelles la vue peut s'exercer. Suivant quel mécanisme l'œil s'accommode-t-il à des distances variées ? Les uns invoquent le jeu des *procès ciliaires*, qui rapprocheraient ou éloigneraient le cristallin de la pupille. D'autres admettent que la contraction des muscles allonge le globe de l'œil et augmente la courbure de la cornée pour les objets éloignés ; le relâchement de ces muscles amènerait une disposition inverse de l'organe pour les objets rapprochés. Le jeu de l'iris rendrait peut-être plus aisément raison de cette aptitude de la vision. Les objets sont-ils rapprochés ou très grands ; la pupille se resserre pour n'admettre que les rayons les moins obliques et les moins susceptibles d'une forte réfraction. La

distance est-elle plus grande, ou les dimensions plus petites ; cette ouverture s'agrandit pour laisser parvenir au cristallin les rayons les plus divergents. Ainsi se trouverait réduit ou élargi, autant que possible, l'angle visuel.

**POINT AVEUGLE. — PERSISTANCE-DES IMPRESSIONS SUR LA RÉTINE.**

— **IMAGES ACCIDENTELLES.** — Le nerf optique n'est pas sensible à la lumière ; il est incapable de percevoir la moindre sensation lumineuse sans le concours de la rétine ; aussi ce point de la rétine où il sort de l'œil pour pénétrer dans le cerveau, point insensible, a-t-il reçu le nom de *point aveugle*. On peut se convaincre de l'existence de ce point par l'expérience suivante : Placez sur une table une feuille de papier blanc et sur cette feuille deux pains à cacheter, écartés l'un de l'autre d'environ 0<sup>m</sup>,10. Regardez ensuite ces pains à cacheter bien en face, en plaçant votre figure à environ 0<sup>m</sup>,30 de la table, et de sorte que l'œil droit soit vis-à-vis le pain à cacheter de droite, et l'œil gauche vis-à-vis de l'autre. Si, dans cette position, et sans bouger la tête, vous fermez l'œil gauche et qu'avec l'œil droit vous regardiez le pain à cacheter de gauche, celui de droite disparaîtra de votre vue. Si, au contraire, vous fermez l'œil droit, et que, la tête restant toujours immobile, vous regardiez avec l'œil gauche le pain à cacheter de droite, vous n'apercevrez plus celui de gauche.

Cette singulière expérience fut faite, pour la première fois, par Mariotte, à la cour du roi d'Angleterre Charles II. Celui-ci et ses courtisans s'amusaient beaucoup, sous la direction du savant, à s'entre-regarder en fermant un œil, et, en se plaçant à une distance convenable, à se voir sans tête. Cette plaisanterie ne laissait pas que d'être lugubre à la cour d'un roi dont le père avait eu la tête tranchée.

Pour expliquer l'action de la lumière sur l'organe visuel, Thomas Yung, puis M. Helmholtz, ont admis que chaque élément sensible de la rétine est uni à plusieurs fibrilles nerveuses, dont chacune est spécialement mise en activité par telle ou telle couleur. Il y aurait des fibres sensibles au bleu, au violet, au rouge, etc. Si toutes les fibres sont excitées, on a la sensation du blanc ; s'il n'y a que du rouge, on n'éprouve que la sensation du rouge. Cette hypothèse est rationnelle : il y a certainement dans la rétine des éléments uniquement sensibles au rouge, tandis que les bords les plus extérieurs sont absolument insensibles à cette couleur. Prenez un bâton de cire à cacheter rouge, regardez devant vous et portez votre cire littéralement en arrière du champ visuel, le bâton n'apparaîtra plus rouge, mais noir ; tandis qu'avec le bleu, le même effet n'a plus lieu :

le bâton paraît toujours bleu. Cette cécité pour le rouge, qui, dans un œil normal, se présente seulement au bord de la rétine, s'étend quelquefois à tout l'organe. Le poète Colardeau et le célèbre chimiste Dalton ne



WILLIAM HERSCHEL

distinguaient pas le rouge, d'où le nom de *daltonisme* donné à cette affection ; ils confondaient cette couleur avec le vert foncé ou avec le jaune.

Les impressions sur la rétine ne sont pas aussi fugitives que l'on

pourrait le croire. Lorsque, dans l'obscurité, on agite vivement un charbon allumé, ce n'est pas un point lumineux que l'on aperçoit, mais une ligne de feu ; les sensations produites sur la rétine par le point éclairant, dans les diverses positions qu'il occupe successivement, persistent assez longtemps pour qu'elles semblent venir à la fois de toutes

ces positions. L'impression des couleurs persiste aussi bien que la forme des corps : les couleurs se confondent et donnent la sensation qui résulterait de leur mélange. Ainsi, en faisant tourner le *disque de Newton* (page 437), on perçoit de la lumière blanche ; si les secteurs étaient seulement jaunes et bleus, on verrait un cercle vert ; s'ils étaient rouges et jaunes, on verrait un cercle orange.

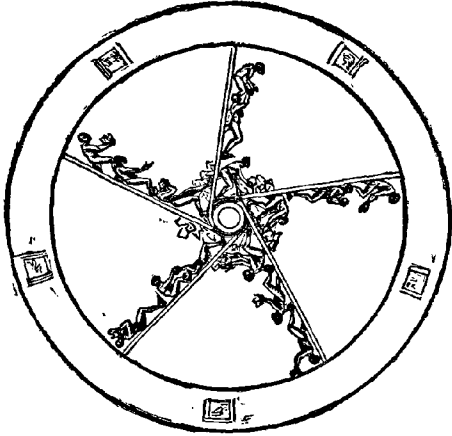


Fig. 195. — PHÉNAKISTICOPE.

pour produire ces illusions, causées par ce principe de la persistance des impressions perçues par la rétine. Dans le *phénakistiscope* (du grec, *qui trompe l'œil*), inventé par un physicien belge, M. Plateau, des objets ou des êtres sont représentés, également espacés sur une bande de papier, dans les positions successives qu'ils occupent lorsqu'ils exécutent certains mouvements (fig. 195). En faisant tourner le disque sur son axe et en le regardant dans une glace à travers des trous percés au-dessus de chaque séparation, on voit chacune des figures se mouvoir et accomplir l'action tout entière. Le *fantascope* et le *zootrope* sont des variétés de cet appareil. Le *taumatrope* est aussi basé sur le même principe. C'est un petit carton long d'environ 0<sup>m</sup>,06 et large de 0<sup>m</sup>,03 (fig. 196), sur l'une des faces duquel on dessine, par exemple, un petit oiseau, et sur l'autre une cage. Un fil est fixé au milieu de chaque petit côté du carton. Si l'on prend, entre le pouce et l'index de chaque main, les extrémités libres des fils et que l'on fasse rouler ces fils entre les doigts, le carton tournera

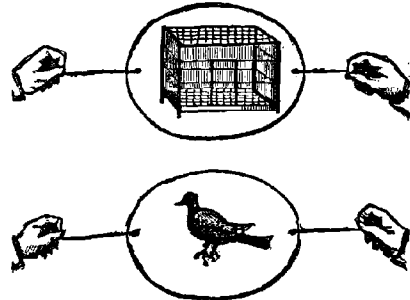


Fig. 196. — TAUMATROPE.



sur lui-même en présentant successivement, mais rapidement, ses deux faces, et l'oiseau semblera être placé dans la cage.

Non seulement les images qui se forment au fond de l'œil, comme sur la plaque sensible de la chambre noire des photographes, y persistent pendant un certain temps ; mais encore on est parvenu, en quelque sorte, à les y fixer.

A la fin de l'année 1876, un physiologiste allemand, M. Boll, communiqua à l'Académie des sciences une découverte fort belle : il montra que la rétine de tous les animaux est rouge pourpre après un séjour dans l'obscurité, et incolore lorsqu'on a tenu les animaux à la lumière pendant un temps suffisamment long. Lorsque l'image d'un objet se forme sur la rétine, les points les plus vivement frappés par la lumière doivent donc se décolorer, tandis que les points où se projettent les ombres deviennent rouges ; en même temps que le cerveau perçoit une sensation, il se produit donc une véritable *impression* au fond de l'œil.

Voici comment M. Khün, professeur à Heidelberg, est parvenu, après de nombreux essais, à fixer ces impressions qui s'effacent bien vite sous l'action de la vie. Il trancha la tête à un lapin tenu quelque temps dans un endroit obscur. Il l'exposa pendant dix minutes dans le laboratoire, les yeux tournés vers un châssis vitré. Il extirpa ensuite les yeux, et, après avoir fait séjourner les rétines dans de l'eau mélangée d'alun pendant vingt-quatre heures, on distingua deux images très nettes. L'encadrement des châssis, les planches disposées au-dessus des vitres, l'image d'une seconde fenêtre qu'on n'avait pas prévue, tout était reproduit avec une grande fidélité.

Récemment, on a exécuté à Vienne (Autriche) un condamné à mort. MM. Exner et Fleischel ont pu retrouver sur l'œil du pendu l'image des fenêtres d'une maison devant laquelle avait eu lieu l'exécution. Ainsi, le fait est indiscutable ; il est désormais acquis à la science que les derniers objets qui frappent l'œil d'un animal mourant se retrouvent photographiés sur la rétine. Assurément, ce n'est pas encore l'œil humain de la victime dénonçant son meurtrier. Il faudrait pour cela que les paupières se fussent fermées immédiatement après le crime et empêcher la lumière de détruire l'image de l'assassin. Néanmoins, qui dira les surprises que l'avenir peut nous réserver sur cet objet ?

Ce fait explique ces singulières apparitions constatées par certaines personnes qui, venant de regarder un objet, le voient encore lorsqu'elles ferment les yeux. Ces *images accidentelles* peuvent même, dans certains cas, persister assez longtemps. C'est ainsi que, après chaque éclipse de soleil, les oculistes ont à traiter des personnes affectées de *scotome central*

de la rétine : c'est une persistance, parfois incurable, de l'image faite par le soleil au fond de l'œil. Citons un autre fait relatif à la longue persistance d'une image sur la rétine : « Dans la nuit du 24 au 25 décembre 1872, rapporte le savant docteur italien Paolo Gorini, après m'être endormi vers 3 heures, lisant, à la page 148, l'*Histoire ancienne d'Italie*, par Otto Venucci, et avoir eu conscience d'un somme d'environ une heure, je vis, en me réveillant, la muraille qui était en face de moi, éclairée par ma veilleuse, couverte de caractères d'imprimerie de grande dimension, formant des mots régulièrement disposés et séparés par des lignes, comme dans le livre que je lisais en m'endormant. Non seulement j'en revoyais le texte, mais je distinguais aussi des annotations en caractères plus petits. Tout cela avait une apparence vague et indéterminée, mais je ne pus douter que ce que je voyais sur la muraille ne fût l'image laissée sur ma rétine par la page lue au moment de l'invasion du sommeil. Cette étrange apparition persista une vingtaine de secondes, et, dans cet espace de temps, elle se reproduisit chaque fois qu'après les avoir fermés je rouvris les yeux. »

**IMAGES CONSÉCUTIVES. — CONTRASTE DES COULEURS.** — Après avoir regardé sans remuer les yeux pendant une demi-minute, peut-être une minute, un ciel très clair, à travers une croisée, de façon que la croisée se peigne en un endroit précis de la rétine, si on porte rapidement le regard sur une feuille de papier blanc ou sur un mur blanc, on voit se dessiner très nettement sur le papier ou sur le mur une fenêtre foncée avec une fenêtre claire. Les parties claires de l'image réelle apparaissent foncées ; les parties sombres, claires. On appelle ces apparitions *images consécutives*. Elles sont *négatives*, si les ombres sont renversées, *positives*, si l'image est la reproduction exacte de l'objet. Les images négatives se sont imprimées sur la rétine et y ont déterminé aux points de contact un certain épuisement ; au moment où la vue se porte sur du blanc, les endroits fatigués seront naturellement moins excités ; aussi, dans l'image persistante, les surfaces claires apparaissent foncées, et réciproquement. Couvrez encore la moitié supérieure d'une feuille de papier blanc avec une feuille noire, et regardez avec fixité un point de la moitié blanche, voisin de la ligne de séparation. Si vous enlevez au bout de quelques secondes la feuille noire, bien que vous n'avez plus devant vous qu'une feuille blanche, le papier semblera encore séparé en deux morceaux ; seulement, cette fois, ce sera la partie supérieure qui paraîtra blanche, tandis que la partie inférieure prendra une teinte foncée.

Les couleurs produisent aussi des *images consécutives*. Si l'œil voit

du vert un peu trop longtemps, il cessera d'être impressionnable au vert, et, s'il se fixe ensuite sur du blanc, il sera sensible à toutes les couleurs qui composent le blanc, sauf le vert, c'est-à-dire qu'il verra rouge. En général, quand on regarde longtemps une image d'une couleur et qu'on cesse de la voir, fermerait-on même les yeux, cette image reparait avec une couleur *complémentaire* de celle qu'elle avait réellement. Deux couleurs placées à côté l'une de l'autre exercent aussi sur la vision une influence qui modifie sensiblement leur aspect; ainsi une bande rouge et une bande jaune étant juxtaposées, la première paraît violacée et la seconde verdâtre. Nos grands peintres, et en particulier Eugène Delacroix, en usant habilement dans leurs tableaux de ce *contraste simultané* des couleurs, sont arrivés à produire des impressions très exactes dans l'ensemble, tout en donnant aux diverses parties juxtaposées dans leurs tableaux des tons faux pris isolément.

M. Chevreul, le savant chimiste et le doyen de l'Académie des sciences, donnait en 1876 à ses collègues une note intéressante sur un phénomène d'insolation de l'œil inexpliqué jusqu'ici.

On raconte qu'en 1572, quelque temps avant la Saint-Barthélemy, le prince Henri de Navarre, le duc de Guise et le duc d'Alençon jouaient ensemble aux dés dans une salle du Louvre. Or, il arriva que deux jours de suite, pendant qu'ils étaient au plus fort de leur jeu, ils virent tout à coup apparaître sur leurs dés des taches sanglantes. Effrayés d'un tel phénomène, ils cessèrent chaque fois leur partie et se refusèrent à la reprendre les jours suivants. Les massacres de la Saint-Barthélemy ayant eu lieu peu de temps après, les joueurs virent, dans le phénomène qui les avait épouvantés, un présage et un avertissement du ciel. Henri IV, vingt-six ans plus tard, n'en parlait qu'avec stupeur. D'autres faits du même genre furent signalés, sans qu'on en eût donné une explication satisfaisante.

M. Chevreul, qui a désigné ces phénomènes de vision du nom de *contraste successif des couleurs*, les explique en disant que les fibrilles du rouge avaient été épuisées par l'insolation et subi la loi du contraste des couleurs; le soleil avait filtré par les fenêtres du Louvre et agi sur les yeux des joueurs: les points noirs apparurent rouges, et on les prit pour des taches de sang.

A l'appui de cette opinion, le savant physicien fait l'expérience suivante:

Il se place de telle sorte que son œil droit reçoive les rayons du soleil sous un angle de 20 à 25 degrés, l'œil gauche restant fermé. Devant lui, sur une table recouverte de papier gris, sont placées, à côté

l'une de l'autre, deux plumes, l'une blanche, l'autre noire. Après deux minutes d'insolation, il regarde ces deux plumes de l'œil droit seul ; la plume noire lui paraît rouge et la plume blanche, vert émeraude. Si ensuite il ferme l'œil droit et qu'il regarde avec l'œil gauche, il voit les deux plumes avec leur véritable couleur.

## CHAPITRE VI

### INSTRUMENTS D'OPTIQUE

**INSTRUMENTS D'OPTIQUE.** — On appelle de ce nom des instruments composés de lentilles, ou de lentilles combinées avec des miroirs, et qui, selon l'usage auquel ils sont destinés, peuvent se diviser en trois groupes : 1° les instruments de grossissement, qui servent à agrandir les images des corps qu'il serait difficile d'examiner à l'œil nu ; ce sont les *microscopes* ; 2° ceux de rapprochement, qui ont pour objet de rapprocher les corps éloignés, comme les astres ; ce sont les *télescopes* ou les *lunettes astronomiques*, ou les *longues-vues* ; 3° ceux de projection, que l'on emploie pour produire sur un écran des images réduites ou amplifiées, soit afin de les dessiner, soit afin de les montrer à un grand nombre d'observateurs : ce sont la *chambre claire* ou *noire*, le *daguerréotype*, la *photographie*, le *mégascope*, le *microscope solaire* ou *photo-électrique*. Ceux des deux premiers groupes ne donnent que des images virtuelles ; ceux du dernier, excepté la chambre claire, donnent des images réelles.

**INSTRUMENTS DE GROSSISSEMENT.** — Il y a deux espèces de microscopes : le *microscope simple* et le *microscope composé*. Le microscope simple, connu généralement sous le nom de *loupe*, n'est rien autre chose qu'une lentille biconvexe, d'un très court foyer. Il fut inventé seulement au commencement du xvii<sup>e</sup> siècle, par Zacharie Jansen, ou par Drebbel, ou par Fontana, et l'on a lieu de s'étonner de ce qu'il n'avait pas été trouvé plus tôt, puisque, comme nous l'avons dit en parlant des lentilles, l'antiquité n'ignorait pas le pouvoir grossissant des verres à faces courbes, et que, dès le xiii<sup>e</sup> siècle, Roger Bacon, ou le Florentin Salvino

degli Armati, avait imaginé les *besicles*, lunettes dont se servaient les ouvriers de certaines professions, tels que les horlogers, les graveurs, etc., et les vieillards. Quoi qu'il en soit, on se servit primitivement de simples globules de verre légèrement aplatis, à foyer très court, qu'il fallait, par conséquent, approcher très près des petits objets pour les voir grossis. L'homme aurait pu se passer de cet intermédiaire, si son œil était organisé de façon à pouvoir être mis presque en contact avec l'objet à distinguer; mais, comme la vision distincte ne s'exerce qu'à une certaine distance de l'objet, l'artifice en question, qui rapproche de l'œil, non pas l'objet lui-même, mais, ce qui revient au même, son image, remédie au défaut de notre organisation.

On trouve le pouvoir amplifiant du *microscope simple*, si l'on divise  $0^m,25$  ou  $0^m,30$  (distance de la vue distincte), par la distance focale de la lentille. Mais il y a des limites à ce pouvoir amplifiant : quels que soient la puissance de réfraction de la lentille et son degré de courbure, le microscope simple ne peut amplifier des objets au delà de cinquante fois leur diamètre.

Dans le principe, on tenait la *loupe* à la main, ce qui était fort incommodé; aujourd'hui, on l'assujettit à une tige munie d'un *porte-objet*, qui peut se fixer à différentes hauteurs sur cette tige, à l'aide d'une vis et d'un miroir pour concentrer la lumière. Comme il est gênant de se servir de très petites lentilles, on emploie souvent des sphères en verre, coupées par le milieu, puis ressoudées après que l'on a interposé entre les deux moitiés une lame de métal percée d'un trou (*loupe diaphragmée de Wollaston*), ou bien creusées suivant un de leurs grands cercles (*loupe Coddington*). Enfin, on peut employer deux lentilles, toutes deux plan-convexes et ayant leur partie plane tournée vers l'objet: ce dernier appareil, perfectionné par le célèbre opticien Chevalier, porte le nom de *doublet de Wollaston*.

Le *microscope composé*, dont l'invention a été attribuée à Jansen,

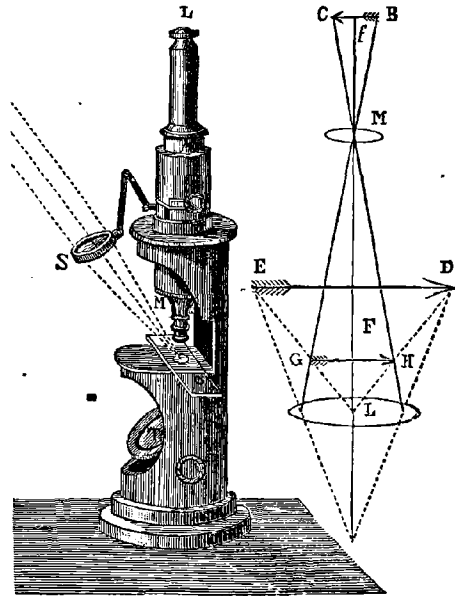


Fig. 197. — MICROSCOPE COMPOSÉ.

mais qui a été perfectionné par Galilée, Robert Hooke, Divini Bonani, Hartseker, Musschenbroeck, Adams et beaucoup d'autres, consiste essentiellement en deux lentilles convergentes (*fig. 197*) dont l'une M, appelée l'*objectif*, d'un très court foyer, est tournée vers l'objet, placé en *o* entre deux lames de verre, sur un support dit le *porte-objet*, tandis que l'autre L, que l'on nomme l'*oculaire*, est placée près de l'œil. Ces deux lentilles sont réunies par un tube de cuivre A. Le grossissement dépendant surtout de l'*objectif*, on augmente le pouvoir de celui-ci en le composant de deux

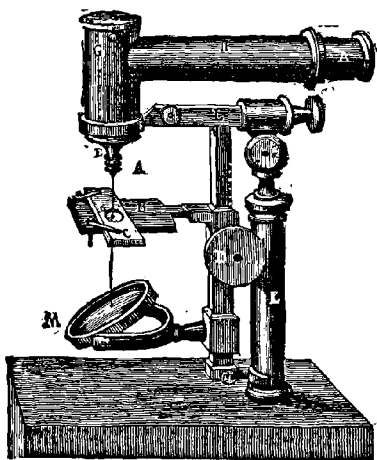


Fig. 198. — MICROSCOPE D'AMICI.

ou trois lentilles superposées; de même, l'*oculaire* a un deuxième verre, qui sert à rendre les images plus nettes, en atténuant les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité. Comme l'objet examiné est toujours très petit, on l'éclaire en dessous à l'aide d'un miroir concave T; s'il est opaque, il est éclairé en dessus avec une lentille convergente S, qui va former son foyer sur l'objet même.

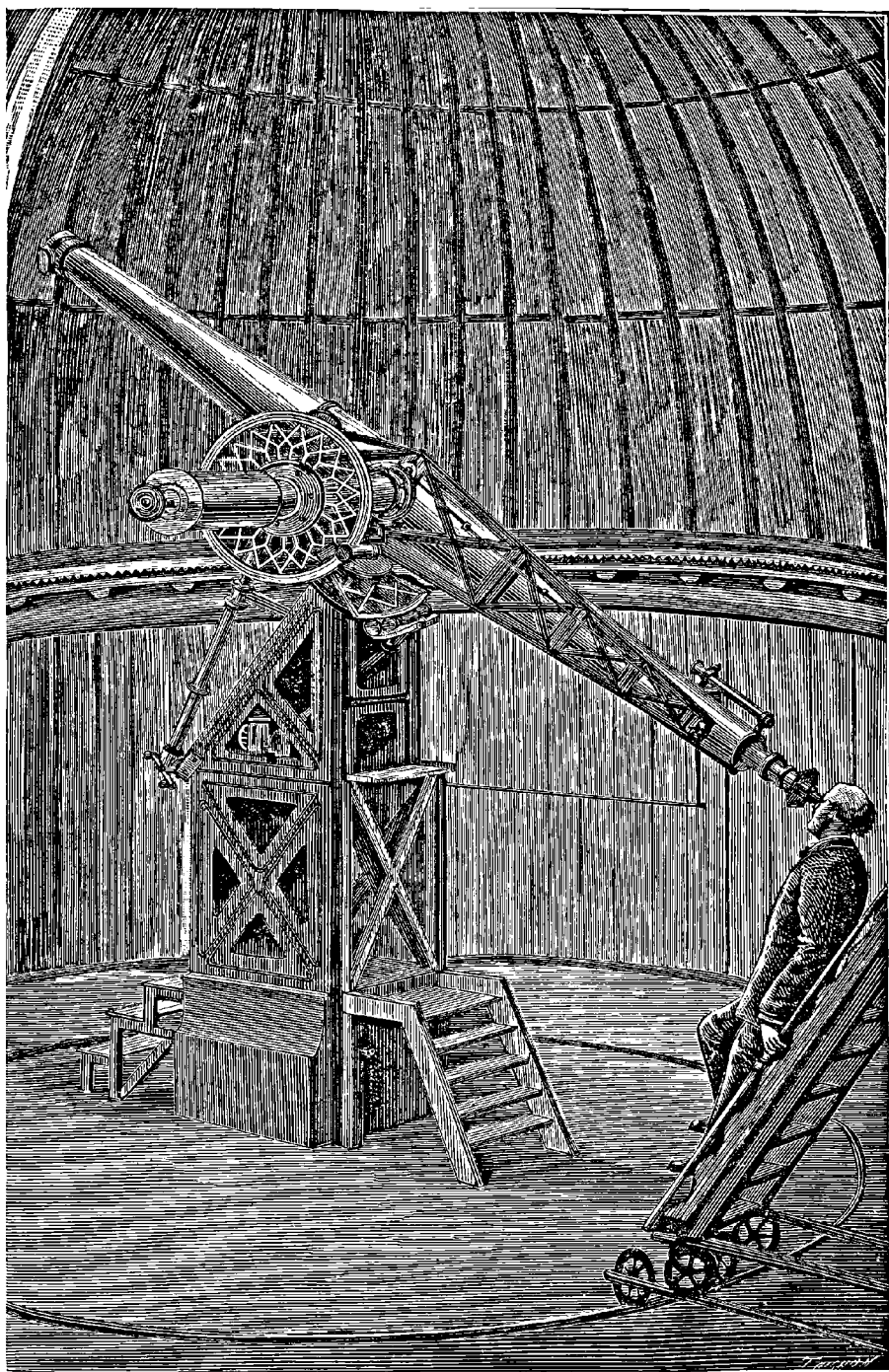
L'objet BC à examiner est placé au delà, mais à une petite distance du foyer principal  $f$  de l'*objectif*, de manière à former une image HG, réelle, renversée et agrandie, que l'on regarde avec l'*ocu-*

laire L lequel joue le rôle d'une loupe. L'image HG doit donc tomber en deçà du foyer F de l'*oculaire*, de manière à produire une seconde image DE, virtuelle et amplifiée de nouveau. Cette deuxième image, droite par rapport à la première HG, mais renversée par rapport à l'objet BC, est éloignée de l'observateur à une distance égale à celle de la vision distincte. Le microscope composé est donc une loupe avec laquelle on regarde l'objet non plus directement, mais son image réelle et agrandie donnée par une première lentille.

Depuis sa découverte jusqu'au commencement de ce siècle, aucun grand perfectionnement n'avait été apporté à la construction des microscopes.

En 1742, l'Anglais Henri Baker avait publié un remarquable traité du microscope; en 1776, Euler avait donné la description d'un objectif achromatique; mais pendant longtemps leurs calculs rigoureux furent en partie négligés par les opticiens. En France, le premier microscope achromatique, construit par MM. Vincent et Charles Chevalier, d'après les indications de M. Selligue, fut présenté à l'Académie des sciences en 1824.

PHYSIQUE ET CHIMIE POPULAIRES



Lunette astronomique de l'Observatoire de Paris (page 474).





Ce fut le signal de notables progrès. Nous décrivons les deux microscopes les plus connus.

Le *microscope d'Amici* (fig. 198) auquel le premier M. Ch. Chevalier appliqua les lentilles achromatiques, comme nous venons de le dire, peut être placé horizontalement ou verticalement, en enlevant le tube angulaire G et en vissant le tube H sur l'oculaire E. On peut lui donner une position inclinée, en tirant une petite clavette *m*, qui maintient l'appareil par sa partie inférieure, et en faisant mouvoir tout le système autour de la charnière *a*, unissant le microscope avec la colonne de cuivre L, qui lui sert de support. Sur une plaque rectangulaire est le porte-objet B, que l'on peut monter ou descendre au moyen d'une barre dentée que fait mouvoir le bouton D. L'objet à observer *o* est placé entre deux lames de verre C, posées sur le porte-objet. Le réflecteur concave M reçoit la lumière diffuse de l'atmosphère et la reflète sur l'objet placé dans un petit creux, entre les deux lames de verre. Un prisme rectangulaire de cristal, dit *oculaire de Campani*, est placé en G, et son hypoténuse donne la réflexion totale sur la lentille A de l'oculaire.

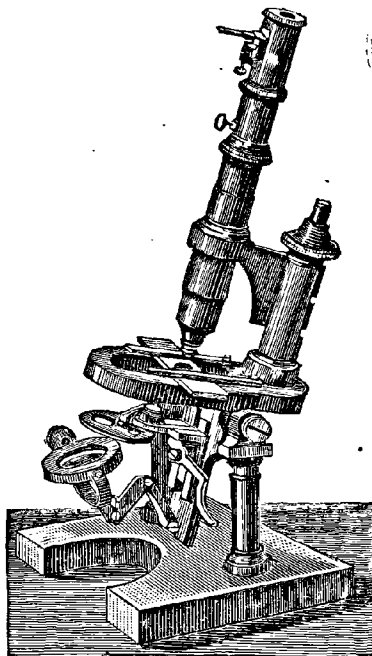


Fig. 199. — MICROSCOPE DE NACHET.

Le *microscope de Nachet* se compose d'un système de tubes de cuivre (fig. 199); le premier tube porte l'*objectif* à sa partie inférieure, et le dernier l'*oculaire*. Le tube supérieur entre à frottement doux dans le tube inférieur, qui lui-même glisse de la même façon dans le gros tube du milieu. Celui-ci est fixé à une pièce qui, par le moyen d'un bouton, permet d'éloigner ou de rapprocher très lentement le tube de la platine qui sert de porte-objet. Le tout peut tourner autour d'un axe, ce qui permet au tube de prendre toutes les inclinaisons possibles. Pour obtenir des images qui donnent la sensation du relief, laquelle n'existe pas quand on observe avec un œil seul, M. Nachet a construit des *microscopes binoculaires*, composés de deux tubes (fig. 200), l'un vertical, l'autre incliné, ayant chacun un oculaire, mais un seul objectif. Un prisme rectangulaire renvoie l'image à la fois dans les deux corps du microscope. Les images réfléchies par les prismes donnent l'impression

stéréoscopique. On ajuste l'appareil à l'écartement des yeux au moyen d'une vis qui déplace le tube vertical. Ce même constructeur fait des microscopes en trois corps qui permettent à trois personnes d'observer simultanément. Pour les chimistes, qui ont souvent besoin d'observer des substances dont les émanations altéreraient l'objectif, on a construit des microscopes renversés. Le porte-oculaire est incliné et va aboutir au-dessous du porte-objectif. Un prisme renvoie encore, par le phénomène de réflexion totale, les rayons lumineux dans la direction de l'œil.

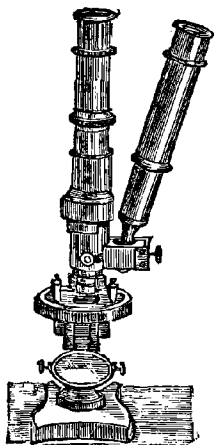


Fig. 200.

MICROSCOPE  
BINOCULAIRE.

Les applications du microscope sont innombrables. La botanique, la zoologie, la physiologie lui doivent de précieuses découvertes, et les admirables travaux de M. Pasteur sur les infiniment petits montrent ce que l'avenir peut encore attendre de lui (*fig.* à la page 449).

« Il est, de tous les instruments d'optique, celui qui procure le plus de plaisirs intellectuels, en permettant de voir combien l'œuvre de la nature est variée et admirable jusque dans ses plus petites créations. Pour l'amateur qui veut en faire usage, il devient un ami docile à ses moindres curiosités. Il élargit le cercle de la pensée, en même temps que celui de notre vision matérielle. Sa puissance révélatrice est infinie, puisqu'elle s'étend à l'ensemble des trois règnes de la nature, divisions immenses de l'histoire naturelle et qui sont loin

d'avoir été étudiées dans toutes leurs profondeurs.

» Choisissez un instrument ayant deux ou trois objectifs, permettant de varier les combinaisons du grossissement d'environ cinq diamètres jusqu'à deux ou trois cents, monté à frottement doux dans le tube, et à vis micrométrique. Les autres parties sur lesquelles se portera l'attention, le miroir, le mouvement de bascule, les oculaires, n'ont qu'une importance secondaire... On aura soin de graduer l'éclairage, de façon qu'il ne soit ni trop faible ni trop intense. L'objectif est la partie la plus importante; selon qu'il est bon ou mauvais, on perçoit bien ou mal. Les lentilles sont d'autant plus petites que l'on veut un plus fort grossissement; il y en a qui n'ont qu'un millimètre, et même un demi-millimètre de diamètre, pour les objectifs en usage dans la micrographie supérieure. On dit qu'un objectif est bon, quand il est doué du *pouvoir pénétrant*, propriété qui consiste à définir nettement tous les détails situés dans le champ du microscope. Les commençants attachent une importance naïve à la connaissance du grossissement: ils voudraient le voir atteindre tout de suite des proportions considérables. L'imagination, dont les écarts ne sont pas encore réglés par l'expérience, se laisse aller aux théories les plus fantaisistes et on croit voir des choses bien plus curieuses en opérant tout de suite avec les plus fortes lentilles que l'on a à sa

disposition. C'est une erreur ! Avant tout il faut bien voir, percevoir distinctement les minutieux détails. Tel sujet n'est pas susceptible d'un fort grossissement, tel autre pourra en supporter un dix ou cent fois plus considérable. L'appréciation du jeu des lentilles à employer est le résultat de l'expérience et du tâtonnement.

» Le microscope fatigue-t-il la vue ? Si l'on abuse, si l'organe visuel n'est pas robuste, si l'on prolonge les observations dans les premiers moments, on peut se fatiguer promptement. Mais si l'on modère l'ardeur primitive, si l'on ne reste d'abord que peu de temps à l'étude, pour l'augmenter graduellement jusqu'à un quart d'heure, et même plus, sans discontinuer, si on met des intervalles entre chaque observation, on n'en souffrira aucunement. Il est même reconnu que l'œil avec lequel on regarde se fortifie. Quand on débute, la fatigue est plutôt nerveuse que réelle ; la contraction à laquelle est soumis l'œil que l'on ferme est plus pénible que la contention de celui qui perçoit les images formées au microscope.

» Les travaux de l'observateur micrographe ont ce côté pénible qu'ils l'isolent : les observations sont forcément pour lui seul ! S'il veut faire partager le plaisir à d'autres personnes, il est forcé de les inviter à braquer leur œil, et de faire une explication, toujours embarrassante pour celui qui ne voit pas les détails de l'objet. Il ne peut guère remédier à cet inconvénient qu'à l'aide du dessin. Deux méthodes se présentent pour dessiner : la chambre claire et le procédé ordinaire de copie. La chambre claire est un prisme qui se fixe au-dessus de l'oculaire. Il renvoie les rayons lumineux sur une feuille de papier placée à côté du microscope, à la hauteur de la platine. L'œil perçoit donc en même temps deux images, et il est possible de suivre les contours de celle qui est sur la table avec la pointe d'un crayon. Une certaine habitude est nécessaire pour ménager le jour, lui donner l'intensité voulue sans trop éclairer, erreur qui empêcherait l'image réfractée de se peindre sur le papier ; l'œil doit enfin conserver une immobilité complète pendant tout le temps qu'on dessine. Ainsi, l'habitude du dessin à la chambre claire est presque aussi longue à acquérir que l'art du dessin lui-même, et on revient à copier, de sentiment, sur le papier, l'image virtuelle telle qu'elle est formée dans le microscope, en regardant et en dessinant alternativement, jusqu'à ce qu'on ait une représentation exacte de cette image fugitive (1). »

La chambre claire est très avantageusement remplacée, pour le dessin, par la chambre noire qui a le grand mérite de permettre de photographier l'image. Nous y reviendrons ci-après.

**INSTRUMENTS DE RAPPROCHEMENT. — LUNETTES, TÉLESCOPES.** — Le nom de *télescope* (du grec *scopeo*, je vois, *télé*, de loin) s'applique en réalité à tous les instruments qui ont pour but de rapprocher les objets en amplifiant leur image, et, en effet, ils ont tous d'abord porté ce nom. Mais aujourd'hui on appelle plus particulièrement *télescopes*, ou *télescopes catadioptriques*, les instruments qui sont composés de lentilles et de miroirs,

(1) J. Girard, *les Plantes étudiées au microscope* (Hachette, 1875).

c'est-à-dire qui utilisent la réfraction, et *lunettes*, ceux qui, composés uniquement de certaines combinaisons de verres et de lentilles, sont exclusivement réfracteurs.

Galilée était à Venise, lorsqu'il apprit qu'un opticien de Middelbourg, Jansen ou Lippershey, avait présenté au prince Moritz de Nassau un instrument qui rapprochait et grandissait beaucoup les objets; il part aussitôt pour Padoue, se recueille, expérimente, et, sans avoir eu aucun renseignement précis, retrouve en vingt-quatre heures l'instrument lui-même. Le premier aussi il conçut la pensée de diriger sa lunette vers les cieux. Si cette application ne provenait pas de calculs scientifiques, elle attestait une idée vraiment ingénieuse, et, si l'on juge de la gloire d'un homme par les résultats qu'il laisse, certes le grand astronome est digne de son incomparable popularité, car il a pu

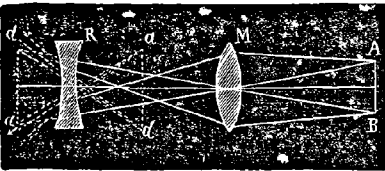


Fig. 201. — LUNETTE DE GALILÉE.

reconnaître les phénomènes les plus propres à entraîner l'imagination; il a été une sorte de révélateur du ciel.

La *lunette de Galilée*, qui de nos jours est devenue la lunette de théâtre, et dont un capucin, le P. Chérubin, en 1671, a fait la *jumelle* en la rendant double, se compose (*fig. 201*) d'une lentille biconvexe M pour l'objectif, et d'une lentille biconcave R pour l'oculaire. L'objet qu'on observe étant AB, les rayons, partis d'un quelconque de ses points A, tendent à aller former l'image de ce point au delà de l'objectif; mais, rencontrant la lentille biconcave R, ces rayons deviennent divergents, et, pour l'œil qui les reçoit, paraissent partis du point *a*; c'est donc là qu'apparaît l'image du point A. De même l'image de B va se former en *b*; d'où résulte une image virtuelle *ab*, droite et très rapprochée.

La lunette de Galilée était loin d'avoir la puissance des appareils astronomiques dont nous parlerons ci-après. Le plus fort grossissement auquel il arriva ne fut que de 32; mais ce résultat suffit pour déterminer tout à coup un immense progrès de l'esprit humain. On construisit aussitôt des lunettes en grand nombre, et Galilée, rapporte M. Zurcher (1), reçut d'Espagne une commande de cent de ces instruments. L'augmentation du nombre des observateurs des espaces célestes, rendus plus animés et plus intéressants, était bien naturelle. De grands efforts furent tentés pour pousser la puissance de grossissement aux dernières limites. Vers 1664, le mathématicien normand Auzout construisit un objectif qui lui faisait

(1) ZURCHER et MARGOLLÉ, *Télescope et microscope* (Bibliothèque utile).

atteindre celui de 600. La distance focale était de 98 mètres, et, par suite de l'impossibilité d'établir et de manœuvrer une lunette de cette longueur, l'astronome avait supprimé le tuyau, qui, du reste, n'est pas indispensable. « Une immense tour de bois avait été construite peu de temps auparavant pour recevoir, à son sommet, les eaux élevées par la machine de Marly et destinées à alimenter les réservoirs du château de ce nom ; cette tour était devenue inutile lorsqu'on eut achevé l'aqueduc ; on la transporta dans les jardins de l'Observatoire de Paris ; et c'est sur la partie supérieure qu'Auzout installa son objectif, en le disposant de manière que son axe de figure pût être dirigé vers la région du ciel que l'on voulait examiner. Quant à l'oculaire de cette immense lunette, il était tenu à la main par l'observateur, qui devait nécessairement se placer près du lieu où se formait l'image de l'astre soumis à ses observations. On comprendra sans peine ce qu'il y avait de gênant dans cette disposition, qui obligeait l'observateur à changer de place à mesure que l'astre se déplaçait dans le ciel, et à se mettre ainsi, tantôt au niveau du sol, tantôt à une hauteur plus ou moins grande, suivant que l'astre s'élevait plus ou moins au-dessus de l'horizon. D'ailleurs l'objectif et l'oculaire n'étant pas liés ensemble, comme dans les lunettes ordinaires, il en résultait qu'ils n'étaient presque jamais orientés l'un comme l'autre, et que, par suite, les images observées manquaient de netteté. » Les lunettes dont se servirent Gassendi, Hévélius, Huyghens, Dominique Cassini, dans leurs observations, ne dépassèrent par le grossissement de 100.

Cependant un très important perfectionnement fut introduit par Auzout. Lorsqu'on observe un astre, pour déterminer sa position exacte dans le ciel, il ne suffit pas de dire qu'il se trouve dans le champ de la lunette ; il peut y occuper une infinité de places. Le point le plus convenable est naturellement le centre du champ, et, pour le reconnaître, Auzout plaça au foyer de la lunette deux fils très fins croisés à angle droit. On en ajoute souvent d'autres qu'on place parallèlement à droite et à gauche ; ce système porte le nom de *réticule*, et celui de *micromètre* est donné aux fils, auxquels on a joint une vis à mouvement doux, servant à les rapprocher plus ou moins, de manière à pouvoir mesurer les dimensions très petites, telles que les diamètres des astres.

La *lunette de Galilée* est aujourd'hui absolument abandonnée en astronomie ; son grossissement étant trop faible, et elle-même ayant trop peu de *champ*, c'est-à-dire n'embrassant qu'une portion très limitée de l'espace, ce qui est dû à la divergence des rayons à la sortie de l'oculaire. On lui a substitué la *lunette astronomique*, dont la découverte théorique est due au grand astronome Képler, mais qui fut construite pour la première

fois par le P. Scheiner. Les objets, il est vrai, sont vus renversés ; mais cela est sans inconvénient pour l'étude des astres.

La *lunette astronomique* est formée (fig. 202) de deux lentilles *convergentes* placées aux extrémités de deux tubes métalliques noircis à l'intérieur afin d'éviter toute réflexion. La lentille, placée au plus gros tube et dirigée vers l'objet, est l'*objectif* O ; la lentille placée à l'extrémité du petit tube est l'*oculaire* O'. Soit un astre à examiner, A le bord supérieur de cet astre et B le bord inférieur. A cause de la grande distance de l'objet observé à la lentille objective, l'image se fera dans le plan focal principal en *a*, celle de B en *b*, les

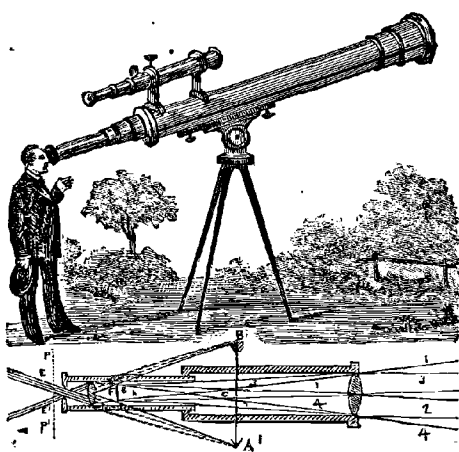
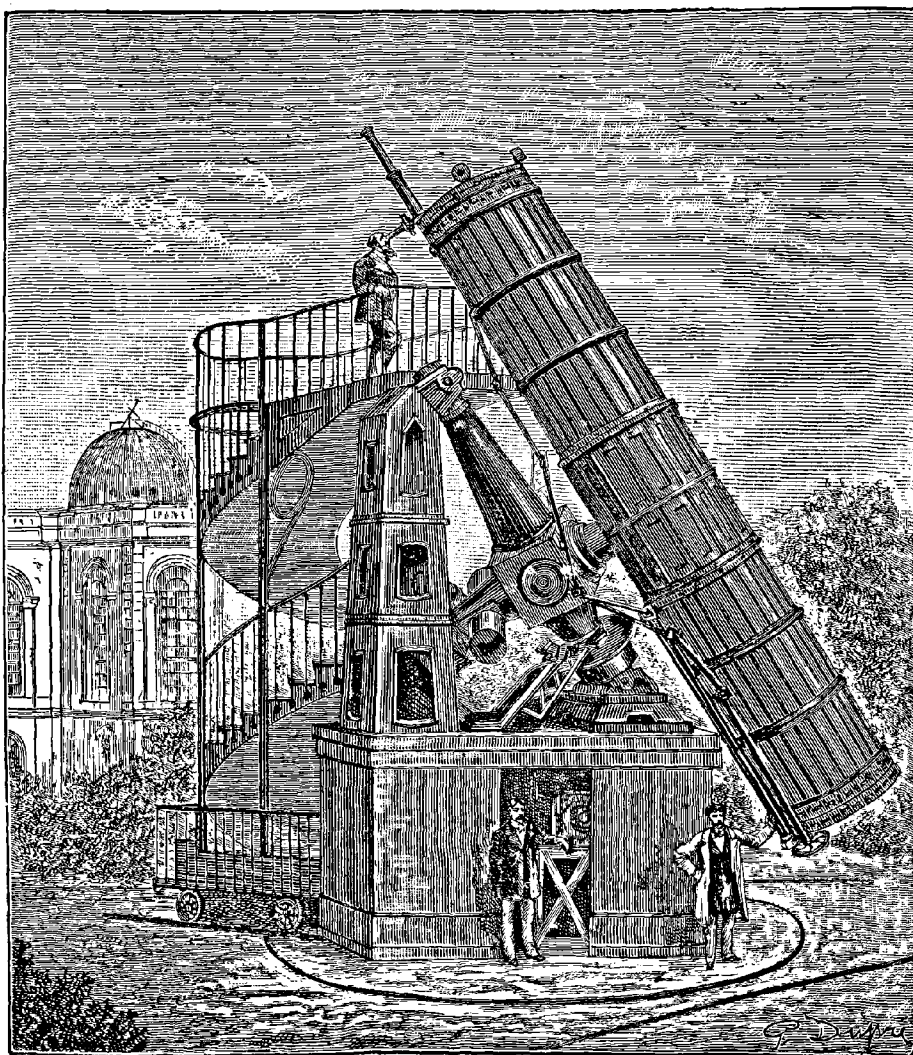


Fig. 202. — LUNETTE ASTRONOMIQUE.

lignes *aO*, *bO*, étant les prolongements secondaires passant par le centre optique O et par les extrémités A et B de l'objet. Le faisceau lumineux, parti du point A de l'objet et pénétrant dans l'appareil, est sensiblement un cylindre lumineux, limité par les rayons 1 et 2, parallèles à l'axe secondaire *aO* ; après son entrée dans la lunette, ce cylindre se transforme en un cône, ayant pour base l'objectif et pour sommet l'image *a* ; le faisceau lumineux devenu divergent au delà de *a* rencontre l'oculaire O', qui fonctionne comme loupe, dévie le faisceau vers l'axe de l'instrument, tout en modifiant sa divergence, de sorte que les rayons lumineux partis de A arrivent finalement à l'œil comme s'ils émanaient de A'. On peut faire les mêmes remarques sur le faisceau qui parvient à l'œil du point B et qui semble émané de B'. Il en est de même pour tous les autres points de l'objet, dont l'image est ainsi vue en A'B'. L'espace EE', où se coupent tous les faisceaux lumineux émanés de l'objet, est l'*anneau oculaire*, où se place l'œil ; c'est là aussi que se termine le tube de la lunette, par une plaque percée d'un trou appelé *œil-ton*. L'objet est vu directement sous l'angle *aOb*, et l'image sous-tend au centre optique de l'oculaire l'angle A'O'B' ; si donc on néglige la distance de l'œil à l'oculaire, le grossissement a pour expression  $\frac{A'O'B'}{aOb}$ , ou, ce qui

revient au même,  $\frac{aO'b}{aOb}$ . Or, comme ces angles sont toujours petits, ce rapport est, à très peu près, égal au rapport des distances de *ab* à l'objectif

et à l'oculaire. La première distance est exactement la distance focale  $F$  de l'objectif; la seconde est approximativement la distance focale de l'oculaire  $f$ , le grossissement est donc approximativement mesuré par l'ex-



Le grand Télescope de l'Observatoire de Paris (page 482).

pression  $\frac{F}{f}$ , c'est-à-dire qu'il est d'autant plus grand que le foyer de l'objectif est plus long et celui de l'oculaire plus court. Avec une bonne lunette on peut obtenir un grossissement de 1,000 à 1,200.

PHYS. ET CHIM. POPUL. — ALEXIS CLERG.

Liv. 162.

Pour se servir d'une lunette astronomique, on commence par enfoncer plus ou moins le tube de l'oculaire dans le gros tube, au moyen d'un bouton placé sur le côté, afin de le *mettre au point*, c'est-à-dire dans la position où l'image se forme parfaitement distincte. Pour les presbytes, l'oculaire s'enfonce davantage ; pour les myopes, au contraire, il s'allonge. A l'instrument est adaptée une petite lunette fixée parallèlement à la lunette principale appelée *chercheur*, et munie, à son foyer, de deux fils *réticulaires*. Le grossissement de la principale lunette étant un peu fort, et le *champ* très limité, on aurait une certaine difficulté à amener l'objet en face de l'objectif ; au contraire, avec le chercheur, on le trouve facilement, on l'amène à la croisée des fils et on l'a alors dans le champ

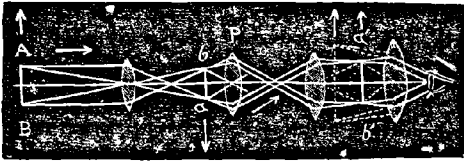


Fig. 203. — LUNETTE TERRESTRE.

de la lunette principale. Les lunettes à longs foyers des observatoires sont d'un poids qui rend le manie- ment de ces instruments difficile. On leur adapte alors une monture plus compliquée, et, par l'intermé- diaire d'engrenages et de tringles,

on parvient à leur imprimer tous les mouvements nécessaires avec la lenteur et la précision convenables (*fig.* à la page 465).

La *lunette terrestre*, *lunette de jour* ou *longue-vue*, inventée par Reita, ne diffère de la lunette astronomique que parce qu'en elle les images sont droites au lieu d'être renversées. On obtient ce redressement en ajoutant, entre l'objectif et l'oculaire, au delà du point où se forme l'image réelle, une petite pièce appelée *véhicule*, portant deux lentilles convergentes P et Q (*fig.* 203) de même distance focale. On voit par la figure que l'image *ab* de l'objet AB est reportée en *a'b'* redressée, mais sans altération de grandeur. C'est au delà qu'on place l'oculaire O qui fournit l'image virtuelle II.

Les lunettes terrestres sont très employées par les marins ; leurs lunettes de nuit sont soit des lunettes à oculaire simple, comme les lunettes astronomiques, soit à objectif de grand diamètre, afin de donner le plus possible de lumière et de permettre l'observation des objets dans l'obscurité.

Nous signalerons ici une application nouvelle et bien précieuse de la lunette terrestre aux canons, afin de donner au pointage une grande justesse.

Vers 1864, un officier du génie avait reconnu la possibilité de tirer un parti utile des lunettes appliquées aux canons ; il proposa et obtint de faire à l'arsenal de Bourges les expériences nécessaires. Ces expé-



riences réussirent parfaitement ; cependant rien ne fut fait alors dans cette voie, et les premiers essais sérieux, couronnés de succès, eurent lieu pendant le siège, à la recommandation de M. Faye, notamment au fort de Noisy-le-Sec. Le canon ayant reçu sa charge, la lunette se pose sur la pièce, parallèlement à l'axe et y prend une situation relativement fixe : l'opération du pointage étant effectuée, le pointeur enlève la lunette pour la soustraire aux effets destructeurs du recul (dérangement des pièces, rupture des verres, ou des fils réticules). La fixité permanente de la lunette sur le corps de la pièce constituait un grave inconvénient qu'une manœuvre excessivement facile fait disparaître entièrement. Le mode le plus simple d'adaptation est celui qui a été expérimenté à Bourges : la lunette portant vers les extrémités deux collets cylindriques, on dispose deux supports en forme de V le long de la pièce, de manière que les collets de la lunette puissent s'y appliquer. Dans cette disposition, la lunette ne peut recevoir aucun mouvement par rapport à la pièce, mais ce système ne peut convenir que dans le cas du tir presque rectiligne ; il ne serait d'aucun usage pour le tir suivant des trajectoires courbes, comme celles des bombes ou même des obus. Une autre disposition plus compliquée, celle mise en pratique par les Prussiens, consiste à adapter à la lunette un axe transversal terminé par des tourillons. Les tourillons sont reçus par des supports en forme de V, qui sont placés latéralement à droite et à gauche du corps de la pièce. En donnant à ces supports une hauteur convenable, on peut incliner l'axe de la lunette sur celui de la pièce, au moyen d'une vis placée vers l'une des extrémités de la lunette, vis qui fait fonction de hausse et permet de tirer sous de grandes inclinaisons par rapport à l'horizon. Comme dans le niveau à bulle d'air, la lunette est munie d'un réticule ; la plaque du réticule est réglée de position, dans le sens horizontal et dans le sens vertical, au moyen d'un système de vis butantes. L'une et l'autre des dispositions relatives aux supports de la lunette permettent l'emploi des procédés ordinaires de pointage, et le recours à ces procédés est même indispensable pour amener dans le champ de la lunette l'image du but à atteindre.

Les *télescopes*, avons-nous dit, diffèrent des *lunettes* en ce qu'ils utilisent en même temps la *réflexion* et la *réfraction*.

La première idée du *télescope*, affirme M. Figuiet, a été émise par le P. Zeucchi. Dans un ouvrage publié à Lyon, en 1652, ce savant rapporte qu'il lui vint à la pensée, pendant l'année 1616, d'employer des miroirs concaves de métal pour produire le grossissement des corps très éloignés, afin d'obtenir, au moyen d'un simple phénomène de *réflexion*, les puissants effets de grossissement que l'on n'avait encore

réalisés que par la réfraction des rayons lumineux à travers deux lentilles. Mettant ce projet en pratique, le P. Zeucchi construisit, paraît-il, un *télescope* à réflexion qui donnait les mêmes résultats que les lunettes d'approche découvertes depuis plusieurs années. Mais ce fut en 1663 seulement que Grégoire (1) construisit le premier télescope connu. Cet instrument (*fig.* 204) se compose d'un large tube de cuivre, fermé à une

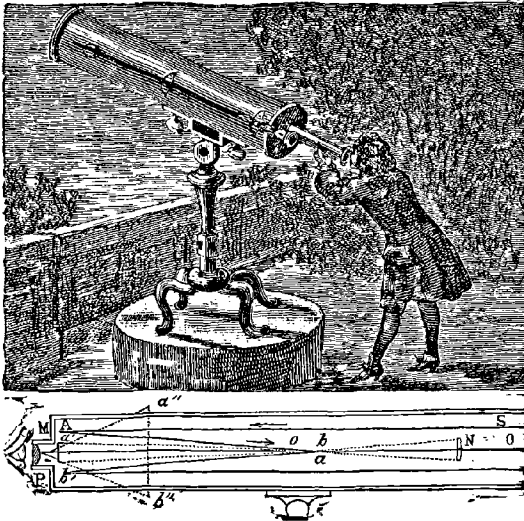


Fig. 204. — TÉLESCOPE DE GRÉGOIRE.

de ses extrémités par un grand miroir concave métallique M, percé d'une ouverture à son centre, par laquelle passent les rayons dirigés à l'oculaire, et à son autre extrémité par un autre miroir concave N, également en métal, un peu plus large seulement que l'ouverture centrale du grand miroir, d'un rayon de courbure beaucoup plus petit, et placé sur le même axe que lui. Le centre de courbure du grand miroir étant en O et son foyer en  $ab$ , les rayons émis par l'astre observé, comme SA, se réfléchissent sur lui et

vont former en  $ab$  une image renversée et très petite de l'astre. La distance entre les miroirs et leur courbure respective sont telles que l'image se produit entre le centre  $o$  et le foyer  $f$  du petit miroir : il s'ensuit que les rayons, étant réfléchis une seconde fois en N, forment en  $a'b'$  une image amplifiée et renversée de  $ab$ , c'est-à-dire droite par rapport à l'astre. Enfin cette image est vue par l'oculaire F, formé de une ou deux lentilles, qui l'amplifient de nouveau et la forment en  $a''b''$ . Comme les objets observés ne sont pas toujours à la même distance, la position du foyer du grand miroir peut varier, et conséquemment celui du petit ; de plus, la distance de la vision distincte n'est pas la même pour tous les yeux, l'image  $a''b''$  doit pouvoir apparaître en divers points : pour tenir compte de ces variations et approcher ou reculer le grand miroir du petit, un bouton A fait tourner une vis, qui met en mouvement la pièce B, fixée au petit miroir.

(1) GRÉGOIRE (Jacques), savant mathématicien écossais, professeur à Saint-André (1636-1675).

En 1672, lorsque Newton fut nommé membre de la Société royale de Londres, il présenta, à la première séance, un télescope qu'il avait imaginé et qui est une modification du télescope de Grégoire. Dans cet instrument (*fig. 205*) l'objectif *M* est un miroir concave placé à l'extrémité d'un long tube de bois. Les rayons lumineux, venant de l'astre observé, tombent sur ce miroir, s'y réfléchissent, et tendent à aller former, à l'autre bout du tube, une image réelle et très petite de l'astre; mais auparavant les rayons rencontrent un petit prisme rectangulaire *mn*, dans lequel ils pénètrent sans se réfracter, et font, avec la grande face *mn* un angle d'incidence tel qu'ils s'y réfléchissent, au lieu de réfracter au dehors. L'image vient donc se former en *ab*, en avant d'un tube horizontal fixé sur le côté de l'instrument; or, dans ce tube est une série de verres grossissants qui font l'office d'oculaire, et donnent de l'image *ab* une image virtuelle *AB* très amplifiée.

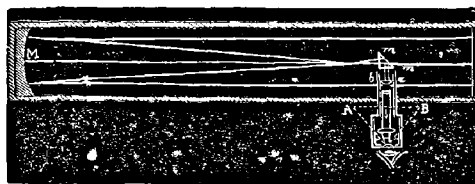


Fig. 205. — TÉLESCOPE DE NEWTON.

Les *télescopes*, comparés aux lentilles achromatiques, présentent des inconvénients graves qui les avaient fait délaissés presque complètement, à partir du moment où l'on a su fabriquer du flint assez pur pour les objectifs des lunettes. D'une part, le métal des miroirs, tout en ayant une rigidité spéciale et supérieure à celle des autres métaux (1), n'est pas toutefois tellement rigide qu'il ne soit nécessaire de lui donner une épaisseur considérable pour prévenir les flexions; cette épaisseur doit même s'accroître beaucoup quand les dimensions du miroir deviennent un peu grandes, et dès lors, par suite de la forte densité de l'alliage, le poids du miroir est énorme. En second lieu, le pouvoir réflecteur du métal des miroirs n'est pas très considérable, et, à grossissement égal, les images obtenues par un réfracteur sont beaucoup plus lumineuses que celles fournies par un télescope. Enfin, par l'action de l'air, le poli de la surface s'altère progressivement. A mesure que ce poli diminue, la clarté de l'instrument diminue avec lui, et, au bout d'un certain temps, il faut procéder à un polissage nouveau. Mais ce travail doit être dirigé de façon à ne pas compromettre la forme curviligne, sphérique ou parabolique du miroir; il constitue donc un travail tout à fait équivalent au travail primitif, travail difficile, délicat, et qui

(1) Le métal avec lequel on fabrique les miroirs de télescope est du bronze composé de 67 de cuivre et de 33 d'étain. Cet alliage a une nuance jaunâtre et est susceptible d'acquies un très beau poli. On y ajoute quelquefois de faibles proportions de laiton, d'argent, d'arsenic et aussi de platine.

doit être répété autant de fois que l'altération du poli l'exige. Vers 1859, Foucault proposa, dans la construction des miroirs des télescopes, une modification qui constitue une révolution véritable, et qui permet de substituer avantageusement les télescopes aux réfracteurs, dans tous les cas et quel que soit le grossissement. Elle consiste à employer des miroirs en verre argenté. Le verre, plus rigide que l'alliage des miroirs et d'une densité presque quatre fois plus faible, fournit des

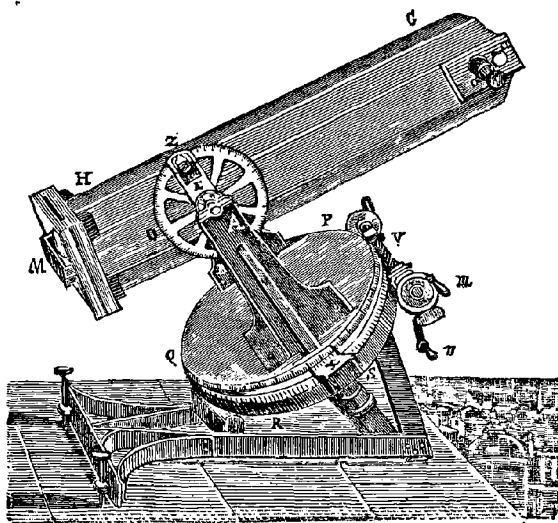


Fig. 206. — TÉLESCOPE DE FOUCAULT.

miroirs d'un poids beaucoup moindre. L'argent poli déposé sur la surface possède un pouvoir réflecteur extrêmement considérable et qu'on peut évaluer à 95 ou 96 pour 100. Enfin, si on a travaillé la surface du verre de façon à lui donner toute la rectitude possible, ce travail est définitif, car lorsque la pellicule d'argent se ternit, il suffit de l'enlever et de la remplacer par une autre, et cela autant de fois qu'on le jugera nécessaire. Nous ajoutons

aussi que le prix en est infiniment moindre.

Nous décrivons le *télescope Foucault* de petite dimension (0<sup>m</sup>,16 de diamètre), sortant des ateliers de M. Secrétan, et dont le grossissement de 320 fois qu'il atteint exigerait l'emploi d'une lunette d'un prix au moins double. Le corps de l'instrument est en bois et a la forme d'un tube octogonal (*fig. 206*) dont une extrémité G est ouverte, et dont l'autre est un miroir concave. Au tiers de sa longueur à peu près, ce tube est supporté par deux montants de bois H et B, fixés sur une table tournante PQ, à laquelle le mouvement est donné, par le moyen d'engrenages, sur un plateau fixe RS, orienté parallèlement à l'équateur; autour de la table est un cercle de cuivre divisé en 360 degrés, et, par dessous, un engrenage circulaire que traverse une vis sans fin V et que fait mouvoir dans les deux sens une manette m, qui ainsi communique le mouvement à la table PQ, et en même temps à tout le télescope. Un vernier x, adapté au plateau RS, indique les fractions de degré. Enfin l'axe qui soutient le tube supporte un cercle gradué O qui correspond avec l'horaire de l'astre

observé et conséquemment permet de mesurer sa déclinaison, c'est-à-dire sa distance angulaire de l'équateur, en sachant que les degrés tracés autour de la table RS indiquent l'ascension droite, c'est-à-dire l'angle que forme le cercle horaire de l'astre avec le point de repère que l'on a choisi. Pour incliner le télescope, il y a une pièce de cuivre E, qui, fixée au montant A, supporte une pince dans laquelle court le limbe O que l'on arrête au moyen du bouton *r*. Sur le côté de l'appareil est l'oculaire *o*, placé sur une plaque de cuivre, en face du prisme intérieur; pour obtenir l'image au point, l'on avance ou l'on recule l'oculaire au moyen du bouton *a*.

Un autre genre de télescopes sont ceux dont Herschel (1) construisit le premier en 1774, et auxquels on a donné le nom, trouvé par l'inventeur lui-même, de *télescopes front-vieu* ou à *vue de face*.

La réflexion de la lumière sur un miroir occasionne toujours la déperdition d'une portion notable de cette lumière. Si donc on pouvait éviter l'emploi des petits miroirs destinés, dans les télescopes de Newton et de Grégory, à renvoyer les rayons réfléchis du grand miroir vers l'oculaire,

(1) HERSCHEL (William), célèbre astronome (1738-1822), fils d'un musicien du Hanovre et artiste lui-même, s'était fixé en Angleterre, en qualité d'organiste, d'abord à Halifax, puis à Bath. Voulant approfondir la théorie de son art, il avait entrepris l'étude des mathématiques, quand, par occasion, il se trouva lancé tout à coup dans l'optique et l'astronomie, qui devinrent la source de son illustration. Un petit télescope newtonien était tombé entre ses mains, et la contemplation du ciel l'avait enthousiasmé. Il voulut se procurer aussitôt un instrument semblable, mais le prix demandé était fort au-dessus de ses ressources. Il tenta alors de construire un télescope de ses mains (1774). Il ne tarda pas à en construire de plus parfaits et plus puissants que tous ceux que l'on connaissait. Avec le secours de ces instruments, il fit les découvertes les plus importantes et les plus inattendues : ainsi il découvrit une nouvelle planète, Uranus (1781), puis ses satellites (1787) et deux nouveaux satellites de Saturne (1789); il reconnut que le système solaire n'est pas fixe, étudia les nébuleuses, etc. Le roi George III lui accorda sa protection, lui donna une pension, et une habitation voisine du château de Windsor, où il fit la plupart de ses découvertes. Il devint président de la Société royale, et a laissé de nombreux ouvrages dans les *Transactions philosophiques* de cette société. Son frère et sa sœur l'aiderent dans ses travaux. « M<sup>lle</sup> Caroline Herschel, rapporte Arago, passa en Angleterre dès que son frère fut nommé astronome du roi. Elle y reçut le titre d'astronome assistant, avec de modestes appointements. Dès ce moment, elle se dévoua sans réserve au service de William, heureuse de contribuer jour et nuit au mouvement ascendant et rapide de sa réputation scientifique. Elle partagea toutes les gardes de nuit de son frère, constamment l'œil à la pendule et le crayon à la main; elle fit tous les calculs sans exception; elle copia trois ou quatre fois les observations dans des registres particuliers, les classa, les coordonna, les analysa. Si le monde scientifique vit avec étonnement, pendant tant d'années, les publications d'Herschel se succéder avec une rapidité sans exemple, on en fut particulièrement redevable à l'ardeur de Caroline Herschel. L'astronomie a été directement enrichie par elle de plusieurs comètes. » Herschel a trouvé dans son fils, sir John Herschel, mort en 1871, un digne soutien de sa gloire. Celui-ci a consacré à un monument commémoratif le grand télescope de son père. « Le 1<sup>er</sup> janvier 1840, dit encore Arago, sir John Herschel, sa femme et ses enfants au nombre de sept, quelques anciens serviteurs, se réunirent à Stough. A midi précis, l'assemblée fit processionnellement plusieurs fois le tour du monument; ensuite elle s'introduisit dans le tube du télescope, et entonna un *Requiem* en vers anglais, composé par John Herschel lui-même. Après sa sortie, l'illustre famille se rangea en cercle autour du tuyau, et l'ouverture fut scellée hermétiquement. »

il devait en résulter un avantage considérable. Herschel y parvint en inclinant un peu son réflecteur par rapport au tuyau, et en rejetant ainsi l'image de côté : l'observateur étudiait cette image en tenant l'oculaire à la main et en tournant le dos à l'objet. Il y avait bien là un inconvénient, car le sommet de la tête de l'observateur empêchait une partie des rayons lumineux de pénétrer dans l'instrument, et cette disposition ne pouvait être appliquée qu'à des télescopes de très large ouverture. Or,

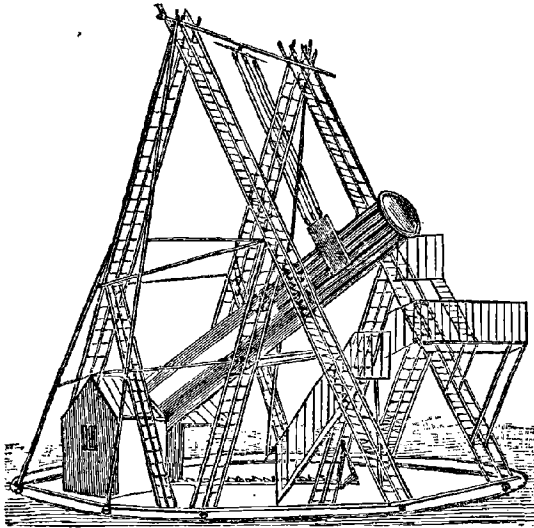


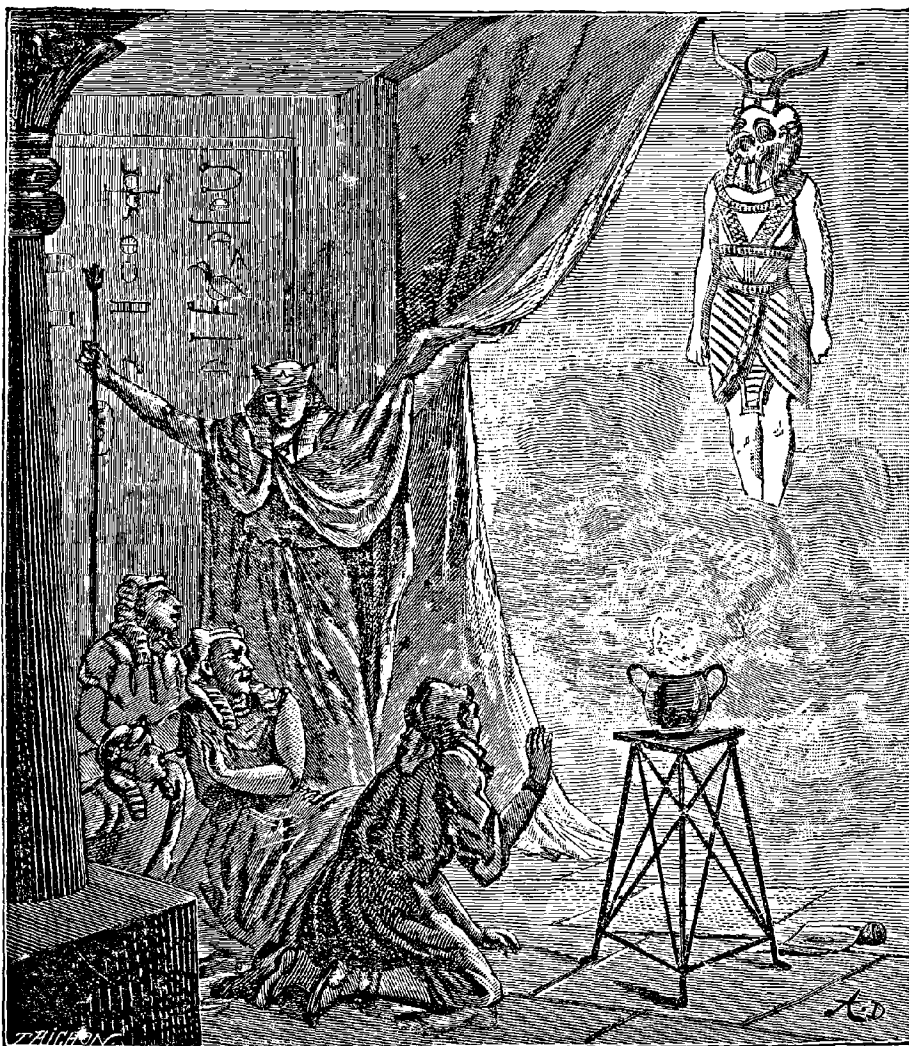
Fig. 207. — TELESCOPE D'HERSCHEL.

Herschel était arrivé à se servir d'un miroir de 1<sup>m</sup>,47 de diamètre et le tube de l'instrument avait 13 mètres. Le miroir (*fig.* 207) pesait plus de 1,000 kilogrammes. Pour pouvoir changer l'orientation de l'instrument qui le portait, on fut obligé d'établir un immense appareil de bigues, de poulies et de cordages, et cette construction, montée sur des roulettes, était déplacée tout d'une pièce à l'aide d'un treuil. L'observateur mon-

taut sur un petit balcon fixé au-dessus de l'extrémité supérieure du tuyau. Avec ce télescope, Herschel avait pu pousser le grossissement jusqu'à 1,000 ; mais il se servit rarement de cet immense télescope, car il n'y avait guère que cent heures dans l'année pendant lesquelles, sous le ciel brumeux de l'Angleterre, l'air fût assez limpide pour employer cet instrument avec succès. Herschel travaillait et polissait lui-même les miroirs ; il était devenu très habile dans ces opérations ordinairement longues et délicates.

« Avant d'avoir trouvé des moyens directs, certains, de donner aux miroirs la forme des sections coniques, dit Arago dans la biographie de l'illustre astronome, il fallait bien qu'Herschel, comme tous les opticiens ses prédécesseurs, cherchât à atteindre le but en tâtonnant. Seulement ses essais étaient dirigés de telle sorte qu'il ne pouvait y avoir de pas rétrograde. Dans son mode de travail, le mieux, quoi qu'en dise un ancien adage, n'était jamais l'ennemi du bien. Quand Herschel entreprenait la construction d'un télescope, il fondait et façonnait

plusieurs miroirs à la fois : dix, par exemple. Celui de ces miroirs auquel des observations célestes, faites dans des circonstances favorables, assignaient le premier rang, était mis de côté, et l'on retravaillait les neuf autres. Lorsqu'un de ceux-ci devenait fortuitement supérieur au miroir réservé, il en prenait la place



C'était au moyen de la fantasmagorie que l'on effrayait ceux qu'on initiait aux mystères d'Isis (page 493).

jusqu'au moment où, à son tour, un autre le primait, et ainsi de suite. Est-on curieux de savoir sur quelle large échelle marchaient ses opérations, même à l'époque où, dans la ville de Bath, Herschel n'était qu'un simple amateur d'astronomie ? Il fit jusqu'à 200 miroirs newtoniens de 7 pieds anglais (2<sup>m</sup>,13) de

foyer ; jusqu'à 150 miroirs de 10 pieds (3<sup>m</sup>,05) et environ 80 miroirs de 20 pieds (6<sup>m</sup>,096). Chaque fois qu'Herschel entreprenait de polir un miroir de télescope, il en avait pour dix, douze, quatorze heures d'un travail continu. Il ne quittait pas un instant, même pour manger, et recevait de la main de sa sœur les aliments sans lesquels on ne pourrait supporter une si longue fatigue ; pour rien au monde, Herschel n'aurait abandonné son travail ; suivant lui, c'aurait été le gâter. »

Depuis Herschel, l'optique a fait de tels progrès qu'il n'est rien que l'on ne puisse espérer ; un jour, certes, nous verrons la lune au bout de nos télescopes comme si elle était à une distance de la terre de quelques milliers de mètres ; nous pourrons l'explorer tout à l'aise, et retrouver peut-être des vestiges d'une civilisation disparue depuis le refroidissement de l'astre. On a installé, en 1875, à l'Observatoire de Paris, un admirable télescope, un des plus beaux qu'il y ait au monde, qui peut victorieusement lutter avec le magnifique instrument que la Société royale de Londres a fait construire, en 1869, pour l'Observatoire de Melbourne, et qui est supérieur au célèbre télescope de 0<sup>m</sup>,80 de diamètre, construit en 1862 par Foucault et que possède l'Observatoire de Marseille. La description de ce nouveau télescope, résumée d'après M. de Parville, fera comprendre sur quels fondements solides sont basées les espérances les plus gigantesques de la science.

Le grand télescope de l'Observatoire de Paris, construit par MM. Eychens et Martin, est installé à peu près au milieu du jardin de l'Observatoire, un peu au delà de la grande terrasse (*fig.* à la page 473). Il est placé sous un vaste hangar roulant, d'au moins 10 mètres de hauteur et 8 mètres de largeur. Cette grande cage en bois, montée sur roues, se déplace sur des rails, pour laisser, au moment du travail, l'instrument en plein air. Le hangar est d'ailleurs fermé sur toutes ses faces. Du côté sud, existe seulement une grande porte, qui peut se replier comme les pans d'un paravent pour livrer passage à l'instrument. L'impression première du visiteur est au moins singulière. Au milieu de cette grande cage roulante se dresse le télescope, immuable sur son piédestal de pierre. Mais quel télescope ! Nous sommes si habitués à voir, en astronomie, des instruments à forme délicate, que l'aspect de celui-ci est bien fait pour induire en erreur. En pénétrant sous l'abri, on croirait plutôt entrer dans la chambre d'une de ces gigantesques machines qui font mouvoir nos paquebots transatlantiques. Des masses de fer forgé s'élèvent à 9 mètres au-dessus du sol. Tout cela est énorme, massif, écrasant. L'œil étonné contemple l'immense tube de 1<sup>m</sup>,20 de diamètre et de 7<sup>m</sup>,30 de longueur qui, placé sur ses tourillons, paraît suspendu sur la tête du visiteur, comme un lourd canon de marine. C'est absolument de la grosse méca-



nique, et cependant c'est de la mécanique d'une précision incomparable. Un appareil aussi gigantesque et aussi compliqué, grâce aux ressources de l'art mécanique moderne, est mû avec la délicatesse d'un mouvement de montre.

Le tube est en fer forgé ; ce sont des anneaux de fer boulonnés et ajustés avec une précision mathématique. Il pèse 2,200 kilogrammes. Le miroir d'un bout, l'oculaire et le chercheur de l'autre, plus un autre poids indispensable à l'équilibre pèsent en outre 800 kilogrammes. L'axe du monde, c'est-à-dire le support, qui se dresse obliquement dans l'air, à la façon d'une grosse bielle de machine à vapeur, pèse 2,600 kilogrammes. Il faut joindre à ce poids celui de l'axe transversal, qui permet au tube de s'incliner dans son plan et qui le maintient à la hauteur de 8 mètres. Le poids des tourillons, des contrepoids, des pièces accessoires, donne encore plusieurs milliers de kilogrammes. Au total, tout l'ensemble pèse environ 19,000 kilogrammes ! Pour monter l'instrument, il a fallu établir tout un système de levage, comme pour monter nos plus grosses machines.

Voici, en réalité, maintenant le merveilleux de cette construction astronomique. Tous ceux qui ont mis l'œil dans une forte lunette savent qu'à peine si l'on a pu apercevoir une étoile elle n'y est déjà plus : le mouvement de la terre l'a emportée hors du champ de l'instrument. Il faut donc bien, pour observer, que l'immense tube du télescope tourne aussi et suive l'astre automatiquement, au fur et à mesure qu'il fuit. Il n'y a qu'une horloge qui puisse imprimer au télescope un mouvement de rotation assez uniforme et régulier pour maintenir l'astre dans le champ de la vision. C'est, en effet, une horloge qui sert de moteur à cette masse de plusieurs tonnes. Une horloge, par un mécanisme admirable, communique le mouvement au grand tube, qui avance dans l'espace autour de son support comme une aiguille sur un cadran de montre : un cadran de 15 mètres de diamètre, une aiguille de 12 tonnes ! Tout ce système est si bien équilibré, rendu si complètement docile, qu'avec le bout du doigt posé sur une manette, on peut faire tourner cette immense machine, chef-d'œuvre de montage et d'ajustage.

L'oculaire est placé à la bouche de l'instrument ; il est mobile autour du tube pour être plus à la main de l'astronome. Il est à 8 mètres de hauteur. Pour aller placer l'œil à cette hauteur, un escalier de fer, très élégant dans sa spirale montante, est installé sur une plate-forme roulante. L'astronome gravit les marches et peut regarder à l'aise du haut de cette tour mobile. L'escalier tourne d'ailleurs autour de son axe, emportant dans son mouvement le balcon supérieur, et l'astronome peut tourner,

par conséquent, autour de l'ouverture du télescope. Quand on veut se servir de l'instrument, on déplace la cage du sud au nord; elle roule sur des rails; le télescope est à découvert. On pousse l'escalier en avant sur des rails perpendiculaires aux premiers; mais l'escalier devant tourner autour du télescope, il faut qu'il passe sur des rails circulaires. A l'aide d'un petit treuil, on opère un changement de voie; des roues maintenues, soulevées jusque-là, s'abaissent; celles qui servaient sont soulevées, et l'escalier-wagon s'engage sans difficulté sur son chemin courbe. Trois hommes de manœuvre font le service du télescope et poussent l'escalier; car, de quart d'heure en quart d'heure, le grand tube a assez tourné pour que l'astronome se trouve éloigné de l'oculaire.

La puissance de l'instrument permettrait d'obtenir un grossissement de 2,400 diamètres. On verrait la lune à 30 lieues de la terre; mais la vision serait mauvaise. On ne se servira probablement jamais de ce grossissement. La rétine, en effet, a environ 2 à 3 millimètres carrés de surface, et, pour voir nettement, il est indispensable que l'image peinte sur la rétine occupe toute sa surface. En poussant trop loin le grossissement, on dépasserait cette limite. On adoptera sans doute, — rien ne saurait être encore fixé, — le grossissement de 500 diamètres. Avec un grossissement de 200 fois, on ne voit du ciel que 12 minutes d'arc, c'est-à-dire un coin à peu près grand comme la moitié de la lune; avec 2,400 on ne verrait plus qu'une minute d'arc. On fera des oculaires compris entre 200 et 1,200 grossissements.

Le miroir de 1<sup>m</sup>,20 n'est pas métallique, comme celui de l'instrument de l'Observatoire de Melbourne; il est du système Foucault, en verre argenté. Bien que la question ne semble pas encore élucidée en Angleterre, le miroir en verre de Foucault paraît présenter des avantages sur le miroir métallique. Il résulte des expériences de M. Jamin sur la réflexion des rayons lumineux, qu'un miroir comme celui du télescope de Melbourne réfléchit en moyenne les 0,64 de la lumière incidente. Les expériences de M. Wolf prouvent qu'un miroir en verre argenté, dont l'argenteure date de six ans, réfléchit au contraire les 0,92 de la lumière incidente; en tenant compte de la réflexion sur le petit miroir incliné, un instrument de même dimension que celui de Melbourne doit donc renvoyer à l'observateur les 0,80 de la lumière émise par l'astre, un peu plus du double de ce que donnent les miroirs métalliques. Le grand miroir de Melbourne ne doit pas donner plus de lumière qu'un objectif de 0<sup>m</sup>,98 d'ouverture, et il a 1<sup>m</sup>,22 de diamètre. Un miroir en verre argenté de 0<sup>m</sup>,90, au lieu de 1<sup>m</sup>,22, donnerait la même quantité de lumière. Il est donc vraisemblable que le miroir argenté de 1<sup>m</sup>,20 du nouveau

télescope de Paris doit donner plus de lumière que le miroir métallique de Melbourne. L'expérience prononcera en dernier ressort. On peut ajouter encore que le réfracteur en verre de Dorpat, mesurant  $0^m,24$ , rivalise avec le réfracteur de 18 pouces ( $0^m,45$ ) d'Herschel, et la lunette de Poulkowa ( $0^m,38$  d'ouverture) avec le télescope de 4 pieds ( $1^m,22$ ) de Lorient. La lunette de Dawest, à Copenhague ( $0^m,28$ ) surpasse le télescope d'Herschel et égale presque le *Leviathan* ( $1^m,83$ ) de lord Ross. Il semble ainsi démontré qu'un objectif d'une ouverture égale à l'unité équivaut à un miroir métallique de  $1^m,35$  d'ouverture.

Assurément, le télescope de l'Observatoire, s'il est le meilleur qui existe, n'est pas le plus grand. Le télescope d'Herschel avait 12 mètres de longueur sur  $1^m,47$  d'ouverture. Le beau télescope que lord Ross a construit lui-même, en 1845, dans son parc de Parsonstown (Irlande), atteignait des proportions réellement gigantesques. Cet instrument

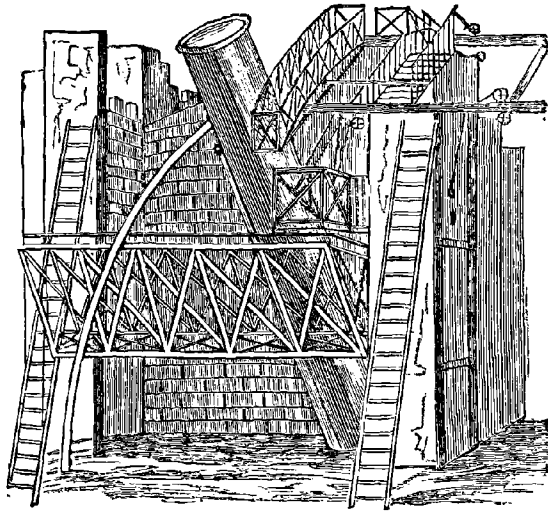


Fig. 208. — TÉLESCOPE DE LORD ROSS.

(fig. 208), auquel on donne le nom *Leviathan*, mesure  $16^m,60$  de long ; le miroir a  $1^m,83$  d'ouverture et pèse 3,809 kilogrammes, le tube 6,604 kilogrammes. Le poids total à mouvoir est de 10,415 kilogrammes. Il coûta 300,000 francs. C'est le plus énorme qui ait été érigé jusqu'ici. « Qu'on se figure, a écrit Arago, l'œil d'un géant dont la prunelle aurait six pieds de diamètre ! » Ce n'est pas cependant celui qui donne les plus forts grossissements. Les télescopes construits depuis quelques années, bien que gigantesques encore, n'atteignent pas ces proportions colossales, et sont cependant beaucoup plus puissants. Voici le poids et les dimensions du télescope de Melbourne, le seul qui puisse être comparé aujourd'hui avec le télescope de Paris : Miroir et monture, 1,590 kilogrammes ; tube (portion pleine), 590 ; tube (portion treillagée) 620 ; axe polaire (4 mètres de long) 1,450 ; axe de déclinaison (3 mètres), 680 ; centre (poids) 2,130 ; accessoires divers, 1,180. Total, 8,240 kilogrammes.

Le télescope de Melbourne pèse beaucoup moins que le nôtre à cause

de sa monture. Il est du système Cassegrain. L'œil se place à la culasse, et non à l'ouverture supérieure ; on n'a plus besoin de suspendre le tube par son milieu, par conséquent à une si grande hauteur. Les pièces de soutien sont moins fortes : on n'a plus à craindre autant les flexions ; on supprime aussi les contrepoids ; enfin le petit miroir réflecteur est placé hors du tube dans une gaine qui lui fait suite et qui n'est qu'un simple treillis de fer. Pour toutes ces raisons, on réduit le poids de l'ensemble.

Au point de vue mécanique, ce dispositif semble peut-être supérieur au nôtre ; seulement, au point de vue astronomique, il offre un inconvénient : on est obligé de limiter beaucoup le champ de vision, puisqu'il est réduit à l'espace conique qui s'appuie d'une part sur l'ocillon, où l'observateur place l'œil, et de l'autre sur le petit miroir installé dans le treillis qui n'a que 0<sup>m</sup>,23 de diamètre. Le télescope de Paris a plus de champ ; mais sa monture a nécessité de très grands soins de construction. C'est un tour de force qu'ont accompli MM. Eychens et Martin. On concevra toute la difficulté que présente la correction d'un pareil instrument, quand on saura qu'une erreur de 3 ou 4 millimètres sur la longueur focale du miroir, une erreur aussi petite dans la confection du grand tube en fer forgé, une flexion insignifiante dans des pièces aussi pesantes que le télescope et les axes d'appui, auraient rendu tant d'efforts inutiles ; il eût fallu tout recommencer, jusqu'au piédestal, jusqu'aux fondations qui ne devaient pas bouger. Ce télescope a coûté 200,000 francs. Heureusement tout a réussi à souhait, et l'Observatoire possède enfin un instrument digne de la France.

MM. Prosper et Paul Henry, astronomes à l'Observatoire de Paris, ont imaginé, pour observer au moyen du télescope une disposition toute nouvelle, qui assure une prééminence marquée à cet instrument sur les lunettes. L'infériorité des télescopes en pratique, leur manque de netteté ou plutôt l'instabilité des images produites, tient, selon ces astronomes, presque uniquement à ce que des masses d'air de densités inégales, provenant du dehors, s'introduisent dans l'intérieur du tube, où elles séjournent en tourbillonnant. En traversant ce milieu hétérogène, les rayons incidents et les rayons réfléchis sont fortement troublés, et il n'arrive à l'œil de l'observateur qu'une image confuse. Cette cause a déjà été soupçonnée, et différents moyens ont été proposés pour y remédier. On a pensé, par exemple, qu'en pratiquant des ouvertures vers la partie inférieure du tube du télescope, il se produirait un équilibre de température plus complet entre l'air renfermé dans ce tube et l'air extérieur. Mais, en fait, dans de telles conditions, les images se sont toujours montrées plus confuses qu'auparavant. Un autre procédé a été appliqué à

différents instruments, notamment à celui de l'Observatoire de Melbourne. Ce procédé consiste à supprimer, pour ainsi dire, le tube, en ne laissant de ce dernier que ce qui est absolument nécessaire pour relier, d'une façon rigide, le miroir de l'objectif à l'oculaire. Cette disposition, néanmoins, n'est efficace qu'avec des temps très calmes ; par le vent le plus faible, les images paraissent agitées. Les télescopes ont un autre défaut grave, qui les rend assez incommodes et en restreint notablement l'emploi. Ce défaut provient de ce que la surface réfléchissante des miroirs, sous l'influence de l'air, de l'humidité, etc., se ternit rapidement. Il résulte de ces différentes causes d'altération une perte sensible de lumière, qui oblige à renouveler fréquemment le poli de la surface.

Pour remédier à ces divers inconvénients, on est amené à placer le télescope dans les mêmes conditions que la lunette, c'est-à-dire à fermer hermétiquement son tube par une lentille de verre, taillée de telle sorte qu'elle ne nuise en rien au pouvoir optique de l'instrument. MM. Prosper et Paul Henry ont réalisé cette expérience de la manière suivante : A l'ouverture d'un télescope newtonien à miroir de verre argenté, de 0<sup>m</sup>,10 de diamètre et 0<sup>m</sup>,60 de longueur focale, est placée une lentille de crown-glass de même grandeur que le miroir et très légèrement concave. Cette forme réunit plusieurs avantages : elle évite la double image, très faible, à la vérité, qui résulterait d'un verre plat ; de plus, elle détruit l'aberration de réfrangibilité du microscope oculaire, qui, dans l'instrument, n'est formé que de verres simples. Cette modification est absolument sans inconvénient. La perte de lumière qui résulte de l'addition de la lentille, qui peut être très mince, est tout à fait négligeable, et comme cette dernière est presque pleine, elle n'exige pas un centrage rigoureux. Cette lentille et le miroir ont d'ailleurs été retouchés de façon à constituer un système optique complètement exempt d'aberration de sphéricité.

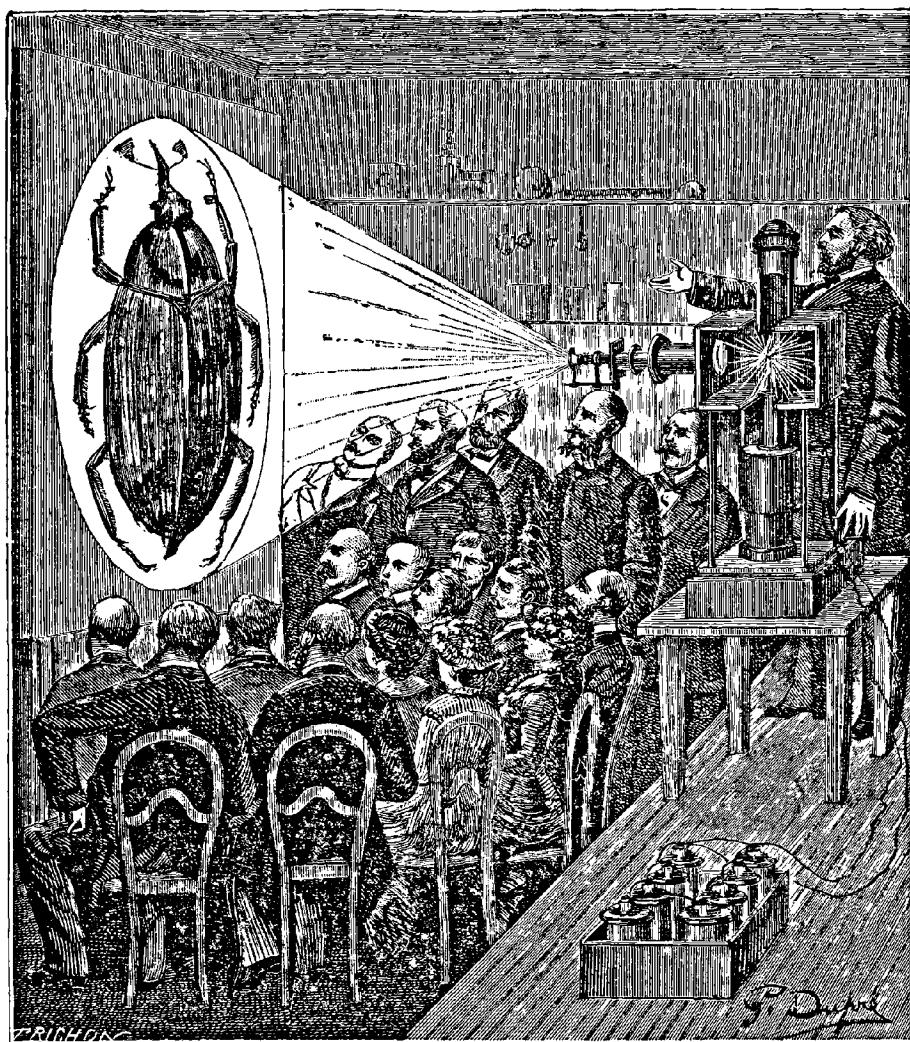
Sir Henri Bessemer s'occupe également, en Angleterre, de la construction d'un télescope qui, par ses dimensions et sa portée, rivalisera avec les plus grandes lunettes astronomiques actuellement existantes. Le miroir, de 1<sup>m</sup>,22 de diamètre, ne sera pas en métal, mais bien en verre argenté. Avec cet instrument, on pourra observer tous les points du firmament sans attendre le mouvement de la terre. A tous les instants de la nuit, on pourra étudier les astres sans escalader de longues échelles, sans être obligé de se coucher ou de prendre une position incommode. La chambre d'observation, avec son plancher, ses fenêtres et son dôme, sera mobile et pourra évoluer automatiquement avec le télescope. Le miroir aura la forme parabolique, au moyen d'un travail très précis.

**INSTRUMENTS DE PROJECTION : CHAMBRE NOIRE. — MÉGASCOPE. — CHAMBRE CLAIRE.** — La *chambre obscure*, comme l'indique son nom, est une boîte entièrement fermée à la lumière, excepté par une ouverture très petite qui donne passage à un rayon. Les expériences relatives à la *propagation* et à la *dispersion* de la lumière se font au moyen de la *chambre noire* (pages 384 et 434). Nous avons donc vu déjà que les images s'y reproduisent avec leurs couleurs, dans des dimensions réduites et renversées.

Ce fut J.-B. Porta, dit M. Hoefler, qui paraît avoir eu le premier l'idée de disposer une chambre complètement obscure, de manière à servir à des expériences d'optique. Dans le xvii<sup>e</sup> chapitre de sa *Magie naturelle*, ce physicien raconte comment, sans autre préparation qu'une ouverture pratiquée à la fenêtre d'une *chambre obscure*, on voit se peindre au dedans les objets extérieurs avec leurs couleurs naturelles; puis il ajoute : « Mais je vais dévoiler un secret dont j'ai toujours fait un mystère avec raison. Si vous adaptez une lentille de verre à l'ouverture, vous verrez les objets beaucoup plus distinctement, et au point de pouvoir reconnaître les traits de ceux qui se promènent au dehors, comme si vous les voyiez de près. » Cependant un certain nombre d'historiens attribuent cette invention à un autre Italien, Capnutlo, ou à l'illustre Léonard de Vinci, lequel, on le sait, fut un grand physicien en même temps qu'un peintre admirable. Une lettre, récemment publiée par le *Cosmos*, fait honneur de cette découverte à Képler. Voici cette lettre, écrite à lord Bacon par sir Henri Voolton :

« J'ai passé une nuit à Lintz, la métropole de la haute Autriche... J'y ai trouvé Képler, un homme fameux dans les sciences, comme Votre Seigneurie le sait, à qui j'ai proposé d'adresser un de vos livres, afin qu'il voie que l'Angleterre possède des hommes capables d'honorer leur souverain, comme il honore le sien par son *Harmonices*. J'ai vu, dans son cabinet, un dessin de paysage sur papier qui m'a beaucoup intrigué, et qui était fait de main de maître; je lui ai demandé qui l'avait fait. Il m'a répondu par un sourire tel, que j'ai dû conclure que c'était lui, et il se hâta d'ajouter qu'en faisant ce dessin il n'avait pas agi en peintre, mais en mathématicien. Ceci me plaça sur le gril. Il m'apprit enfin qu'il avait une petite tente portative (de quelle matière? cela importe peu) qu'il peut établir spontanément en pleine campagne, où il lui plaît, qui tourne comme un moulin à vent, qui peut regarder tour à tour tous les points de l'horizon, exactement fermée et sombre, à l'exception d'un petit trou d'un pouce et demi de diamètre; à ce petit trou se trouve adapté un long tube perspectif, avec un verre convexe appliqué à celle de ses extrémités par laquelle il entre dans le trou, avec un verre concave à l'autre extrémité qui pénètre dans l'intérieur de la tente presque jusqu'à son milieu, et par lequel les radiations visibles de tous les objets extérieurs sont introduites et

vont tomber sur une feuille de papier tendue pour les recevoir. Rien n'est plus simple alors que de suivre avec un crayon ou avec une plume tous les contours du dessin et de le reproduire dans sa vérité naturelle. Quand il est fixé, on fait tourner la tente doucement, on prend une nouvelle vue du paysage, et l'on peut ainsi



Expériences de projections au moyen du microscope photo-électrique (page 491).

dessiner tout l'horizon. J'ai cru devoir envoyer cette description à Votre Seigneurie, parce que je pense que cet appareil pourra rendre de bons services pour la chorographie. Il serait peu généreux de l'employer à faire des paysages, car aucun peintre ne pourrait alors lutter avec la nature. »

PHYS. ET CHIM. POPUL. — ALEXIS CLERC.

Liv. 164.

Les physiciens songèrent bientôt à réduire la *chambre obscure* à un petit espace, et à faire des instruments portatifs, de formes et de dimensions variables. La *chambre noire* de 'S Gravesande a la forme d'une chaise à porteurs; le dessus est arrondi en arrière, courbé en avant et saillant

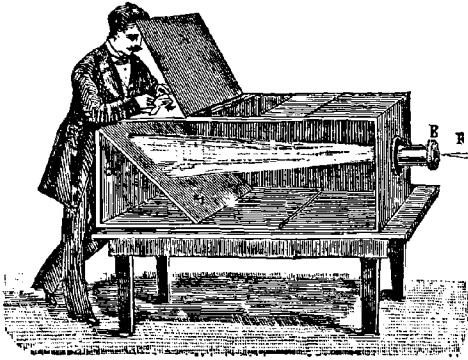


Fig. 209.

CHAMBRE NOIRE DES DESSINATEURS.

vers le milieu; mais son volume et sa lourdeur la rendaient incommode. L'abbé Nollet imagina une chambre noire beaucoup plus légère; elle a la forme d'une boîte de peu de volume et facile à transporter. C'est sur ce modèle qu'ont été faites depuis toutes les *chambres noires*, plus ou moins modifiées dans leurs détails, selon l'usage auquel on les destine. Celle dont on se sert pour dessiner, et qui est, à peu de chose près, semblable à celle des photographes, se compose d'une boîte rectangulaire en bois (*fig.* 209), dans laquelle pénètrent les rayons lumineux R, à travers une lentille B, tendant à aller former une image sur la paroi opposée O, placée à une distance de la lentille B égale à la distance focale. Mais comme les rayons rencontrent une plaque de verre dépoli M, inclinée à  $45^\circ$ , ils changent de direction et l'image se peint sur une autre plaque de verre dépoli N. En plaçant sur celle-ci une feuille de papier à calquer, on peut suivre avec un crayon les contours de l'image et la dessiner fidèlement. Une planchette A empêche que la lumière n'éclaire trop la plaque N et conséquemment n'efface l'image projetée. La boîte se compose de deux parties qui peuvent rentrer l'une dans l'autre, de sorte qu'en tirant plus ou moins la première l'image se reproduit, en vertu des lois de la réflexion, sur la plaque N, quelle que soit la distance de l'objet examiné.

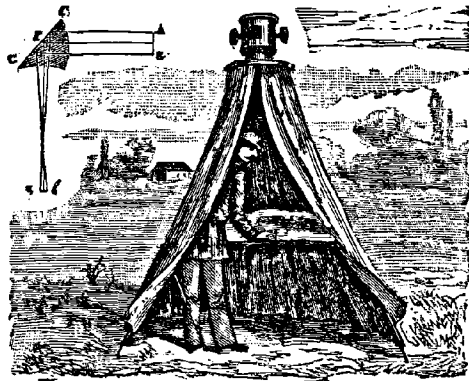


Fig. 210.

CHAMBRE NOIRE PORTATIVE.

Si l'on désire que la *chambre noire* soit portative, on emploie généra-



lement celle de Ch. Chevalier (*fig. 210*), qui se compose d'une tente faite d'un tissu très épais, sous laquelle se place le dessinateur. Au milieu de la tente est une planchette B sur laquelle se projette l'image que l'on veut dessiner. Au haut de la tente, dans un tube de cuivre A, ouvert latéralement, est un prisme de verre qui produit l'effet d'un miroir incliné. En entrant dans le prisme, appelé, à cause de sa forme, *lentiprisme*, les rayons subissent la réflexion totale sur la grande face *dc*; d'abord convergents, ils sont renvoyés sur la face *c* concave d'où ils sortent avec la même convergence que s'ils avaient traversé une lentille, ce qui fait qu'ils vont reproduire en *ab*, sur la planchette, l'image de l'objet A B d'où ils sont partis. C'est ensuite cette image dont le dessinateur prend les contours sur une feuille de papier.

Le *mégascope*, imaginé par Charles en 1780, est une chambre noire destinée à donner des images réduites ou amplifiées d'une gravure, d'une statue ou d'un bas-relief ayant peu d'étendue, et pour cela, portant une lentille achromatique devant laquelle on place l'objet (*fig. 211*). Cet objet est éclairé fortement par un miroir plan, de sorte que son image se reproduit sur une glace dépolie au foyer conjugué de la lentille et permet au dessinateur de copier facilement les traits de l'objet.

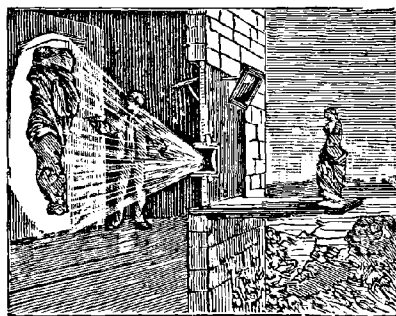


Fig. 211. — MÉGASCOPE.

En 1804, Wollaston inventa la *chambre claire* dont l'idée paraît appartenir à Hooke. La construction de cet instrument, plus avantageux aux dessinateurs que la chambre noire, repose sur le fait suivant : si l'on regarde, à travers une lame de verre inclinée de  $45^\circ$  au-dessus de l'horizon, une feuille de papier placée sur une table, on pourra tracer avec la pointe d'un crayon l'image d'un paysage qui vient s'y peindre. C'est un petit prisme de verre à quatre faces, monté sur un pied vertical, et dont les angles sont combinés de manière à produire une double réfraction totale qui projette l'image sur un écran placé horizontalement. Lüdke, en 1812, et Amici, en 1816, apportèrent diverses modifications à la chambre claire de Wollaston, et en firent un instrument propre à être adapté aux télescopes et aux microscopes.

On peut donner aux *chambres claires* une disposition offrant des avantages bien supérieurs à ceux qu'on leur connaît. Cette disposition a été récemment imaginée par M. Pellerin. On sait que, parmi les chambres claires, les unes affaiblissent considérablement l'une des images, par une

réflexion sur une lame transparente ; les autres exigent qu'on regarde l'objet et le dessin, chacun par une moitié de la pupille de l'œil de l'observateur, ce qui ne laisse pas d'être fort gênant. La chambre claire nouvelle donne deux images de même intensité, et qui sont visibles en même temps par toute la pupille. Elle se compose d'une chambre claire de Wollaston, faite d'un verre d'indice supérieur à l'indice extraordinaire du spath, qu'on accole à l'une des faces de l'angle de  $135^\circ$  ; d'une lame de spath et d'un prisme de même matière que la chambre, ayant sa

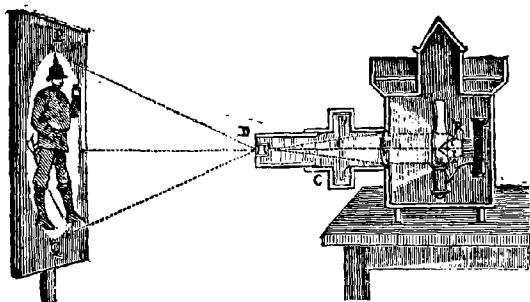


Fig. 212. — LANTERNE MAGIQUE.

seconde face parallèle à la face de sortie des rayons. Ainsi, sous une inclinaison convenable, la moitié de la lumière venant de l'objet sera réfléchié totalement à l'état de rayons extraordinaires. Les fractions réfléchié et transmise seront chacune de moitié, s'il n'y a nulle réflexion

des rayons ordinaires. Cette nouvelle disposition de la chambre claire est certainement appelée à rendre de grands services.

**LANTERNE MAGIQUE. — FANTASMAGORIE. — MICROSCOPE SOLAIRE. — MICROSCOPE PHOTO-ÉLECTRIQUE.** — Le P. Kircher parle, dans la première édition de son *Ars magica lucis et umbræ* (1645), du moyen de faire apparaître sur le mur d'une chambre noire des images de tout genre, en éclairant d'une vive lumière ces images peintes sur un miroir concave. Il comptait beaucoup, rapporte M. Hoeffler, sur l'efficacité de ce procédé, qu'il ne décrit pas autrement, pour convertir les méchants en leur montrant le diable à temps. Ce n'est que dans la deuxième édition de ce même ouvrage (1671) qu'il a donné une description détaillée et le dessin de sa lanterne magique, *lanterna thaumaturga*.

Tout le monde connaît aujourd'hui la *lanterne magique*, qui, non seulement est un jouet d'enfant, mais sert encore quelquefois pour projeter sur un écran des images réduites ou amplifiées afin de les montrer à de nombreux spectateurs ou de les utiliser dans l'art du dessin. Une lampe (*fig.* 212) envoie ses rayons sur une lentille C, et les rayons dirigés en sens inverse sont ramenés sur la lentille par un réflecteur R. Il en résulte un très vif éclaircissement du dessin *U* fait sur une lame de verre, avec des couleurs très transparentes ou des photographies sur verre. Deux lentil-

les  $d$ , placées dans la bonnette D et agissant comme une seule lentille très convergente, projettent sur l'écran PQ l'image agrandie de  $U$ . En enfonçant plus ou moins la bonnette, on fait varier la distance de la lentille  $d$  à l'objet, et l'on amène cet objet et l'écran à coïncider avec deux plans focaux conjugués.

La *fantasmagorie* (du grec *phantasma*, fantôme, et *agoreuo*, parler) est une application de la lanterne magique. Son nom indique que c'est l'art de faire apparaître des spectres, des fantômes, des dieux. Dans l'antiquité, paraît-il, c'est au moyen de la fantasmagorie que l'on effrayait ceux qu'on initiait aux mystères d'Isis et de Cérès, et que l'on faisait apparaître les divinités infernales ou les morts que l'on évoquait (*fig.* à la page 481). Aux temps modernes mêmes, Cagliostro s'en servait pour opérer des prodiges. En 1798, le physicien Robertson ouvrit à Paris un théâtre de fantasmagorie, dévoilant ainsi le secret de ces faiseurs de miracles-là. Pour produire les effets de fantasmagorie, on se sert d'une lanterne magique très puissante, montée sur des roulettes de bois recouvertes de drap pour rouler sans bruit sur le parquet. Un grand rideau de percale sépare de l'opérateur les spectateurs, plongés dans une obscurité profonde. Celui-ci a soin de tenir la lentille projetante éloignée du verre sur lequel sont peints les objets qu'il veut montrer, de sorte que l'image de ces objets se forme très petite sur la toile; alors, rapprochant la lentille du verre peint et en même temps éloignant l'appareil, l'image projetée croît progressivement et finit par prendre des proportions considérables. Les spectateurs trompés croient alors que l'objet se rapproche d'eux en même temps que ses proportions augmentent.

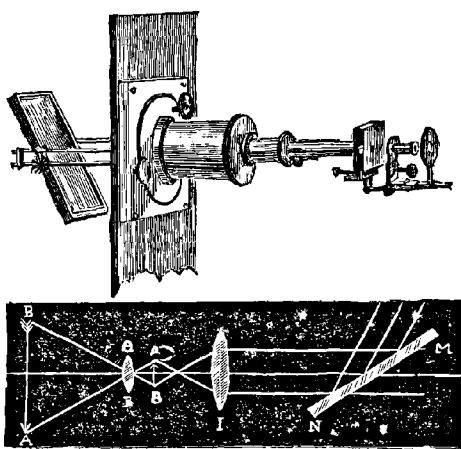


Fig. 213. — MICROSCOPE SOLAIRE.

On peut rattacher à la fantasmagorie les *ombres chinoises*, spectacle qui est encore, et depuis un temps immémorial, le plaisir des Orientaux, et surtout des Chinois, et qui consiste à faire agir derrière une surface transparente, comme du papier huilé, des images découpées. On se rappelle que ce spectacle, qui fut jadis la joie des enfants, fut introduit en France, en 1784, par le sieur Séraphin, établi au Palais-Royal, à Paris.

La lanterne magique conduisit en 1748 Lieberkuhn, physicien berlinois (1711-1756), à l'invention du *microscope solaire*. Successivement perfectionné par Æpinus, Adams et Euler, cet instrument (*fig. 213*) ne diffère de la lanterne magique qu'en ce qu'il est éclairé par les rayons solaires introduits dans une chambre obscure au moyen d'un miroir plan MN, et qui se trouvent ainsi réfléchis horizontalement. Le faisceau lumineux rencontre une lentille convergente I, appelée l'*illuminateur*. A peu de distance du foyer de cette lentille, on dispose l'objet transparent AB, qui se trouve ainsi très vivement éclairé. Une lentille O très convergente reçoit le faisceau lumineux, et projette sur un écran l'image AB'. Une crémaillère, mue par une roue dentée, permet de déplacer la lentille O, de façon que l'objet et l'écran soient sur deux plans focaux conjugués. On peut aussi déplacer l'illuminateur pour produire un éclairage convenable. D'ailleurs, cet illuminateur est formé d'ordinaire de deux lentilles, et la lentille O est aussi remplacée par un système de plusieurs verres convergents. On a ainsi plus de concentration, et l'on évite l'emploi de lentilles à faces trop bombées. Le porte-objet est une simple pince métallique.

Le *microscope photo-électrique*, dont l'usage s'est tant répandu depuis quelques années (*fig. à la page 489*) n'est qu'un microscope solaire dans lequel la lumière électrique remplace celle du soleil. Cette lumière est bien préférable à cause de son intensité, de sa fixité, et surtout à cause de la facilité avec laquelle on peut la produire à n'importe quelle heure.

**DAGUERRÉOTYPE. — PHOTOGRAPHIE.** — Dès 1770, le célèbre chimiste Scheele avait remarqué que le chlorure d'argent, qui se conserve blanc dans l'obscurité, noircissait à la lumière, et que, grâce à cette propriété, on pouvait reproduire des images; en plaçant, en effet, sur une feuille de papier enduite de cette substance, un dessin et en l'exposant à la lumière solaire, de sorte que les parties sombres soient interceptées, le papier préparé noircissait aux points correspondant aux points sombres du dessin, tandis que les autres demeuraient blancs. D'après cela, sur une seconde épreuve on obtenait les teintes inverses, c'est-à-dire semblables au dessin original; mais ces épreuves ne pouvaient persister que dans l'obscurité; au soleil, les parties blanches noircissaient et le dessin était détruit.

Il fallait trouver un procédé pour obtenir les images directement, et pour les rendre fixes, une fois qu'elles avaient été obtenues. Charles, en France, Wedgwood et Davy, en Angleterre, cherchèrent vainement à

résoudre le problème ; l'honneur d'y parvenir appartient à deux Français, Niepce (1) et Daguerre (2).

Ces deux hommes cherchaient chacun de son côté et sans se connaître, lorsque Ch. Chevalier, leur confident à tous les deux depuis plusieurs années, apprit à Daguerre qu'il avait un concurrent. Celui-ci, inquiet, écrivit à Niepce ; une correspondance s'établit entre eux ; en 1827, Daguerre n'avait encore rien trouvé, tandis que Niepce parvenait déjà à reproduire sur des écrans convenablement disposés des points de vue d'après nature ; seulement, il lui fallait dix ou douze heures pour y arriver. En 1829, les deux chercheurs s'associèrent enfin pour continuer ensemble leurs recherches.

Niepce fixait l'image au moyen du *bitume de Judée*, matière noire, qui, exposée à la lumière, se modifie et perd sa solubilité dans les alcools. Il appliquait une couche de cette matière sur une lame de cuivre recouverte d'argent et plaçait cette lame au foyer de la chambre obscure. Après une longue exposition, il retirait la plaque et la plongeait dans un mélange d'huile de pétrole et d'essence de lavande. Les parties influencées par la lumière demeuraient intactes, les autres se dissolvaient. Ainsi modifié, l'enduit de bitume représentait les clairs ; la plaque métallique dénudée représentait les ombres ; les parties de l'enduit partiellement dénudées répondaient aux demi-teintes. Malheureusement, à cause de la lenteur avec laquelle le bitume de Judée se modifiait, le soleil, poursuivant sa route, déplaçait les lumières et les ombres. Daguerre, ayant eu connaissance des procédés de Niepce, les perfectionna aussitôt. Il remplaça le bitume de Judée par l'*iode*, corps solide, qui répand constamment des vapeurs, même à la température ordinaire : en exposant les plaques argentées à ces vapeurs, il suffisait de deux minutes pour que l'iode s'unît à l'argent en une couche excessivement mince. La plaque est alors impressionnable à la lumière, de sorte que, placée dans la *chambre noire*, au foyer du verre lenticulaire par lequel entrent les rayons lumineux, elle reçoit leur action. Pour que l'image produite devînt visible, Daguerre exposait quelque temps la plaque à des vapeurs de mercure.

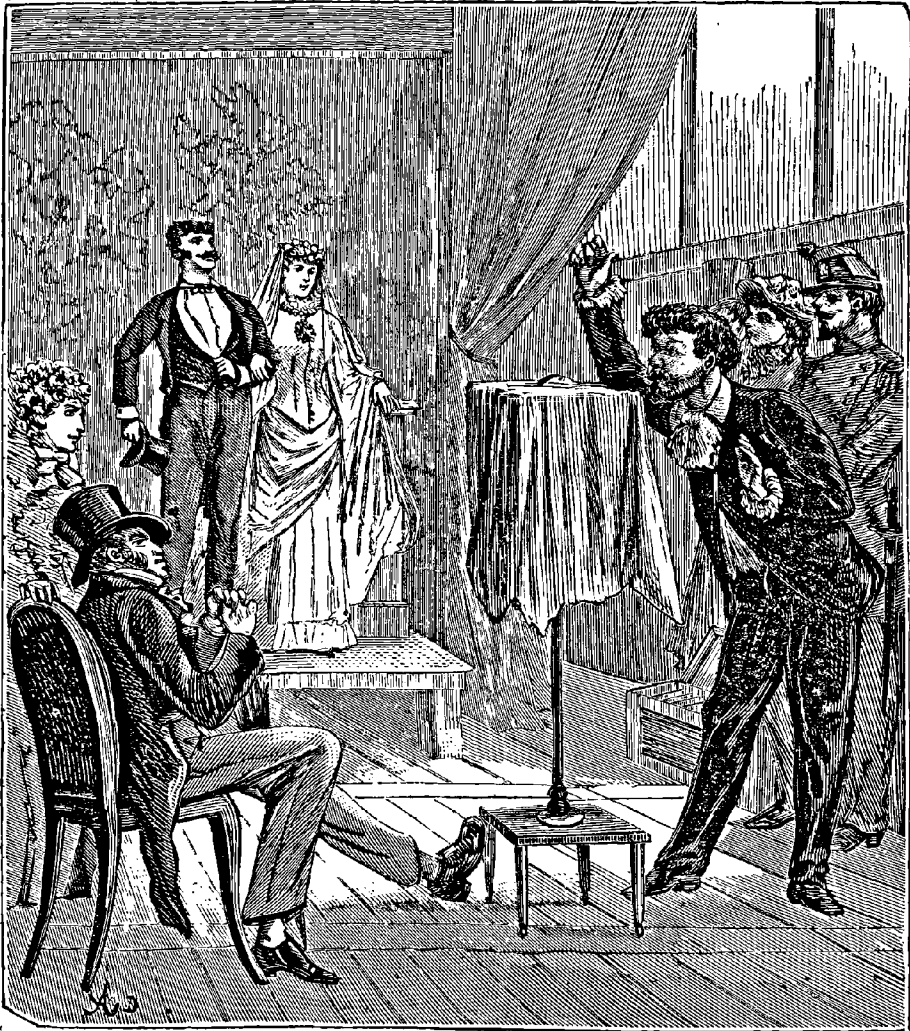
(1) NIEPCE (Joseph-Nicéphore), d'abord militaire, fit la campagne d'Italie, et, en 1794, fut nommé préfet du district de Nice. En 1802, il se retira à Châlon-sur-Saône, sa ville natale, et s'occupa d'industrie avec son frère Claude Niepce. Ce fut là qu'il mourut, après de longues recherches relatives au daguerréotype, quatre ans avant que Daguerre, son associé, eût enfin remporté la victoire due à leurs travaux communs (1765-1833).

(2) DAGUERRE (Louis-Jacques-Mandé), peintre (1784-1851), s'occupait surtout des *panoramas*, qu'il avait perfectionnés avec Bouton, et des *dioramas*, qu'il avait inventés. Il avait déjà une certaine notoriété, lorsqu'il s'associa avec Niepce. Il mourut à Petit-Bry (Seine). Le fond de l'église de ce village est embelli par une superbe peinture due à son pinceau, et représentant la continuation de la nef ; elle est parfaitement éclairée et produit l'illusion que savait faire naître l'illustre artiste.

En se déposant seulement sur les parties qui ont été éclairées, ces vapeurs formaient un amalgame d'argent qui donnait les blancs de l'épreuve, tandis que les autres restaient noires. On débarrassait ensuite la plaque de l'iodure d'argent qui l'imprégnait encore, car cet iodure d'argent aurait noirci sous l'influence de la lumière et fait ainsi disparaître le dessin : pour cela, on plongeait la plaque dans une dissolution d'*hyposulfite de soude*, sel qui a la propriété de dissoudre l'iodure d'argent non impressionné par la lumière.

Le 7 janvier 1839, Arago annonça publiquement à l'Académie des sciences la découverte de Niepce et Daguerre ; malheureusement, le premier inventeur, Niepce, était mort, pauvre et ignoré, laissant même son œuvre inachevée. Le 19 août de la même année, Daguerre rendait publics ses procédés, moyennant une rente viagère dont il porta lui-même le chiffre à 4,000 francs, et autant pour le fils de Niepce ; mais sa part fut portée à 6,000 francs, parce qu'il faisait en même temps connaître ses procédés de peinture pour le *diorama*. La découverte avait été accueillie avec un grand enthousiasme ; et, comme les manipulations qu'exige la pratique n'étaient ni trop difficiles ni trop coûteuses, un grand nombre d'amateurs, artistes, savants, industriels, se mirent à faire de l'*héliographie* (c'était le nom que l'on avait donné au procédé de Niepce avant qu'on l'eût appelé *daguerréotype*). Il en résulta aussitôt une série de perfectionnements à la méthode primitive. D'abord on parvint bientôt à fixer l'image d'une façon durable, et à empêcher en grande partie ce miroitement qui était si désagréable. M. Fizeau, après avoir lavé avec grand soin, dans l'hyposulfite de soude, la plaque impressionnée, versait sur toute la surface une solution mixte de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude ; puis il chauffait l'épreuve par-dessous avec une forte lampe ; peu à peu on voyait l'image s'éclaircir, et, au bout d'une minute ou deux, prendre une grande vigueur. La mince couche d'or qui recouvrait toute l'épreuve en renforçait les tons et empêchait les altérations. M. Fizeau trouva également que le brome, substance liquide qui a beaucoup de rapport avec l'iode, exaltait considérablement la sensibilité des plaques ; en effet, lorsque celles-ci ont été soumises successivement aux vapeurs d'iode et de brome, on obtient des épreuves en quelques secondes. C'était là un immense perfectionnement, car les premières plaques daguerriennes exigeaient au moins dix à douze minutes d'exposition à la lumière solaire, ce qui rendait l'opération inapplicable pour reproduire des portraits ou des objets mobiles. Bientôt on trouva un grand nombre de substances accélératrices, le chlorure d'iode, le bromure d'iode, et plusieurs solutions connues sous les noms de *liqueur allemande*, *liqueur hongroise*, etc.

Deux ans à peine s'étaient écoulés après la vulgarisation des procédés de Daguerre, lorsqu'un amateur anglais, M. Fox Talbot, communiqua à l'Académie des sciences de Paris un procédé qu'il avait trouvé pour



Cette invention, qui fixe le souvenir d'un jour heureux... (page 500).

reproduire directement sur papier les images de la chambre noire. Voici en quels termes la lettre de l'inventeur, lue par Biot, présentait le nouveau procédé :

« On lave, avec une solution de nitrate d'argent dans l'eau pure, un des côtés

PHYS. ET CHIM. POPUL. — ALEXIS CLERC.

Liv. 165.

d'une feuille de papier qu'on marque pour pouvoir le reconnaître, et on la fait sécher doucement. On la plonge ensuite pendant deux minutes dans une dissolution d'iodure de potassium. On forme par le mélange d'une dissolution de nitrate d'argent avec une dissolution saturée d'acide gallique, auquel on ajoute un peu d'acide acétique, du gallo-nitrate d'argent avec lequel on lave le papier ioduré. On plonge le papier ainsi humecté dans l'eau, on le sèche avec du papier brouillard, et l'on a obtenu ainsi du papier *calotype*. On le met au foyer de la chambre obscure : une minute a suffi pour y imprimer l'image, invisible encore, mais qui apparaît dans tous ses détails, lorsque, après avoir lavé une fois le papier dans le gallo-nitrate d'argent, on le chauffe doucement devant le feu. Pour fixer le tableau, il faut l'humecter avec une dissolution de bromure de potassium, le laver encore et le sécher. Les dessins ainsi fixés restent transparents, et l'on peut en tirer des copies, en se servant d'une deuxième feuille de papier *calotype*, qu'on presse contre le tableau et qu'on expose ainsi à la lumière. »

Le procédé de M. Talbot ne commença à être vraiment connu que vers 1845, grâce surtout aux perfectionnements que lui apporta M. Blancquart-Évrard, de Lille; mais la photographie sur papier fut bientôt abandonnée, parce que l'irrégularité de la pâte empêche d'obtenir sur du papier des épreuves à contours nets et arrêtés. La découverte de la *photographie sur verre*, due à M. Niepce de Saint-Victor, ancien officier de dragons, neveu du célèbre associé de Daguerre, et surtout l'emploi du *collodion*, ont fait entrer la photographie dans la voie nouvelle qu'elle parcourt aujourd'hui. Voici quel est ce procédé.

Sur une lame de glace, on étale une couche légère d'un liquide composé d'albumine, obtenue en battant des blancs d'œufs jusqu'à leur réduction en neige; d'*iodure de potassium*, 1 pour 100 : d'eau, 25 pour 100. La glace, recouverte d'une couche bien régulière, est mise à sécher dans l'obscurité, ce qui demande à peu près un jour. On l'immerge alors dans une solution d'*acéto-nitrate d'argent* et l'on a une plaque prête à recevoir l'action de la lumière. Une exposition de 15 à 30 secondes au foyer de la chambre noire suffit. Au sortir de la chambre noire, afin de faire apparaître l'image, on plonge l'épreuve dans une dissolution d'*acide gallique*, qui forme un sel noir, le *gallate d'argent*, dans tous les points que la lumière a frappés. On enlève l'excès du sel d'argent non influencé, on lave l'épreuve dans une dissolution d'*hyposulfite* de soude, et l'on obtient ainsi une *épreuve négative* sur verre, qui sert à tirer ensuite des *épreuves positives*. Pour cela, on place cette épreuve négative sur une feuille de papier imprégnée de chlorure d'argent; on l'expose au soleil pendant 15 ou 20 minutes, puis à la lumière diffuse pendant un temps qui varie entre une demi-heure et quatre heures, et l'épreuve positive est obtenue. On



voit donc que le verre n'est employé que pour obtenir l'épreuve négative, le *cliché*; quant aux épreuves positives, elles sont toujours tirées sur papier. Nous insistons sur ce point, afin que le mot de *photographie sur verre* ne fasse pas supposer à tort que les épreuves définitives sont tirées sur verre.

Depuis 1851, M. Archer, en Angleterre, et M. Le Gray, à Paris, ont proposé de substituer le *collodion* à l'albumine dans la préparation des plaques de verre, et tous les photographes se servent aujourd'hui de cette substance, qui, prodigieusement sensible, permet d'opérer avec une rapidité telle, qu'un portrait s'obtient, pour ainsi dire, d'une façon instantanée. Les procédés de photographie au collodion sont très variés : il ne nous appartient pas d'entrer dans le détail des manipulations qui constituent un art particulier; il nous a suffi d'indiquer les principes généraux de cet art aujourd'hui si répandu. Ajoutons que la grande question, encore aujourd'hui objet de nombreuses études, est toujours la recherche d'une *émulsion photographique*. On appelle émulsion photographique la suspension dans un liquide approprié d'un sel d'argent insoluble très divisé et sensible à l'impression de la lumière. En 1853, Gaudin disait déjà : « Tout l'avenir de la photographie semble résider dans un collodion argentifère composant la matière impressionnable, qu'on pourra mettre en bouteille, et étendre sur du verre, du papier ou une toile cirée, etc., etc., pour obtenir immédiatement ou le lendemain des épreuves positives ou négatives. » Après bien des tentatives pour rendre pratique le *procédé par émulsion*, M. Chardon est parvenu à rendre cette méthode à peu près certaine dans ses résultats. Son procédé a obtenu, en 1878, le prix proposé par la *Société française de photographie*, et a reçu l'approbation de la *Société d'encouragement*.

L'*émulsion sèche* de M. Chardon n'est autre chose que du bromure d'argent pur, mélangé au collodion, c'est-à-dire du collodion contenant dans ses pores du bromure d'argent. Cette substance sèche, étant mise dans des flacons que l'on maintient dans l'obscurité, peut être conservée un temps considérable. Pour donner une idée de la durée de sa conservation, nous dirons qu'on a expédié en Chine des flacons contenant cette substance, et qu'au retour en France, après neuf mois de voyage, aucune modification n'a été constatée dans la sensibilité. Pour faire des épreuves photographiques avec cette *émulsion sèche*, on en dissout 4 grammes dans 100 centimètres cubes d'un mélange d'éther et d'alcool absolu, fait à parties égales. On agite, et au bout de vingt-quatre heures de contact, on filtre le liquide, dont on recouvre les glaces, qu'on met ensuite à sécher. Quand les glaces sont sèches, on peut les employer immédiate-

ment ou plusieurs mois après. On peut développer l'image tout de suite ou longtemps après qu'on la formée. Il est facile d'enlever cette image sur une pellicule de gélatine ou sur une feuille de papier ; ce qui fait éviter les chances de rupture. Le caractère principal de ce nouveau procédé, indépendamment de la facilité de manipulation, c'est de rendre extrêmement facile la création du cliché négatif sur verre, dans les circonstances les plus défavorables.

Les applications de la *photographie* sont aujourd'hui innombrables. Ne serait-ce que dans la simple reproduction des portraits, en permettant de conserver les traits de personnes chéries, bonheur autrefois réservé, pour ainsi dire, aux seuls riches, à cause du prix élevé de la peinture, l'art inventé par Niepce et Daguerre aurait droit à l'admiration reconnaissante des peuples. Qui de nous n'a cent fois béni cette invention, qui fixe le souvenir d'un jour heureux (*fig.* à la page 497), ou qui rappelle éternellement une heure de douleur. Que de mères conservent comme un précieux trésor le portrait d'un petit ange envolé ! Mais la science moderne a utilisé de mille autres façons cette précieuse conquête du génie humain. Appliquée, par exemple, aux œuvres d'architecture, la photographie a un mérite tout particulier. Rien n'égale la beauté et l'effet imposant des grands monuments, exécutés avec toute la majesté de l'ensemble et tout le fini des détails. Citons ce fait curieux. En 1849, au début, en quelque sorte, du daguerréotype, M. Gros, ministre de France en Grèce, avait obtenu, au moyen du nouveau procédé, un point de vue de l'Acropole, ancienne citadelle d'Athènes. De retour à Paris, il eut l'idée d'examiner avec un microscope les détails de cette image. Or, à sa grande surprise, il y reconnut une particularité qu'il n'avait pu apercevoir sur place. Une pierre de l'édifice, située hors de la portée des regards de l'observateur, présentait l'esquisse, tracée en creux, d'un lion dévorant un serpent : le dessin de cette figure indiquait que la partie du monument où elle se trouvait était l'œuvre non des Grecs, mais des Égyptiens. A sept cent lieues de la Grèce, la photographie avait permis de découvrir un détail inaperçu sur les lieux, et qui fournissait le moyen de déterminer l'âge d'un édifice historique.

Arago, dans son rapport sur l'invention de Daguerre, formait le vœu que l'on obtint les images fidèles des milliers d'hiéroglyphes dont sont recouverts les monuments de l'ancienne Égypte. Ce vœu est aujourd'hui réalisé, grâce aux procédés que l'on a imaginés pour agrandir à volonté les épreuves photographiques. On sait, en effet, la fidélité extrême de la photographie : dans un paysage, par exemple, elle reproduit une foule de détails qui échappent à la vue et qui existent dans la nature. C'est ce qui

la rend si précieuse dans ses applications à l'anatomie et à la chirurgie. Dès 1858, le docteur Nélaton obtenait qu'à la clinique de l'École de médecine de Paris fût attaché un photographe chargé de la reproduction des sujets, avant et après les opérations. Ce que le dessin ne pouvait faire qu'approximativement et lentement, la photographie le reproduit instantanément et avec la plus scrupuleuse fidélité, de sorte qu'il est moins regrettable de voir disparaître aujourd'hui des préparations qui souvent ont exigé plusieurs mois de travail. L'étude des tissus végétaux et animaux, celle des êtres infiniment petits que révèle le microscope, reçoivent d'elle un secours immense. Citons, d'après M. Figuier, et entre mille autres, cette application nouvelle et utile de la photographie à la chimie :

Un propriétaire bourguignon, M. Vergnette-Lamotte, le premier, a eu l'idée de photographier les vins. Ce moyen d'investigation permet de reconnaître les qualités propres à chaque vin, la nature des sels qu'il contient, la variété et la force de sa couleur, etc. La photographie révèle les altérations du vin par des changements opérés dans les cristaux et dans sa couleur. Si un vin a été étendu d'eau, ou fortifié avec de l'alcool et du sucre, des cristaux ou des sels plus abondants le témoigneront. La photographie n'est pas seulement applicable aux vins malades ou altérés ; elle sert encore à contrôler les vins additionnés de fuschine ou d'autres matières colorantes ; elle indique leur âge, leur provenance et leur condition. Le vin est une matière végétale soumise à une sorte de mouvement interne de changement avec l'âge et la température. Il a comme une seconde vie dans la barrique et dans la bouteille. La photographie d'un vin, à diverses époques de sa vie végétale, révèle les états successifs par lesquels il a passé. Tous les ans, il subit une transformation que la photographie met en lumière. Cette méthode est donc appelée à rendre des services réels, et à compléter celle du dosage par l'extrait sec.

La géographie, l'ethnologie, l'anthropologie profitent de la photographie. La reproduction des sites, des montagnes, de leur profil, de leurs dispositions, celle des villes, des monuments, des habitants, des objets de toute sorte, ustensiles, armes, etc., seront à l'abri de l'infidélité des dessinateurs, et permettront aux anthropologistes d'avoir une confiance absolue dans les relations des voyageurs.

L'application de la photographie à l'astronomie est une méthode que l'on peut appeler toute française, puisqu'elle a été proposée aux astronomes par M. Faye en 1852. Avec la photographie, on conserve toujours trace du phénomène ; l'observation persiste et elle est automatique ; elle est indépendante du trouble et des illusions de l'astronome. Le phénomène se fixe, et on peut l'étudier à l'aise. Le P. Secchi, le premier, a pris, en 1857,

plusieurs phases lunaires en images photographiques ; entre autres, une de 0<sup>m</sup>,10 prise au septième jour. C'est un commencement de recueil de matériaux pour une *sélénographie* ou géographie de la lune. Mais le but principal était d'étudier le pouvoir chimique de cet astre sur le papier ou le collodion sensible, dans ses diverses phases ; or, le résultat a été que la force lumineuse de la pleine lune est à celle du quartier comme 3 est à 1. Il a pris aussi des images de Saturne et de Jupiter qui sont très bien venues ; et le résultat a été qu'en tenant compte de la grande distance de ce dernier astre au soleil, qui est cinq fois celle de la lune au même foyer, et de la diminution de la lumière en raison du carré des distances, on est obligé d'attribuer *proportionnellement* plus de force à la lumière réfléchie de Jupiter qu'à celle de la lune. « Si la lumière lunaire, ajoute le P. Secchi, exerce une action chimique sur le nitrate d'argent, pourquoi n'en exercerait-elle pas sur les végétaux, et le peuple ne finirait-il pas par avoir raison dans plusieurs de ses croyances à ce sujet ? Il y en a qui pensent que certains légumes se développent trop vite quand ils sont semés à lune obscure ; si le fait est vrai, il se concevrait par cette raison que leur germination commencerait par là même à lune pleine, et que la lumière de l'astre nocturne activerait cette germination, au moins dans les atmosphères pures comme en Italie. »

Ce même savant présenta à l'Académie des sciences un atlas de photographies de la lune et de Mars. Le diamètre de chaque image est de 0<sup>m</sup>,20, et a permis de précieuses constatations. Cependant l'astronomie s'est réduite jusqu'à ces derniers temps à obtenir des images sans l'intervention de la main du dessinateur. Mais l'art photographique s'étend plus loin ; il peut prétendre aujourd'hui à la découverte de phénomènes intimes, moléculaires, que ne décèlent pas les yeux. On n'avait encore vu sur les photographies du soleil que les taches et les facules. Sur ces photographies, la surface de cet astre montrait seulement des marbrures, sans le moindre détail des *granulations* qu'on aperçoit quand on regarde le soleil dans les *lunettes* et les *télescopes*. On ne cherchait même pas à reproduire ces détails si délicats, entrevus dans les circonstances atmosphériques très favorables. M. Janssen a pensé que cette impuissance avait sa source dans le mode suivi jusqu'alors, et non dans l'essence de la méthode photographique. Il a même reconnu que la photographie devait avoir sur l'observation optique des avantages particuliers pour mettre en évidence des effets et des rapports de lumière que la vue ne saurait estimer. L'image du soleil est dans ce cas. Les vrais rapports d'intensité lumineuse de ses diverses parties ne peuvent être perçus, les apparences ne répondant pas à la réalité. De là les opinions si différentes qui ont été émises sur les

formes et les dimensions des granulations et des parties constitutives de la surface solaire. Quand l'image photographique est obtenue dans des conditions bien réglées de l'action de la lumière, elle est affranchie de ces défauts; elle exprime alors très approximativement les vrais rapports d'intensité lumineuse des différentes parties de l'objet. Pour réaliser un résultat aussi précieux, il faut que, pendant l'action lumineuse, la couche sensible reste à très peu près semblable à elle-même, ce qui exige que la portion de la substance photographique influencée pendant toute la durée de la pose ne soit qu'une faible partie de la quantité qui se trouve sur la plaque. Il s'agit donc de *doser* rigoureusement le temps de l'action de la lumière, pour éviter la *surprise* pour les parties les plus brillantes du disque solaire. L'image présentera alors, non seulement les détails dans l'exactitude de leurs contours, mais elle nous instruira aussi sur les rapports très rapprochés de leurs véritables intensités lumineuses. C'est ce dosage exact que M. Janssen a obtenu dans ses appareils photographiques.

La photographie a été utilisée pour le passage de Vénus sur le soleil le 9 décembre 1874, et a donné de bons résultats. Des appareils photographiaient d'instant en instant Vénus sur le disque solaire. Les Américains avaient appliqué la méthode en grand; ils avaient fait construire des lunettes photographiques de 40 pieds de long, d'après un principe indiqué par un Français, le colonel Laussedat. Nos astronomes, entre autres, M. Mouchez, alors capitaine de vaisseau, dont la station était dans l'île Saint-Paul (*fig.* à la page 505), ont mis à l'essai un appareil combiné par M. Janssen, le *revolver photographique*, composé d'un plateau mobile et muni de fentes, qui tourne, entraîné par un mouvement d'horlogerie. Tous les dixièmes de seconde, la fente découvre une portion de plaque sensibilisée et laisse passer l'image solaire qui s'imprime sur la plaque.

C'est encore à un Français, M. Bersh, que l'on doit une branche nouvelle de l'art de Daguerre, la *photographie microscopique*, perfectionnée par MM. Dagron, Mostessier, Lackerbauer, Girard, etc. Tout le monde connaît ces merveilleuses et imperceptibles photographies, qui, enchâssées dans le chaton d'une bague, dans un bijou quelconque, se voient à la loupe avec les dimensions des épreuves ordinaires. Sans parler des reproductions utiles dans la micrographie zoologique et végétale, sans parler de l'application de la photographie microscopique à la chimie pour l'étude des cristaux, à la physiologie, etc., rappelons les immenses services qu'elle a rendus à la France, pendant le siège de Paris, en permettant des relations entre la province et la capitale, un échange de correspondances volumineuses qu'un pigeon emportait sous son aile. Ce furent M. Blaise,

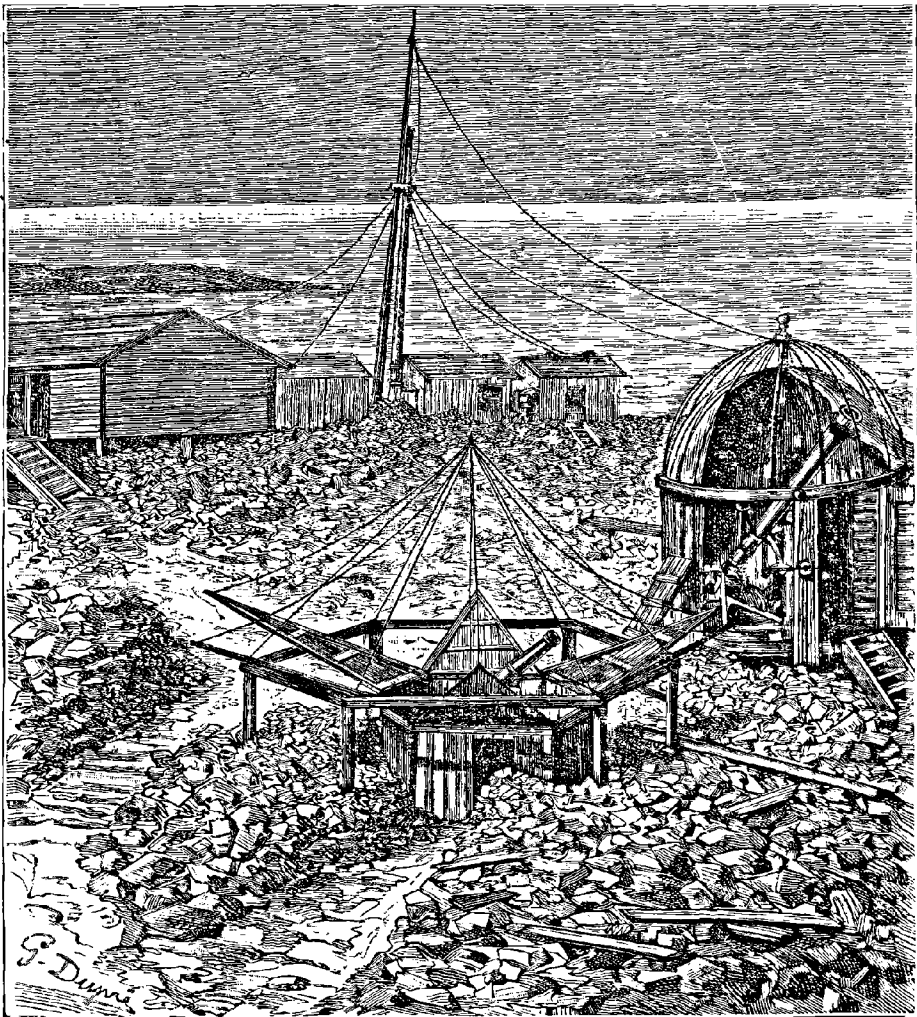
à Tours, d'abord, puis M. Dagron, à Paris, qui organisèrent cette précieuse poste microscopique.

M. Dagron partit de Paris dans le ballon *le Niepce*, le 12 novembre 1870, accompagné de M. Poinsot, artiste peintre, son gendre, de M. Gnocchi, préparateur, de M. Fernique, ingénieur des arts et manufactures, et de l'aéronaute Paganin, marin. *Le Daguerre* s'éleva en même temps avec le complément des appareils de M. Dagron. *Le Daguerre* fut atteint par les balles prussiennes et tomba à Ferrières. *Le Niepce* s'abattit près de Vitry, au milieu des lignes ennemies, mais on put sauver une partie du matériel (1). Malgré de nombreuses difficultés, on parvint néanmoins à suppléer aux appareils manquants et à organiser le service. Grâce aux procédés de l'habile artiste, on put reproduire à Tours, et ensuite à Bordeaux les dépêches privées ou publiques sur une grande feuille de papier à dessin. On y traçait jusqu'à 20,000 lettres ou chiffres. Cette feuille était réduite en un petit cliché qui avait à peu près le quart de la superficie d'une carte à jouer. L'épreuve était tirée sur une mince feuille de collodion qui ne pesait que quelques centigrammes et qui contenait un texte réduit assez considérable pour composer un journal entier. A Paris, la dépêche était agrandie par les procédés ordinaires de grossissement, toutes les lettres reproduites et les correspondances envoyées au public. Quatre cent soixante-dix pages typographiées ont été reproduites par les procédés de MM. Dagron et Fernique. Seize de ces pages tenaient sur une pellicule de 3 centimètres sur 5, ne pesant pas plus d'un demi-décigramme. La réduction était faite au huit-centième. Les seize pages in-folio d'imprimerie de chaque pellicule contenaient en moyenne 3,000 dépêches, et la légèreté de ces pellicules a permis d'en mettre sur chaque pigeon qui les apportait, jusqu'à 18 exemplaires, donnant un total de plus de 50,000 dépêches, pesant ensemble moins de 0<sup>sr</sup>,5. Toute la série des dépêches officielles et privées transmises à Paris pesait en tout 1 gramme.

Aussitôt que le tube était reçu par l'administration des télégraphes, M. Mercadier procédait à l'ouverture en fendant le tube avec un canif. Les pellicules étaient délicatement placées dans une petite cuvette remplie d'eau, contenant quelques gouttes d'ammoniaque. Au sein de ce liquide, les dépêches se déroulaient; on les séchait, on les mettait entre deux verres. Il ne restait plus qu'à les placer sur le porte-objet des *microscopes photo-électriques* de M. Dubosq (*fig.* 214). Quand les dépêches étaient nombreuses, la lecture en était assez lente; mais la pellicule renfermant

(1) *Voyage du ballon le Niepce*, brochure par M. Dagron.

144 pages ou petits carrés, on pouvait la diviser et la lire en même temps avec plusieurs microscopes. Certaines dépêches chiffrées étaient séparées et lues à part par le directeur. Les autres étaient lues et copiées par des



La photographie a été utilisée pour le passage de Vénus (page 503).

employés, qui les envoyaient immédiatement aux divers bureaux de Paris. MM. Cornu et Mercadier perfectionnèrent ensuite le procédé de lecture des dépêches (*fig. 214*). La pellicule de collodion, intercalée entre deux verres, était reçue sur un porte-glace, auquel un mécanisme imprimait un

double mouvement horizontal et vertical. Chaque partie de la dépêche passait lentement au foyer du microscope. Sur l'écran, les caractères se déroulaient suffisamment agrandis pour être lus et copiés. L'installation, la mise en train, duraient environ quatre heures. MM. Cornu et Mercadier tentèrent de photographier directement les caractères projetés sur l'écran. On en serait venu à bout ; mais, les froids rendant l'arrivée des pigeons de plus en plus rare, on ne poussa pas les essais davantage.

Lorsque la commission anglaise vint à Paris apporter le « cadeau de ravitaillement » de la population de Londres, on fit fonctionner devant elle les appareils de M. Dubosq ; elle resta émerveillée. On ne nous contestera pas de longtemps le don de l'invention !

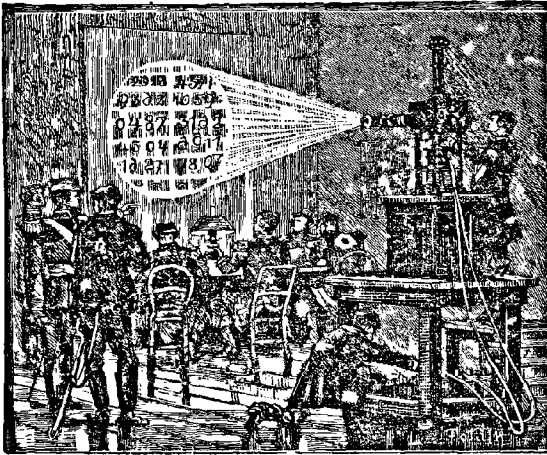


Fig. 214.

LECTURE DES DÉPÊCHES MICROSCOPIQUES.

M. Dagron a appliqué récemment son système de réduction aux cartes d'état-major, dans la création d'un appareil appelé *télé-mètre micrographique*, destiné à permettre à tout le monde de lire sur ces cartes et de se reconnaître dans un

pays dont on ignore les routes et les principaux accidents de terrain. Cet appareil se compose d'une sorte de petite chambre noire, grosse comme un stéréoscope ; on applique l'œil sur l'objectif, et l'on voit se dessiner très grossis tous les détails de la portion de carte que l'on désire étudier. On remarque, en outre, une série de cercles formant échelle concentrique, et donnant immédiatement la distance. La carte, qui a 0<sup>m</sup>,72 de longueur sur 0<sup>m</sup>,30 de largeur, a été réduite au point de tenir sur un verre ou une pellicule de 0<sup>m</sup>,07 de longueur sur 0<sup>m</sup>,05 de largeur. On place ce verre sous un fort microscope, et la carte primitive apparaît notablement amplifiée. En faisant progresser le verre sous le microscope, on fait passer devant l'œil tous les détails du plan.

On connaît enfin les bons résultats que la justice et la police ont retirés de la photographie, soit en prenant le portrait de tout criminel dès son arrestation, de façon à avoir toujours de lui un signalement exact, soit en fixant l'image du cadavre d'une victime, au moment où il est découvert, de sorte que la corruption n'empêche pas de reconnaître ses traits ;



soit en ayant le dessin exact, jusque dans les plus petits détails, des lieux où un crime s'est commis, empreinte des pas sur la neige ou dans la boue, éraflures d'un mur, position d'un meuble hors de sa place ordinaire, etc.

**PHOTOPHONE.** — Nous devons dire ici un mot du *photophone* ; après la fixation des lumières, celle des sons. Certes, l'auteur lui-même de cette importante découverte, Graham Bell, ne s'est point avisé de présenter ses étonnantes expériences comme susceptibles d'applications immédiates ; il s'agit seulement d'expériences théoriques susceptibles évidemment d'applications ultérieures, mais restant aujourd'hui encore dans le domaine des théories, ou, pour mieux dire, des expériences de laboratoire. Nous reproduisons donc seulement le compte rendu de M. Figuiet, qui, en dépit de son lyrisme, est de tous ceux qui ont été publiés, le plus clair, et surtout le plus confiant dans les miracles à attendre de la science.

« M. Graham Bell a justifié avec éclat la haute récompense que la France lui a accordée, en 1880, en lui décernant le prix Volta (*Électricité*, page 336). C'est, en effet, peu après la proclamation du prix décerné à M. Graham Bell que le physicien américain a fait connaître sa prodigieuse découverte du *photophone*... Nous disons sa prodigieuse découverte. Il est impossible, en effet, de concevoir une plus brillante, une plus étonnante création que celle dont M. G. Bell a enrichi la science en 1880. M. Graham Bell a *fait parler la lumière* !

» Ces mots suffisent pour faire apprécier l'immense originalité, et en même temps la portée extraordinaire de cette découverte. Un rayon de lumière vient remplacer, comme transmetteur du son, les corps solides, liquides ou gazeux. Un rayon de soleil ou de lumière électrique fait l'office de conducteur métallique, pour transmettre les sons du téléphone. Est-il possible d'imaginer rien de plus nouveau ? Cela confond l'imagination !...

» Le mot *photophone* est formé de deux mots grecs (*phôs*, lumière, et *phonê*, voix). L'appareil auquel M. Graham Bell a donné ce nom, bien justifié, sert à transmettre les sons, et surtout ceux de la voix humaine, au moyen de la lumière. Les rayons lumineux sont la force en vertu de laquelle le son se transmet à distance. M. Graham Bell a trouvé le moyen de convertir les vibrations lumineuses en vibrations sonores. Il a mis en évidence ce grand fait, que les vibrations lumineuses produisent un son quand elles sont suffisamment rapides. Le principe général du *photophone*, dont la construction a été la conséquence de ce fait fondamental, peut donc se résumer comme il suit :

» Prenons un miroir sur lequel tombe un rayon lumineux et parlons derrière ce miroir ; la surface du miroir réfléchissant variera dans sa forme, sous l'influence des vibrations vocales, et le rayon incident variera d'intensité au point d'incidence, suivant que la courbure du miroir vibrant s'atténuera ou s'exagérera. Si maintenant

on recueille à distance le rayon réfléchi, on y percevra la trace de ces variations d'intensité; et, par des dispositions particulières de l'appareil récepteur, ces variations d'intensité pourront produire, à leur tour, des vibrations sonores, identiques aux vibrations vocales du départ. Les sons de la voix seront donc transmis à distance, sans aucun autre intermédiaire que le rayon lumineux.

» Ainsi, tandis que le *téléphone* nécessite des conducteurs métalliques pour joindre entre elles deux stations en correspondance, dans le *photophone*, le récepteur est tout à fait indépendant du transmetteur. Un faisceau de lumière traversant l'espace d'un poste à l'autre, sans rencontrer d'obstacle opaque, suffit pour produire l'effet cherché. Cette condition n'est même pas absolue; car certaines substances qui forment écran n'empêchent pas toujours les communications verbales de s'établir par l'intermédiaire d'un rayon lumineux.

» Le principe sur lequel est basé le *photophone* était connu depuis un certain temps. En 1873, M. Willoughby-Smith avait reconnu que le corps simple connu sous le nom de *sélénium*, et qui appartient à la famille du soufre, présente une résistance bien plus faible au passage du courant électrique lorsqu'il est exposé à la lumière que lorsqu'il est dans l'obscurité. En d'autres termes, M. Willoughby-Smith avait découvert que le sélénium exposé au soleil est conducteur de l'électricité, et qu'il ne la conduit pas s'il est dans l'obscurité. Bien des essais furent tentés pour mettre à profit cette singulière propriété du sélénium; mais tous furent à peu près vains.

» Pour rendre sensibles les propriétés du sélénium, M. Graham Bell dispose ainsi l'expérience :

» Un crayon de sélénium est placé dans le courant continu d'une pile voltaïque et introduit en même temps dans le circuit d'un *téléphone*, propre à transmettre les sons de la voix. On fait tomber sur le sélénium un faisceau lumineux, que l'on éclipse un grand nombre de fois en une seconde de temps. Ce sont donc des émissions lumineuses successives et très rapprochées. Chacune de ces émissions occasionne une variation dans la résistance électrique du sélénium, et, par suite, dans l'intensité du courant dont le circuit est le siège. Le téléphone, placé dans ce circuit, subit de cette manière des alternatives d'aimantations et de désaimantations correspondantes. Admettons qu'il se produise de la sorte 435 éclairs; il en résultera un nombre égal de variations dans le courant, et la plaque du téléphone récepteur exécutera 435 vibrations, c'est-à-dire la note *la* du diapason normal (*Acoustique*, page 773). Pour transmettre de même la voix humaine, M. Bell dispose deux petites lames voisines et parallèles, percées de fentes étroites, en regard l'une de l'autre, permettant à un faisceau lumineux de les traverser librement. L'une de ces lames est solidaire d'un support fixe; l'autre dépend d'une membrane téléphonique mince à laquelle elle est perpendiculaire. Lorsqu'on parle contre cette membrane, elle vibre et entraîne la lame dans tous ses mouvements. Alors les deux fentes cessent de se correspondre, et le faisceau de lumière est éclipié à certains instants en entier ou partiellement. Ce faisceau subit de la sorte, constamment, des variations dans son intensité, lesquelles correspondent exactement

aux diverses amplitudes des vibrations de la membrane. C'est ce que M. Bell appelle un rayon de lumière *ondulatoire*. L'appareil récepteur est disposé à l'autre station, séparée de la précédente par une distance quelconque. Cet appareil récepteur se compose du sélénium, de la pile et du téléphone articulante. Le rayon *ondulatoire*, dirigé sur le sélénium, l'impressionne à chaque instant, en raison de son intensité. Il en résulte des variations *ondulatoires* dans la résistance du sélénium et des vibrations correspondantes dans le téléphone. Ainsi, on entend avec ce téléphone les paroles prononcées vis-à-vis de la membrane de la première station.

» La meilleure disposition consiste à faire réfléchir le faisceau lumineux sur un miroir plan et flexible, tel qu'une feuille de mica argenté ou de verre mince. On parle alors contre ce miroir, et ce sont les propres vibrations qui modifient constamment la direction du rayon réfléchi. Quant à la source de lumière, on s'est servi du soleil, dont les rayons, concentrés sur le miroir à l'aide d'une lentille, étaient rendus parallèles par une autre lentille aussitôt après leur réflexion. On s'est également servi d'un foyer électrique, et même d'une lampe à gaz ou à pétrole.

» Dans les expériences qui ont été faites à Paris, à la fin du mois d'octobre 1880, dans les ateliers de M. Bréguet, les rayons du foyer électrique étaient reçus sur un réflecteur parabolique, qui les condensait tous en un même point : le foyer de ce miroir. C'est à ce foyer que se trouvait le fragment de sélénium à impressionner. Ce dernier faisait, comme précédemment, partie du circuit d'une pile et d'un téléphone ordinaire.....

» Parmi les conséquences théoriques qui découlent de la découverte du photophone, il faudra enregistrer les suivantes : En premier lieu, on assigne une durée notable à la propagation des sons (*Acoustique*, page 752). Cette proposition serait démentie, puisque la vitesse du son est égale, grâce aux nouvelles dispositions, à celle de la lumière. Le photophone semble mettre aussi en défaut un autre dogme scientifique beaucoup plus absolu. On enseigne, en effet, que les sons ne se propagent pas dans le vide (*Acoustique*, page 744); mais, puisque la lumière se transmet dans le vide aussi bien et même mieux que dans l'atmosphère, est-il possible de dire plus longtemps que le son ne se propage pas dans le vide? Il est de toute évidence que, sur les ailes du nouvel instrument, le son peut traverser l'espace, et aller aussi vite et aussi loin qu'un rayon de lumière.....

» Quel est l'avenir et quelles seront les applications du photophone? L'instrument est bien récent encore pour que l'on se permette des prévisions. Il est, en effet, bien évident que le photophone n'est encore que dans l'enfance, et que de grands et sérieux perfectionnements lui seront apportés. »

M. Bréguet a répété les expériences de Graham-Bell, et a rendu compte le premier, dans la *Revue scientifique* d'octobre 1880, des merveilleux résultats obtenus. Ces études sont aujourd'hui poursuivies avec ardeur par les savants ; mais rien encore n'est venu s'ajouter aux premiers faits acquis.

## CHAPITRE VII

DOUBLE RÉFRACTION — INTERFÉRENCE  
ET POLARISATION

**DOUBLE RÉFRACTION.** — On entend par ces mots la propriété que possèdent un certain nombre de cristaux de donner naissance, avec un seul rayon incident, à deux rayons réfractés, de sorte qu'un objet regardé à travers ces cristaux paraît double. Ce fut Bartholin (Érasme), professeur de géométrie et de médecine à Copenhague, qui, en 1647, observa le premier la *double réfraction* ; mais ce fut Huyghens qui eut la gloire d'en donner une théorie complète.

Les cristaux qui jouissent de cette propriété sont appelés *biréfringents* ; on l'observe à des degrés différents dans ceux qui n'appartiennent pas au système cubique. Les corps qui cristallisent dans ce système, et ceux qui ne cristallisent pas, comme le verre, ne la possèdent pas ; mais ils peuvent l'acquérir accidentellement, quand ils sont irrégulièrement comprimés, ou bien par la température, c'est-à-dire en les refroidissant brusquement après les avoir échauffés. Les liquides et les gaz ne sont jamais *biréfringents* ; et, de tous les cristaux, le spath d'Islande, qui n'est que du carbonate de chaux, est celui dans lequel cette propriété est au plus haut degré. Fresnel explique le phénomène de la double réfraction par une densité inégale de l'éther dans les cristaux biréfringents, d'où résultent des mouvements vibratoires plus rapides dans certaines directions, déterminées par l'état moléculaire du cristal.

Dans les cristaux doués de la double réfraction, il y a toujours une ou deux positions dans lesquelles on observe seulement la réfraction simple, c'est-à-dire que l'on ne voit qu'une image des objets. Ces directions s'appellent *axes optiques*, ou *axes de double réfraction*, expression impropre, puisqu'elle désigne précisément, au contraire, les directions dans lesquelles la double réfraction ne s'observe pas. Les *cristaux à un seul axe* sont ceux qui présentent deux directions. Les premiers sont surtout le spath d'Islande, le quartz et la tourmaline.

Des deux rayons réfractés dans les cristaux à un seul axe, l'un suit les lois de la réfraction simple, mais non l'autre. Le premier est appelé *rayon ordinaire*, l'autre *rayon extraordinaire*, et les images qui leur correspondent portent les mêmes désignations. Ces deux rayons ont des *indices* différents. Fresnel a nommé les premiers *cristaux négatifs*, et les seconds *positifs*. Le spath d'Islande, la tourmaline, le saphir, le rubis, l'émeraude, le mica, le phosphate de chaux, sont négatifs; le quartz, au contraire, est positif. La classe des cristaux négatifs est infiniment plus nombreuse que celle des cristaux positifs.

**LOIS DE LA DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A UN SEUL AXE** — 1° *Le rayon ordinaire, quel que soit le plan d'incidence, suit les lois générales de la réfraction simple (page 410).*

2° *Dans toute section perpendiculaire à l'axe, le rayon extraordinaire suit ces mêmes lois, comme le rayon ordinaire, mais son indice de réfraction n'est pas le même; de là, distinction entre l'indice ordinaire et l'indice extraordinaire.*

3° *Dans toute section principale, le rayon extraordinaire ne suit plus qu'une des deux lois de réfraction, c'est-à-dire que les plans d'incidence et de réfraction coïncident, mais que la relation des sinus des angles d'incidence et de réflexion n'est pas constante.*

4° *La vitesse de la lumière dans un cristal n'étant pas la même pour un rayon ordinaire que pour un rayon extraordinaire, la différence du carré de ces deux vitesses est proportionnelle au carré des sinus de l'angle que forme le rayon extraordinaire avec l'axe.*

**LOI DE LA DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A DEUX AXES.** — Il existe un grand nombre de cristaux de cette espèce, parmi lesquels on compte les sulfates de nickel, de magnésie, de baryte, de potasse et de fer, le sucre, le mica, la topaze du Brésil, etc. Dans ces différents cristaux l'angle des deux axes a des valeurs variant entre 3° et 90°. Fresnel a découvert par la théorie et démontré par l'expérience que, dans les cristaux à deux axes, aucun rayon réfracté ne suivait la loi de réfraction simple, mais, appelant *ligne médiane* et *ligne supplémentaire* les lignes qui partagent l'angle des deux axes et son supplément en deux parties égales, il a établi que : *En toute section perpendiculaire à la ligne médiane, un des rayons réfractés suit les lois ordinaires de la réfraction, et que, dans toute section perpendiculaire à la ligne supplémentaire, il en est de même pour l'autre rayon.*

**DIFFRACTION ET FRANGES.** — La *diffraction* (du mot latin *diffringere*, séparer en rompant) est une modification des rayons lumineux lorsqu'ils rasant les bords d'un corps opaque, ou lorsqu'ils passent par une petite ouverture, modification en vertu de laquelle ils paraissent s'infléchir, se doubler en pénétrant dans l'ombre, et aussi être bordés de diverses couleurs. Pour observer ce phénomène, soit un rayon de lumière solaire pénétrant par l'ouverture très petite de la paroi d'une chambre obscure et reçue sur une lentille convergente L d'un foyer très court (*fig.* 215). On place à l'ouverture de la paroi un verre coloré en rouge pour qu'il ne donne passage qu'à la lumière rouge; un écran opaque *e*, à



Fig. 215. — DIFFRACTION.

bords minces, est placé devant la lentille, au delà de son foyer, interceptant la moitié du corps lumineux, de sorte que l'autre moitié va projeter sur un autre écran *b*, représenté de face en B. Alors,

si l'on observe à l'intérieur de l'ombre géométrique, limitée par la droite *ab*, une lumière jetant un éclat rouge assez vif, on remarque que cette lumière décroît en intensité, à proportion que les points de l'écran sont plus éloignés de la limite de l'ombre, et, dans la portion qui devrait être uniformément sombre, on voit une alternative de *franges* obscures et lumineuses qui vont s'affaiblissant par degrés jusqu'à disparaître tout à fait.

Les différentes couleurs du spectre produisent le même phénomène, avec cette différence que les franges sont d'autant plus étroites, que la lumière est moins réfrangible; d'où il résulte cette dernière propriété que, lorsque l'expérience a lieu avec de la lumière blanche, comme les franges de chaque couleur simple se trouvent séparées à cause de leur inégale diffraction, celles qui apparaissent sur l'écran B sont irisées.

Si, au lieu d'interposer, entre la lentille L et l'écran *b*, les bords d'un corps opaque, on place un objet menu, comme un cheveu ou un fil très fin, non seulement il apparaît des franges alternativement obscures et lumineuses sur les deux côtés de la partie de l'écran qui correspondent à l'ombre géométrique du corps; mais, dans cette ombre même, on aperçoit des alternatives égales de faces obscures et claires, c'est-à-dire qu'il se produit des franges extérieures et intérieures.

Ces phénomènes avaient été décrits pour la première fois par Grimaldi en 1553. Newton, Maraldi, Delisle les étudièrent aussi, et plus récemment Young, Fresnel et Arago. Cette étude, si difficile de la diffrac-

tion, sur laquelle la science est loin d'avoir dit le dernier mot, est très importante, particulièrement dans l'usage du micromètre pour les observations astronomiques,



LES BULLES DE SAVON  
(d'après le tableau de Teniers de la collection du Louvre) [page 513].

**INTERFÉRENCES.** — La découverte des *interférences*, due à Young, lui fut suggérée par ces bulles d'eau savonneuse, si vivement colorées, qui, s'échappant d'un chalumeau, deviennent le jouet des plus imperceptibles courants d'air (*fig.* à la page 513). « Je supposerais, dit Arago, qu'un

physicien eût choisi pour sujet de ses expériences l'eau distillée, c'est-à-dire ce liquide qui, dans son état de pureté, ne se revêt de quelques nuances de bleu et de vert, à peine sensibles, qu'à travers de grandes épaisseurs. Je demanderais ensuite ce qu'on penserait de sa véracité, s'il venait, sans autre explication, annoncer que cette eau si limpide, il peut à volonté lui communiquer les couleurs les plus resplendissantes; qu'il sait la rendre violette, bleue, verte; qu'il sait la rendre jaune comme l'écorce du citron, rouge comme l'écarlate, sans pour cela altérer sa pureté, sans la mêler à aucune substance étrangère, sans changer les proportions de ses éléments constitutifs. Le public ne regarderait-il pas notre physicien comme indigne de toute croyance, lorsqu'il ajouterait que, pour engendrer la couleur dans l'une, il suffit de l'amener à l'état d'une véritable pellicule, pellicule d'une bulle de savon; que *mince* est, pour ainsi dire, synonyme de *coloré*; que le passage de chaque teinte à la teinte la plus différente est la suite nécessaire d'une simple variation d'épaisseur de la lame liquide; que cette variation, dans le passage du rouge au vert, par exemple, n'est pas la millième partie de l'épaisseur d'un cheveu? »

Hooke avait montré que, pour chaque espèce de couleur simple, il existe dans les lames minces de toute nature une série d'épaisseurs croissantes où aucune lumière ne se réfléchit. Ce fait devait donner la clef de tous ces phénomènes. Young fit un pas décisif en assimilant les lames minces à des miroirs épais de même substance. Si, dans certains points (*taches obscures*), aucune lumière ne se voit, il n'en conclut pas que la réflexion y ait cessé: il suppose que, dans les directions spéciales de ces points, les rayons réfléchis par la seconde face, allant à l'encontre des rayons réfléchis par la première, les anéantissent *complètement*. C'est à ce conflit de rayons que Young donna le nom d'*interférence*.

Ainsi, d'après ce principe, la lumière ajoutée à la lumière peut, dans certains cas, produire l'obscurité. L'expérience a démontré qu'il en est ainsi quand deux faisceaux peu inclinés se rencontrent sous un angle très petit. Fresnel a exécuté cette expérience avec de la lumière réfléchie sur deux miroirs plans, inclinés de manière à faire entre eux un angle très obtus. Arago explique par les interférences la scintillation des étoiles.

Nous n'insisterons pas sur ce sujet où le calcul différentiel et intégral a trouvé le plus à s'exercer. Ajoutons que ces phénomènes s'accordent difficilement avec la théorie de l'*émission* de la lumière et qu'ils ont fourni de puissants arguments au système des *ondulations*. Nous indiquerons, d'après M. Cazin, quelques-uns des brillants phénomènes qui s'y rattachent.



Soufflez une bulle de savon à l'extrémité d'un tube à robinet (*fig. 216*), au milieu d'un bocal de verre, afin de le soustraire à l'agitation de l'air et à l'évaporation, et fermez le robinet pour que la contractilité de la pellicule liquide ne chasse pas peu à peu l'air qu'elle emprisonne : vous pourrez conserver la bulle pendant très longtemps, afin de l'observer attentivement. Lorsque la bulle n'est pas très grosse, on aperçoit par réflexion, à son sommet, autour du bord du tube qui la soutient, une suite d'anneaux irisés concentriques. Les anneaux présentent le rouge en dedans; le premier est beaucoup plus éclatant que les autres, qui apparaissent comme de petites lignes circulaires, serrées les unes contre les autres. Au delà de ces anneaux, la pellicule est d'un rouge violacé; plus loin elle est verte. Quand on regarde à travers la bulle, les couleurs sont inverses; les parties qui paraissent rouges par réflexion paraissent vertes par transmission, et *vice versa*. Le bas de la bulle présente des zones horizontales alternativement rouges et vertes.

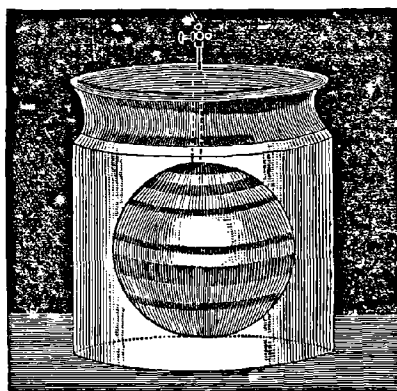


Fig. 216.

COULEURS D'UNE BULLE DE SAVON.

Souvent, avant que tous ces effets soient devenus permanents, on voit ruisseler à la surface de la bulle des filets rouges et verts, indiquant que le liquide s'écoule peu à peu vers le bas de la bulle, et on conclut de là que l'épaisseur de la pellicule décroît d'abord très rapidement à partir du tube, et qu'elle croît ensuite jusqu'au point le plus bas. C'est lorsque l'épaisseur cesse de varier que les couleurs sont fixes. La réflexion des couleurs d'un point à un autre de la pellicule produit une sorte de confusion au premier coup d'œil; mais, avec un peu d'habitude, on distingue les zones alternatives. Si l'on grossit la bulle convenablement, les anneaux du sommet s'élargissent, s'étalent, et l'on en voit de nouveaux se former au bas, qui sont moins éclatants. Les zones supérieures, vues par réflexion, sont alternativement, en partant du tube, vertes, bleues, violettes, rouges, orangées, et les nuances sont d'autant plus vives qu'elles sont plus voisines du sommet. Les effets de la transmission, se mêlant à ceux de la réflexion, produisent alors une splendide apparence. Il est évident que l'épaisseur de la pellicule a diminué par le gonflement de la bulle, et que cette diminution d'épaisseur est liée intimement à l'ordre et à l'intensité des couleurs.

Si l'on continue à gonfler la bulle, les zones alternatives s'éloignent encore du sommet, les couleurs vues précédemment occupent des régions

plus basses, et à leur place on observe, à partir du tube, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, le violet. En même temps, les anneaux du bas de la bulle sont plus larges, moins nombreux, aux nuances plus vives. C'est en ouvrant le robinet et regardant le sommet de la bulle par réflexion que l'on saisit le plus facilement la relation des épaisseurs et des couleurs. L'air de la bulle sort par la contractilité de la pellicule liquide; par conséquent, son épaisseur croît graduellement. On voit alors les couleurs suivantes se succéder vers le sommet avec une intensité décroissante : rouge, violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge, pourpre, bleu, vert, jaune, rouge bleuâtre, vert, rouge violacé, vert, etc. Le robinet étant de nouveau fermé, l'équilibre se rétablit, et les petits anneaux irisés apparaissent, comme au commencement, serrés les uns contre les autres.

Des couleurs analogues à celles des bulles de savon s'observent dans une foule de circonstances, soit lorsqu'on étend une goutte d'essence de térébenthine sur l'eau, soit lorsqu'on appuie une lentille de verre très peu convexe contre un plan de verre, soit lorsqu'une pellicule grasse très mince couvre une vitre, ou qu'une couche d'oxyde forme un vernis transparent à la surface d'un métal. Une condition essentielle est que la pellicule soit transparente et que son épaisseur soit inférieure à quelques millièmes de millimètre.

Newton a découvert les lois de ces phénomènes, en étudiant les effets produits par une lentille de verre posée sur un plan. C'est la pellicule d'air interposée qui se comporte comme la pellicule d'eau d'une bulle de savon. L'épaisseur de cet air croît très régulièrement à partir du point de contact, et les anneaux colorés s'observent soit par réflexion, soit par transmission. Le phénomène (*fig.* 217) est réduit à sa plus grande simplicité lorsqu'on regarde dans la lentille, par réflexion, la flamme de l'alcool, brûlant autour de quelques parcelles de sel marin. Au lieu d'anneaux irisés, on observe des anneaux jaunes, séparés par des anneaux noirs, et leur nombre peut être considérable. Il est alors évident que les rayons, réfléchis aux points qui semblent obscurs, se détruisent en arrivant à l'œil, ou, comme on dit, *interfèrent* entre eux. Considérons un rayon BA qui pénètre dans l'œil, après avoir subi une réflexion à l'extérieur de la couche d'air, et le rayon CA qui a subi une réflexion à l'intérieur de la même couche. Ces deux rayons apportent à l'œil des excitations contraires qui se neutralisent, lorsque l'épaisseur de la couche est convenable. Tel est le point de départ de la théorie de Newton.

L'épaisseur de la couche qui détermine l'interférence n'est pas la même pour tous les rayons simples. Par conséquent, lorsque les rayons solaires sont réfléchis, quelques-uns des rayons simples qui les composent

se neutralisent; tandis que les autres, au contraire, ajoutent leurs effets; de là une couleur composée, formée par l'assemblage de ces derniers. Supposons que le jaune et le bleu ne se neutralisent pas, et que les cinq autres couleurs spectrales se neutralisent, nous aurons une nuance verte, résultant de la superposition dans l'œil des rayons jaune et bleu. Ce raisonnement montre comment les phénomènes en question dépendent de la dispersion et des interférences de la lumière. Le principe des interférences sert encore à l'explication de la couleur des corps opaques vus par réflexion, comme l'ont démontré Fresnel et plus récemment M. Jamin; celle des corps transparents s'explique plus simplement par l'absorption d'une partie des rayons incidents. On voit l'importance du principe des interférences. M. Desains a réussi, dans ces dernières années, à mettre en évidence les interférences de la chaleur rayonnante, et a fourni, par ses expériences, de nouveaux arguments en faveur de l'identité de la lumière et de la chaleur.

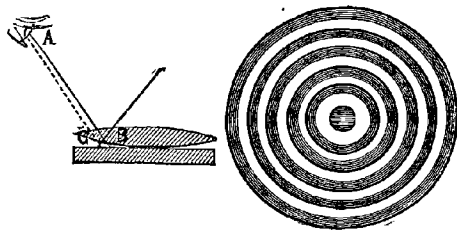


Fig. 217. — ANNEAUX DES LAMES MINCES.

**POLARISATION.** — On désigne sous ce nom un ensemble de propriétés que présentent les rayons de lumière, lesquels, une fois réfléchis et réfractés, deviennent incapables de se réfléchir ou de se réfracter de nouveau dans certaines directions.

L'Académie des sciences avait proposé, le 4 janvier 1808, pour sujet du prix de physique à décerner en 1810, la question suivante : « Donner de la double réfraction que subit la lumière, en traversant diverses substances cristallisées, une théorie mathématique vérifiée par l'expérience. » Malus (1) se mit sur les rangs. De crainte sans doute d'être devancé par un de ses concurrents dans les découvertes qu'il avait faites, il communiqua à l'Académie, dès le 12 décembre 1808, les parties les plus essentielles de son travail.

Une opinion, qui régna pendant plus d'un siècle parmi les physiciens,

(1) MALUS (Étienne-Louis), savant physicien (1775-1814). Entré à dix-sept ans à l'école du génie militaire, il fut un des premiers élèves de l'École polytechnique; servit, comme officier du génie, à l'armée de Sambre-et-Meuse et en Égypte, exécuta des fortifications importantes à Strasbourg et à Anvers, puis fut nommé examinateur à l'École polytechnique, et enfin élu à l'Académie des sciences. Sa mort précoce ne lui a pas permis de donner à ses découvertes tous les développements qu'elles comportaient.

était que la lumière naturelle se compose de parties susceptibles, les unes d'éprouver la réfraction ordinaire, les autres, en nombre égal, la réfraction extraordinaire. Cependant Huyghens avait déjà renversé cette opinion par une expérience très simple, qui consistait à recevoir les deux rayons, ordinaire et extraordinaire, obtenus par un premier cristal, sur un second tout pareil. En faisant faire au second cristal un quart de révolution sur lui-même, sans qu'il cessât de rester parallèle au premier, chacun pouvait s'assurer que le rayon ordinaire y devenait extraordinaire, tandis que le rayon extraordinaire n'éprouvait plus que la réfraction ordinaire. Il fut donc reconnu que le rayon extraordinaire a les propriétés du rayon ordinaire, alors seulement qu'on le fait tourner de  $90^\circ$  sur lui-même ou autour de la ligne de propagation. Ce remarquable résultat, qui devrait faire distinguer, dans les rayons lumineux, des côtés doués de propriétés différentes, fixa particulièrement l'attention de Malus, d'autant plus que l'on croyait encore qu'il ne pouvait être fourni que par le spath d'Islande. C'est en cherchant à approfondir ces phénomènes que Malus parvint à découvrir la *polarisation* de la lumière. Voici comment Arago, ami et collaborateur de Malus, raconte les circonstances de cette importante découverte :

« Malus, qui habitait à Paris une maison de la rue d'Enfer, se prit un jour à examiner avec un cristal doué de la double réfraction les rayons du soleil réfléchis par les carreaux de vitre du Luxembourg (*fig.* à la page 521). Au lieu de deux images intenses qu'il s'attendait à voir, il n'en aperçut qu'une seule, l'*image ordinaire* ou l'*image extraordinaire*, suivant la position qu'occupait le cristal devant son œil. Ce phénomène étrange frappa beaucoup notre ami; il tenta de l'expliquer en supposant des modifications particulières que la lumière solaire aurait pu recevoir en traversant l'atmosphère. Mais, la nuit étant venue, il fit tomber la lumière d'une bougie sur la surface de l'eau sous un angle de  $36^\circ$ , et il constata, en se servant d'un cristal doué de la double réfraction, que la lumière réfléchie était *polarisée*, comme si elle provenait d'un cristal d'Islande. Une expérience, faite avec un miroir de verre sous un angle de  $35^\circ$ , lui donna le même résultat. Dès ce moment, il fut prouvé que la double réfraction n'était pas le seul moyen de polariser la lumière, ou de lui faire perdre la propriété de se partager constamment en deux faisceaux en traversant le cristal d'Islande. La réflexion de la lumière sur les corps diaphanes, phénomène de tous les instants et aussi ancien que le monde, avait la même propriété, sans qu'aucun homme l'eût jamais soupçonné. Malus ne s'arrêta pas là : il fit tomber simultanément un rayon ordinaire et un rayon extraordinaire provenant d'un cristal biréfringent sur la surface de l'eau, et remarqua que si l'inclinaison était de  $36^\circ$  ces deux rayons se comportaient très diversement. Quand le rayon ordinaire éprouvait une réflexion partielle, le rayon extraordinaire ne se réfléchissait pas du tout, c'est-à-dire qu'il traversait le liquide en totalité. Si la

position du cristal était telle, relativement au plan dans lequel la réflexion s'opérait, que le rayon extraordinaire se réfléchît partiellement, c'était le rayon extraordinaire qui passait en totalité. Les phénomènes de réflexion devenaient ainsi un moyen de distinguer les uns des autres les rayons polarisés en divers sens. Dans cette nuit de la fin de l'année 1808, qui succéda à l'observation fortuite de la lumière solaire réfléchie par les fenêtres du Luxembourg, Malus créa une des branches les plus importantes de l'optique moderne. »

Pourquoi ce nom de *polarisation*, donné à l'ensemble de ces phénomènes ? ajoute M. Hoeffler. On dit d'un aimant qu'il a des pôles, entendant par là seulement que certains points de son contour sont doués de propriétés particulières que n'ont pas les autres points du même contour. Partant de là, on peut, avec autant de raison, dire que les rayons ordinaires et extraordinaires, provenant du dédoublement de la lumière naturelle dans le cristal de carbonate de chaux, ont des *pôles*, qu'ils sont *polarisés*. Seulement, pour ne pas outrer l'analogie, il ne faudra pas oublier que, sur chaque élément d'un rayon de lumière polarisée, les côtés ou les pôles diamétralement opposés (par exemple, les pôles nord et sud du rayon ordinaire provenant du cristal rhomboïde placé horizontalement et coïncidant, par sa section principale, verticale, avec le plan du méridien) paraissent avoir l'un et l'autre, contrairement à ce qui a lieu pour les pôles d'un aimant, exactement les mêmes propriétés ; que le rayon ordinaire de ce cristal, soumis à l'action d'un second rhomboïde, semblablement placé (c'est-à-dire dont la section principale soit aussi verticale et située dans le plan du méridien), traverse celui-ci sans se réfracter, mais qu'il acquerra des propriétés différentes, si l'on imprime au second cristal un quart de révolution ( $90^\circ$ ), ou si on le dirige de l'est à l'ouest, le premier cristal étant maintenu dans le plan du méridien (direction du nord au sud).

Trois propriétés de la *lumière polarisée* sont caractéristiques :

1° Un rayon polarisé donne une seule image en passant au travers d'un prisme biréfringent, quand la section principale de ce prisme est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation, tandis qu'il donne deux images plus ou moins intenses dans toutes les autres positions ;

2° Un rayon polarisé n'éprouve aucune réflexion en tombant sur une lame de verre sous un angle de  $54^\circ 35'$ , quand le plan d'incidence sur cette lame est perpendiculaire au plan de polarisation, tandis qu'il se réfléchît partiellement dans d'autres positions ;

3° Un rayon polarisé *s'éteint*, c'est-à-dire ne se transmet pas, en,

tombant perpendiculairement sur une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de polarisation, tandis qu'il se transmet avec une intensité croissante à mesure que l'axe de la tourmaline approche d'être perpendiculaire au plan de polarisation.

L'une quelconque de ces trois propriétés entraîne essentiellement les deux autres ; aussi pour reconnaître si un rayon de lumière est polarisé, peut-on se contenter de l'observer avec une plaque de tourmaline, suffisamment épaisse, taillée parallèlement à l'axe, qu'on fait tourner dans son plan et à travers laquelle on regarde. Quand le rayon incident est complètement polarisé, la lumière disparaît, dès que la section principale de la plaque est parallèle au plan de polarisation ; dans le cas où la polarisation n'est que partielle, on n'aperçoit que des changements d'intensité.

Les circonstances principales qui amènent la polarisation de la lumière sont : la *réflexion*, la *réfraction* et la *double réfraction*.

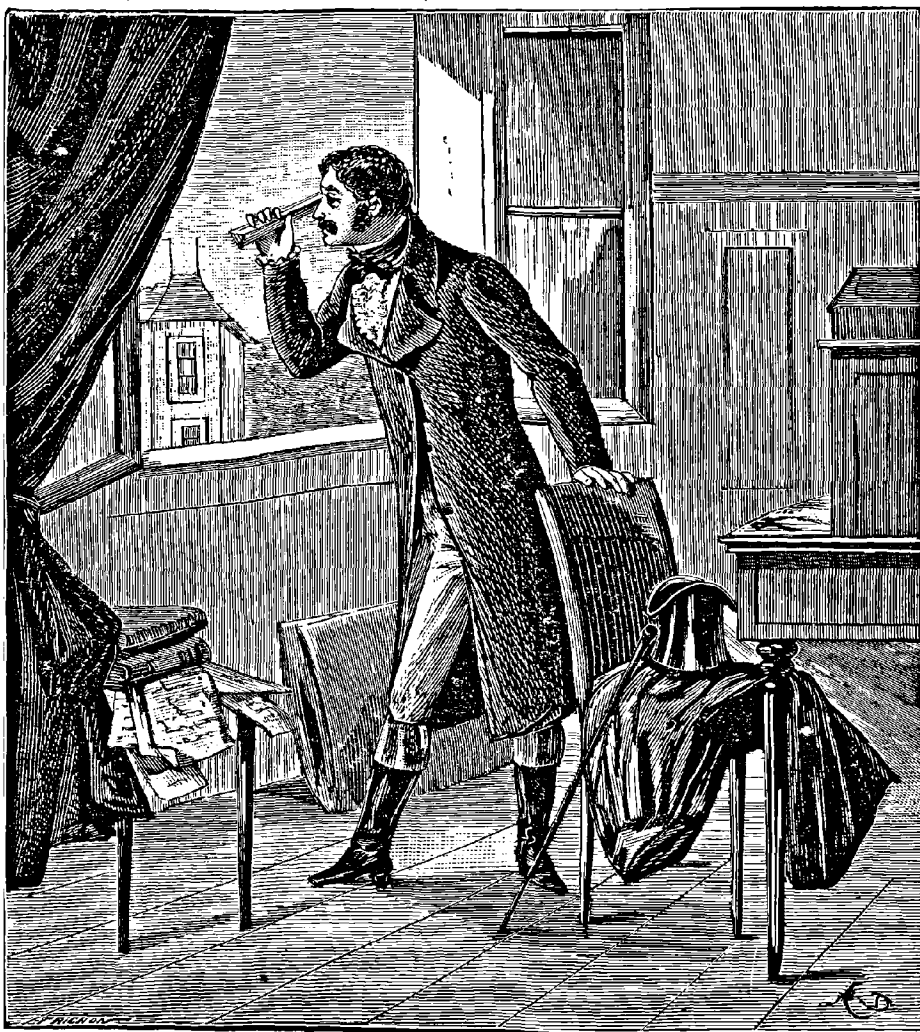
Par *réflexion* : un rayon de lumière qui tombe sur une plaque de verre noirci, en faisant avec la surface de celle-ci un angle d'incidence égal à  $33^{\circ} 25'$  est polarisé. Les substances autres que le verre polarisent la lumière sous des angles différents. On appelle *angle de polarisation* l'angle que doit faire le rayon incident avec la surface réfléchissante, pour que le rayon réfléchi soit polarisé le plus complètement possible, et *plan de polarisation* le plan qui contient le rayon incident et le rayon réfléchi, lorsque la polarisation est complète.

La lumière se polarise par *réfraction*, en traversant une série de plaques de verre à faces parallèles, et son plan de polarisation est alors perpendiculaire au plan d'émergence. Les autres corps transparents et non cristallisés présentent un phénomène analogue ; mais, pour obtenir ce mouvement de polarisation, il faut que l'incidence varie avec la nature de la substance.

Les deux rayons qui, par *double réfraction*, ont traversé un cristal biréfringent sont l'un et l'autre [polarisés, mais chacun dans des plans différents, savoir : le rayon ordinaire dans la section principale du cristal, et le rayon extraordinaire perpendiculairement à cette section.

**POLARISEURS, POLARISCOPES OU ANALYSEURS, POLARIMÈTRES.** — Tous ces instruments d'optique ont pour objet : les *polariseurs*, de polariser la lumière ; les *polariscopes*, de mettre en évidence les phénomènes de la polarisation ; les *polarimètres*, d'en mesurer l'intensité. Les plus simples de tous ces instruments, analogues d'ailleurs entre eux, et les plus employés, sont : le miroir de verre noirci, la plaque de tourmaline,

le prisme biréfringent, le prisme de Nicol et les piles de lames de cristal. Nous avons déjà parlé de quelques-uns de ces appareils ; il nous reste à décrire le *prisme de Nicol*, un des plus précieux *analyseurs*,



Malus... se prit à examiner... les rayons du soleil réfléchis par les carreaux de vitre du Luxembourg (page 518).

parce qu'il est complètement incolore, polarise la lumière, et n'envoie qu'un seul rayon polarisé dans la direction de son axe. Pour le construire, on prend un rhomboèdre de spath d'Islande de 20 à 30 millimètres de haut sur 8 à 9 de large (*fig.* 218), et on le coupe en deux par un plan

passant par l'un des sommets obtus, et dont on a réuni ensuite les deux faces de la section en interposant entre elles une couche de *baume de Canada*. Sachant que l'indice du baume de Canada est moindre que l'indice ordinaire du spath, et plus grand que l'indice extraordinaire, il s'ensuit qu'un rayon lumineux  $SC$  pénétrant dans le prisme, le rayon ordinaire supporte sur la surface  $ab$  la réflexion totale et prend la direction  $CdO$ , de sorte que le rayon extraordinaire  $Ce$  est le seul qui traverse le prisme, c'est-à-dire que le prisme de Nicol, de même que la tourmaline, laisse passer seulement le rayon extraordinaire et peut

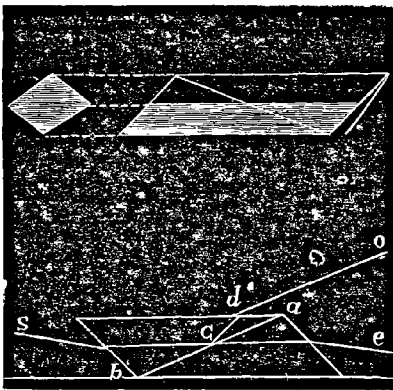


Fig. 218. — PRISMÉ DE NICOL.

ainsi, comme cette dernière substance, servir d'analyseur, et encore être utilisé comme le prisme biréfringent pour obtenir un rayon de lumière blanche polarisée.

Le physicien Noremberg a imaginé un appareil au moyen duquel on peut répéter les expériences relatives à la lumière polarisée. Cet appareil (*fig. 219*) se compose de deux colonnes en cuivre, B et D, qui soutiennent un miroir sans tain N, mobile autour d'un axe horizontal, portant un cadran gradué C, qui

indique l'angle formé par ce miroir avec la verticale.

Entre les pieds des deux colonnes est un autre miroir étamé P, fixe et horizontal, et au haut de l'appareil est un plateau gradué I, dans lequel peut tourner un disque circulaire O, au centre duquel est une ouverture quadrangulaire, avec un miroir de verre noirci M, qui forme avec la verticale un angle égal à l'angle de polarisation.

Enfin, on peut fixer à différentes hauteurs, le long des colonnes, un disque annulaire K, au moyen de vis de pression, et un autre anneau A, soutenu par le premier, peut prendre diverses inclinaisons autour d'un axe et supporter un écran noirci E, ayant une ouverture circulaire à son centre. Ceci posé, comme le miroir N forme avec la verticale un angle de  $35^{\circ} 25'$ , c'est-à-dire égal à celui de polarisation du verre, les rayons lumineux SN, qui le rencontrent sous cet angle, se polarisent en se réfléchissant, dans la direction NP, vers le miroir P, qui les envoie dans le sens PNR, et, après avoir traversé le cristal N, le rayon polarisé tombe sur le miroir noirci M, sous un angle de  $35^{\circ} 25'$ ; ce miroir forme donc exactement le même angle avec la verticale. De sorte que, si l'on fait mouvoir horizontalement le disque O auquel est fixé le miroir M, il



change de place en conservant toujours la même inclinaison, et l'on observe deux positions dans lesquelles le rayon incident ne se réfléchit pas, ce qui arrive quand le plan d'incidence sur ce miroir est perpendiculaire au plan d'incidence SNP sur le cristal N. En toute autre position que le rayon se réfléchit, il est polarisé par le miroir M en quantité variable, en observant que le maximum de la lumière réfléchie est lorsque les plans d'incidence sur les miroirs M et N sont parallèles entre eux. Si M forme avec la verticale un angle plus grand ou moindre que  $35^{\circ} 25'$ , le rayon se réfléchit toujours polarisé en toutes les positions du plan d'incidence.

**POLARISATION CIRCULAIRE OU ROTATIVE.** — Découverte en 1817 par Fresnel et Arago, la *polarisation rotative* provient d'un genre particulier de double réfraction, comme la polarisation ordinaire est donnée par la double réfraction du spath d'Islande. Toute lame d'un cristal à un seul axe, taillée perpendiculairement à cet axe, et qui reçoit normalement un rayon de lumière polarisée, le transmet sans altération. Le quartz fait exception à cette règle : la lumière qui le traverse est encore polarisée, mais dans un autre plan, tourné vers la gauche ou vers la droite, suivant les échantillons. Les diverses couleurs du spectre éprouvent dans leur plan de polarisation des rotations d'autant plus grandes qu'elles sont plus réfrangibles. Biot a reconnu que d'autres corps que le quartz possèdent la propriété de dévier les rayons de la lumière polarisée : telles sont les solutions de sucre de canne, du sucre de raisin, de l'acide tartrique, l'essence de citron, celle de térébenthine, etc. On a utilisé ces phénomènes pour reconnaître les quantités de sucre contenues dans le jus de betteraves, sans avoir recours à l'analyse chimique. L'instrument généralement employé est le *saccharimètre de Soleil*.

On a si souvent à réaliser ce problème dans les sucreries et les raffineries, que les procédés ordinaires deviennent une cause de perte de temps considérable. Voici de quoi se compose l'appareil (*fig. 220*) :

O est une ouverture par laquelle pénètre la lumière d'une lampe ; C' le

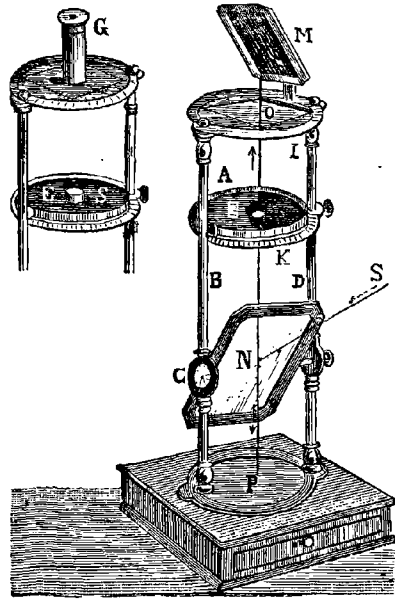


Fig. 219. — APPAREIL DE NOREMBERG.

*prisme de Nicol*, destiné à changer la lumière de la lampe en lumière polarisée, dont le plan de polarisation est connu ; ce prisme, dans la grande figure, est placé en  $p$  ;  $p'$  est une plaque de quartz, dite *plaque à double rotation*. Cette plaque est formée par deux demi-disques de quartz à facettes polyèdres ; l'un de ces disques dévie le plan de polarisation à gauche, l'autre à droite. Cette plaque est figurée en  $C''$  ;  $p''$  est une plaque de quartz de rotation quelconque, mais inverse de celles qui suivent. L'effet de cette plaque est complètement détruit par les plaques

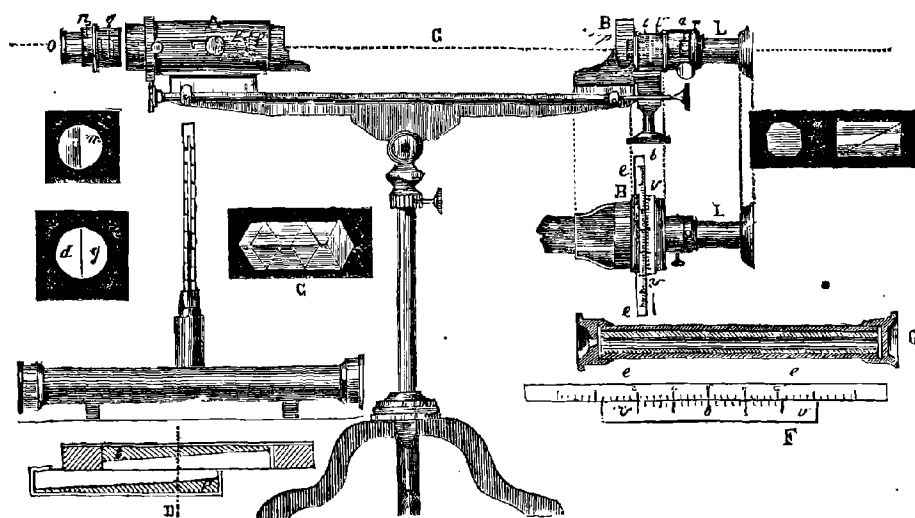


Fig. 220. — SACCHARIMÈTRE DE SOLEIL.

suivantes, lorsque l'échelle de l'instrument marque *zéro*. Sans elle, l'instrument n'aurait pu mesurer que la rotation à droite et à gauche, suivant le sens de rotation des autres plaques ;  $l$  et  $l'$  forment, par leur jonction, une *plaque de quartz à épaisseur variable*, suivant la quantité dont on les fait glisser l'une sur l'autre. La figure D permet de comprendre facilement cet effet. La rotation est inverse de la plaque  $p''$ . A chacun de ces prismes  $l$  et  $l'$  est fixée une échelle, figurée en B et en F et qui permet de lire, à l'aide d'un vernier, quelle est l'épaisseur de la lame  $ll'$  à chaque expérience ;  $a$  ou  $j$  est un prisme biréfringent, qui sert d'analyseur ; L une petite lunette avec laquelle on regarde la plaque à double rotation. A et H sont des tubes que l'on place en C et dans lesquels on introduit les liquides sucrés à analyser.

Si, l'échelle étant à  $0^\circ$ , on regarde dans l'instrument, les deux moitiés de la plaque à double rotation ont exactement la même teinte ;

mais si on vient à placer, sur le trajet des rayons lumineux, le tube G contenant une solution de sucre, la teinte change. En augmentant ou en diminuant l'épaisseur de la plaque D, on parvient à *compenser* l'effet produit par le tube G, c'est-à-dire à rétablir l'identité des teintes. On lit alors le chiffre indiqué par l'échelle F dans une table, dressée dans ce but, pour avoir immédiatement le titre de la solution.

**POLARISATION CHROMATIQUE OU COLORÉE.** — C'est encore à Arago que l'on doit la découverte de la polarisation colorée. Il l'exposa lui-même en ces termes dans un mémoire lu à l'Académie des sciences, le 11 août 1861 (1).

« En examinant, par un temps serein, une lame assez mince de mica, à l'aide d'un prisme de spath d'Islande, j'e vis que les deux images qui se projetaient sur l'atmosphère n'étaient pas teintes des mêmes couleurs : l'une d'elles était jaune verdâtre, la seconde rouge pourpre, tandis que la partie où les deux images se confondaient était de la couleur naturelle du mica vu à l'œil nu. Je reconnus en même temps qu'un léger changement dans l'inclinaison de la lame, par rapport aux rayons qui la traversent, faisait varier la couleur des deux images, et que si, en laissant cette inclinaison constante et le prisme dans la même position, on se contentait de faire tourner la lame de mica dans son propre plan, on trouvait quatre positions à angle droit où les deux images prismatiques sont du même éclat et parfaitement blanches. En laissant la lame immobile et en faisant tourner le prisme, on voyait de même chaque image acquérir successivement diverses couleurs, et passer par le blanc après chaque quart de révolution. Au reste, pour toutes ces positions du prisme et de la lame, quelle que fût la couleur d'un des faisceaux, le second présentait toujours la *couleur complémentaire*, c'est-à-dire celle qui, réunie à l'autre, forme du blanc, en sorte que, dans ces points où les deux images n'étaient pas séparées par la double réfraction du cristal, le mélange de ces deux couleurs formait du blanc. Il est bon cependant de remarquer que cette dernière condition n'est rigoureusement satisfaite que lorsque la lame est partout de la même épaisseur. C'est alors seulement, en effet, que chaque image est d'une teinte uniforme dans toute son étendue ; car, dans les autres cas, elles présentent l'une et l'autre dans des points, même contigus, des couleurs très différentes et disposées d'autant plus irrégulièrement que le mica qu'on emploie a des inégalités plus sensibles. Quoi qu'il en soit, les parties des images qui se correspondent sont toujours teintes de couleurs complémentaires...

» ...On peut donc encore donner aux rayons de lumière une telle modification qu'ils ne ressemblent plus ni à la lumière directe ni aux rayons polaires ordinaires : ces nouveaux rayons se distinguent, d'abord de la lumière polarisée en ce qu'ils

(1) Arago, *Mémoire sur la polarisation colorée*. (Mémoires scientifiques, t. I<sup>er</sup>.)

fournissent constamment deux images en traversant un rhomboïde, et puis de la lumière ordinaire, par la propriété qu'ils ont de donner toujours deux faisceaux complémentaires, mais dont les couleurs varient avec la position de la section principale du cristal à travers lequel on les fait passer. Un rayon de lumière, en tombant sur un corps diaphane, abandonne à la réflexion partielle une partie de ses molécules. Un rayon polarisé est transmis en totalité, abstraction faite de l'absorption, lorsque le corps diaphane est situé d'une certaine manière par rapport aux côtés des rayons. Les diverses molécules colorées dont se compose un rayon blanc, lorsqu'il a éprouvé les modifications particulières dont il s'agit ici, ne se réfléchissent que successivement et les unes après les autres, dans l'ordre de leurs couleurs, pendant que le corps diaphane tourne autour du rayon en faisant toujours le même angle avec lui. Par conséquent, si l'on fait tourner un miroir de verre autour d'un faisceau de lumière directe, et si l'on n'altère pas leur inclinaison naturelle, la quantité des rayons transmis ou celle des rayons réfléchis sera la même dans toutes les positions; mais si le faisceau est déjà polarisé, et si, de plus, l'angle d'incidence est de  $35^\circ$ , on trouvera deux positions diamétralement opposées, dans lesquelles le miroir ne réfléchira plus une seule molécule de lumière. Si nous supposons enfin que, toutes les autres circonstances restant les mêmes, le miroir soit éclairé par un faisceau de lumière blanche, déjà modifiée par une plaque de cristal de roche, il sera successivement teint, à chaque demi-révolution, de toute la série des couleurs prismatiques, tant par réflexion que par réfraction, avec cette particularité qu'au même instant ces deux classes de couleurs sont toujours complémentaires. »

Pour écarter toute idée de l'influence qu'aurait pu avoir, sur l'apparition des couleurs, la dispersion de la lumière dans les images prismatiques, Arago employait tantôt un rhomboïde de spath calcaire, tantôt un prisme de cette substance, auquel il avait adossé un prisme de verre ordinaire, afin de le rendre achromatique; les résultats furent toujours les mêmes. Il se demanda ensuite si ses expériences n'étaient pas analogues à celles de Newton : deux lentilles de verre ordinaire ayant été superposées l'une sur l'autre, l'illustre savant ne voyait que cinq ou six anneaux colorés à l'œil nu, tandis qu'à l'aide d'un prisme, il lui arrivait d'en compter plus de quarante. Mais Arago ne tarda pas à reconnaître qu'il n'y a ici aucune identité de phénomènes. Les anneaux colorés de Newton existaient déjà dans la lame d'air comprise entre les deux verres, seulement ils y étaient trop enserlés pour qu'on pût les distinguer à l'œil nu : le prisme employé n'avait donc pour effet que de séparer les orbites des divers anneaux, en déviant inégalement les rayons différemment colorés. Rien de pareil n'a lieu dans la mémorable expérience d'Arago. Si les couleurs n'eussent été invisibles dans le mica, à l'œil nu, qu'à cause de leur mélange, on ne les aurait pas aperçues davantage en examinant

le mica au travers des faces parallèles d'un rhomboïde de carbonate de chaux ou avec un prisme achromatisé; car, dans ces deux circonstances, les rayons de diverses couleurs ayant été également réfractés, les teintes auraient été aussi mélangées dans les deux images du rhomboïde que dans la plaque de mica elle-même vue à l'œil nu (Hœffer).

L'instrument dont on se sert pour expérimenter la polarisation chromatique est la *lunette de Rochon*, instrument qui se compose simplement d'une lunette ordinaire à l'intérieur de laquelle est placé un prisme de cristal de roche ou de carbonate de chaux. Ce prisme est achromatique et mobile le long de l'axe, ce qui donne le moyen de séparer plus ou moins complètement les deux images de l'objet auquel on vise. En disposant l'axe optique de la lunette de manière à faire un angle de  $35^\circ$  environ avec la surface d'un miroir non étamé, on voit chaque image disparaître deux fois pendant une révolution complète de l'instrument. La lunette étant dans l'une de ces positions, où l'on ne voit qu'une seule image, si l'on interpose une plaque de mica, on en verra aussitôt deux, dont les couleurs complémentaires dépendront de l'inclinaison de la lame interposée et de son épaisseur.

**POLARISATION DE LA CHALEUR.** — La chaleur, de même que la lumière, peut polariser par réflexion et par réfraction; mais les expériences sont plus difficiles. Bérard fit les premières en 1810 avec Malus, et les continua seul, après la mort de son collègue. Dans ces expériences, les rayons, réfléchis sur un premier miroir, étaient reçus sur un second, comme dans l'appareil de Noremberg, et tombaient ensuite sur un petit réflecteur de métal qui les concentrait sur la boule d'un thermomètre différentiel; Bérard observa alors un minimum d'intensité quand le plan de réflexion sur le second miroir était perpendiculaire au plan de réflexion sur le premier. Ce phénomène étant le même que celui présenté par la lumière dans la même expérience, Bérard en tirait la conclusion que la chaleur se polarisait en se réfléchissant sur le premier miroir. Melloni appliqua son thermo-multiplicateur à l'étude de la polarisation de la chaleur, et, en faisant passer les rayons caloriques à travers deux tourmalines parallèles ou deux piles de mica, comme dans les expériences citées ci-dessus (*Chaleur*, page 454), il a démontré qu'ils se polarisaient par réfraction, et que l'angle de polarisation était sensiblement le même pour la lumière et pour la chaleur, ce qui démontre encore l'identité de ces deux fluides.

**CONCLUSION.** — En terminant cet exposé des principes et des appli-