

TRAITÉ
ÉLÉMENTAIRE
DE PHYSIQUE

Les paragraphes et les chapitres marqués d'un astérisque (*) ne sont pas compris dans le programme d'enseignement des lycées; mais ils le sont dans les programmes des Facultés de médecine et des Facultés des sciences.

Quant aux paragraphes imprimés en petit caractère, les uns, contenant des formules et des problèmes, seront omis par les lecteurs peu familiarisés avec le calcul algébrique; les autres, ne faisant pas partie du programme, et comprenant la *capillarité*, la *diffusion*, la *diatyse*, l'*occlusion*, la *dissociation*, la *vision*, la *polarisation*, le *diamagnétisme*, etc., s'adressent aux lecteurs qui veulent acquérir des connaissances générales sur toutes les branches de la physique.

Les nombres placés au-dessous des dessins, à droite des numéros d'ordre, indiquent, en centimètres, la hauteur des appareils, ou leur longueur dans le sens horizontal, suivant que ces nombres sont précédés des lettres *h* ou *l*.

Tous nos dessins étant originaux et pris, en général, dans notre cabinet de physique, la reproduction en est interdite et sera poursuivie en contrefaçon; il en sera de même, en vertu des traités internationaux, de toute traduction non autorisée par l'auteur.

OUVRAGE DU MÊME AUTEUR :

COURS DE PHYSIQUE

PUREMENT EXPÉRIMENTALE ET SANS MATHÉMATIQUES

À l'usage des gens du monde, des candidats au baccalauréat ès lettres, des écoles normales primaires, des institutrices, des pensions de demoiselles, etc.

Ouvrage de luxe, orné de 396 magnifiques gravures
et d'une planche coloriée

SIXIÈME ÉDITION

Malgré l'augmentation du papier, les prix des deux ouvrages
ne sont point changés et restent :

pour le TRAITÉ DE PHYSIQUE, 17^e édition. 7 fr. »
et pour le COURS DE PHYSIQUE, 6^e édition. 5 fr. 50

Mêmes prix par la poste, en adressant *franco* un mandat de poste de 7 fr.
ou de 5 fr. 50, à M. Ganot, 8, rue du Jardinet,
derrière l'École de Médecine (maison du brocheur) à Paris.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE

EXPÉRIMENTALE ET APPLIQUÉE

ET DE

MÉTÉOROLOGIE

SUIVI D'UN RECUEIL DE 100 PROBLÈMES

Illustré de 831 belles gravures sur bois intercalées

ET D'UNE PLANCHE COLORIÉE

A l'usage des Établissements d'Instruction, des aspirants aux grades des Facultés
et des candidats aux diverses Écoles du Gouvernement

PAR A. GANOT

PROFESSEUR DE MATHÉMATIQUES ET DE PHYSIQUE

DIX-SEPTIÈME ÉDITION

AUGMENTÉE DE NOMBREUX DÉVELOPPEMENTS ET APPAREILS,
SURTOUT EN MÉTÉOROLOGIE :

CONGÉLATEUR DE CARRÉ; CALORIMÈTRE A EAU DE FABRE ET SILBERMANN;
INTERRUPTEUR A MERCURE DE FOUCAULT; SIGNAUX DES PRÉVISIONS DU TEMPS;
THERMOMÈTRE-ENREGISTREUR DE NIAUDET; ÉVAPOROMÈTRE DE PICHE; COLLECTEUR
DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE DE W. THOMSON; ÉLECTROMÈTRE
A RÉFLEXION DU MÊME, MODIFIÉ PAR BRANLY;
ACTINOMÈTRE D'ARAGO, ETC.

PARIS

CHEZ L'AUTEUR-ÉDITEUR

8, RUE DU JARDINET, DERRIÈRE L'ÉCOLE DE MÉDECINE
(maison du brocheur)

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

LIVRE I

MATIÈRE, FORCES ET MOUVEMENT

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES

1. **Objet de la physique.** — La *physique* a pour objet l'étude des phénomènes que présentent les corps, en tant que ceux-ci n'éprouvent pas de changement dans leur composition.

La *chimie*, au contraire, traite particulièrement des phénomènes qui modifient plus ou moins la nature des corps.

2. **Matière.** — On nomme *matière* ou *substance* tout ce qui tombe immédiatement sous nos sens.

Toute substance dont l'analyse chimique n'extrait qu'une seule espèce de matière est élémentaire, ou *simple*. Le nombre des substances simples connues aujourd'hui est de soixante-six; mais il est probable que plusieurs sont composées.

3. **Corps, atomes, molécules.** — Toute quantité de matière limitée est un *corps*. Les propriétés des corps font voir qu'ils ne sont point formés d'une matière continue, mais d'éléments, pour ainsi dire, infiniment petits, qui ne peuvent être divisés physiquement, et sont simplement juxtaposés sans se toucher, étant maintenus à distance par des attractions et des répulsions réciproques qu'on désigne sous le nom de *forces moléculaires*. On sait que l'action répulsive est due à la chaleur; quant à l'action attractive, qu'on désigne sous les noms de *cohésion*, d'*affinité*, la cause en est inconnue, et on l'admet seulement comme un fait.

Les éléments des corps se nomment *atomes*. Un groupe d'atomes

forme une *molécule*, et les molécules, en s'unissant entre elles, constituent les corps. En chimie, atome est souvent synonyme de molécule; c'est-à-dire que l'atome chimique est composé.

On ignore la constitution intime des corps, ne connaissant ni la forme ni le volume des atomes et des molécules, ni la distance qui les sépare, ni les lois des forces qui les régissent. On ne connaît pas non plus leur nombre sous un volume donné; on sait seulement qu'il dépasse extrêmement celui qu'on oserait admettre *a priori* 1.

4. **Masse.** — En physique, on entend par *masse* d'un corps la quantité de matière qu'il contient. En mécanique, cette définition est insuffisante, comme on le verra ci-après (36).

5. **États des corps.** — On distingue trois états des corps :

1° *L'état solide*, qui s'observe, aux températures ordinaires, dans les bois, les pierres, les métaux. Cet état est caractérisé par une cohésion telle entre les molécules, qu'on ne peut les séparer que par un effort plus ou moins considérable. C'est en vertu de cette cohésion que les corps solides possèdent une dureté plus ou moins grande, et conservent par eux-mêmes la forme que la nature ou l'art leur a donnée.

2° *L'état liquide*, que présentent l'eau, l'alcool, les huiles. Le caractère distinctif des liquides est une cohésion si faible entre leurs molécules, qu'elles sont extrêmement mobiles les unes par rapport aux autres; d'où il résulte que ces corps ne présentent aucune dureté et n'affectent aucune forme particulière, mais prennent toujours celle des vases qui les contiennent.

3° *L'état gazeux*, qu'on observe dans l'air et dans un grand nombre d'autres corps qu'on nomme *gaz* ou *fluides aëriiformes*. Dans les gaz, la mobilité des molécules est encore plus grande que dans les liquides; mais leur caractère distinctif est surtout

¹ En effet, A. Dupré, à Rennes, dans ses importantes recherches sur la désagrégation totale et sur les forces de réunion, est arrivé à ce résultat que, dans un cube d'eau ayant pour côté 1 millièrne de millimètre, il entre plus de deux cent vingt-cinq mille millions de molécules (*Théorie mécanique de la chaleur*, par Athanase Dupré, page 404). Dans un travail inédit sur les attractions au contact, le même savant a obtenu une limite 15 fois plus élevée.

De son côté, M. Dumas, dans ses recherches expérimentales sur les ferments, a trouvé récemment que 1 millimètre cube de bière contient 2 772 000 cellules, et que, pour décomposer 1 centigramme de sucre de raisin et produire 5 milligrammes d'alcool environ, il faut 20 ou 30 milliards de cellules. Si l'on observe que la cellule est elle-même composée d'un nombre considérable de molécules, on voit que les nombres de M. Dumas sont de même ordre que ceux de Dupré, et les confirmer (*Académie des sciences* du 5 août 1872). Ces nombres peuvent effrayer l'esprit; cependant il est à remarquer que l'on connaît depuis longtemps en physique, sur la vitesse de la lumière et sur les vibrations des molécules lumineuses, des nombres qui leur sont comparables (484 et 630).

une tendance à prendre sans cesse un volume plus grand, propriété qu'on désigne sous le nom d'*expansibilité*, et qui sera constatée bientôt par l'expérience (131).

Les liquides et les gaz se désignent sous le nom général de *fluides*.

La plupart des corps simples et beaucoup de corps composés peuvent successivement se présenter à l'état solide, liquide ou gazeux, suivant les variations de température. L'eau nous en offre un exemple bien connu.

C'est du rapport entre les attractions et les répulsions moléculaires (3) que dépendent les trois états des corps.

6. Phénomènes physiques. — Tout fait qui s'accomplit sur la matière, sans altération de composition, est un *phénomène physique*. Un corps qui tombe, un son qui se produit, de l'eau qui se congèle, sont des phénomènes.

7. Lois et théories physiques. — On nomme *loi physique* la relation constante qui existe entre un phénomène et sa cause. Par exemple, on démontre qu'un volume donné de gaz devient deux, trois fois moindre, lorsqu'il supporte une pression deux, trois fois plus grande : c'est là une loi physique qu'on exprime en disant que *les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions*.

Une *théorie physique* est l'ensemble des lois qui se rapportent à une même classe de phénomènes. C'est ainsi qu'on dit : la *théorie de la lumière*, la *théorie de l'électricité*. Toutefois cette dénomination s'applique aussi, dans un sens plus restreint, à l'explication de certains phénomènes particuliers. Par exemple, lorsqu'on dit : la *théorie de la rosée*, la *théorie du mirage*.

8. Agents physiques, éther, théorie dynamique. — Comme cause des phénomènes qu'offrent les corps, on admet l'existence d'*agents physiques* ou de *forces naturelles* qui régissent la matière.

Ces agents sont : l'*attraction*, la *chaleur*, la *lumière*, le *magnétisme* et l'*électricité*.

Les agents physiques ne se manifestant à nous que par leurs effets, leur nature nous est complètement inconnue. Sont-ce des propriétés inhérentes à la matière, ou des matières subtiles, impalpables, répandues dans tout l'univers, et dont les effets sont le résultat de mouvements particuliers imprimés à leur masse? Cette dernière hypothèse a d'abord régné seule dans la science, et, sous le nom de *fluides impondérables*, on a longtemps admis plusieurs fluides spéciaux : un pour la chaleur, un autre pour la lumière; deux pour le magnétisme, et deux pour l'électricité.

Cette théorie compliquée des fluides impondérables disparaît de jour en jour. On lui substitue aujourd'hui une double hypothèse : 1^o celle d'un fluide unique, l'*éther*, éminemment élastique, ré-

pandu non-seulement dans tout l'univers, mais pénétrant la masse de tous les corps; 2° l'hypothèse d'un mouvement propre des molécules de la matière, lequel varie de forme et de vitesse, et se transmet à l'éther : tel mouvement d'une nature déterminée constitue la chaleur; tel mouvement plus rapide, la lumière; tel autre, différent de forme ou de caractère, le magnétisme et l'électricité.

Dans cette théorie, qu'on désigne sous le nom de *théorie dynamique*, non-seulement les atomes des corps transmettent le mouvement aux atomes de l'éther, mais ceux-ci le communiquent aux premiers, en sorte que les atomes des corps et de l'éther sont successivement des sources et des réceptifs de mouvement. Tous les phénomènes physiques, rapportés ainsi à une cause mécanique unique, ne sont que des transformations de mouvement.

De cette manière nouvelle d'envisager les phénomènes, est découlée une hypothèse grandiose, celle de la *corrélation* et de l'*unité des forces physiques*. En effet, à mesure qu'on avance dans l'étude des phénomènes physiques, on voit non-seulement le mouvement se transformer en chaleur, et la chaleur en mouvement, mais la chaleur engendrer la lumière et l'électricité, et cette dernière force produire la chaleur, la lumière, le magnétisme et le mouvement.

9. **Divisions de la physique.** — L'étude de la physique présente quatre grandes divisions :

1° Les propriétés générales de la matière, comprenant l'*attraction universelle*, l'*hydrostatique*, la *pneumatique* et l'*acoustique*, qui traite des vibrations des corps élastiques; 2° la *chaleur*; 3° la *lumière*; 4° l'*électricité* et le *magnétisme*.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS

10. **Diverses sortes de propriétés.** — On distingue, dans les corps, des *propriétés générales* et des *propriétés particulières*. Les premières sont celles qui conviennent à tous les corps, sous quelque état qu'on les considère. Celles qu'il importe de connaître dès à présent sont : l'*étendue*, la *divisibilité*, la *porosité*, la *compressibilité*, l'*élasticité*, la *mobilité* et l'*inertie*.

Les propriétés particulières sont celles qu'on n'observe que dans certains corps ou dans certains états des corps; telles sont : la *solidité*, la *fluidité*, la *ténacité*, la *ductilité*, la *malleabilité*, la *dureté*, la *transparence*, la *coloration*, etc.

11. **Étendue.** — L'*étendue* est la propriété qu'a tout corps d'occuper une portion limitée de l'espace.

Un grand nombre d'instruments ont été construits pour mesurer l'étendue. Nous ferons connaître ici le vernier, la vis micrométrique et le cathétomètre.

12. **Vernier.** — Le *vernier* tire son nom de celui de son inventeur, mathématicien français mort en 1637. Cet instrument fait partie de plusieurs appareils de physique, comme les baromètres, les cathétomètres. Il est formé de deux règles : la plus grande,

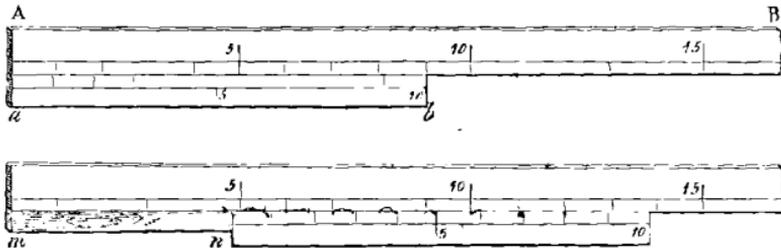


Fig. 1.

AB (fig. 1), est fixe et divisée en parties égales; la plus petite, *ab*, est mobile; c'est elle qui est proprement le vernier. Pour la graduer, on lui donne une longueur égale à 9 des divisions de la grande règle, puis on la divise en 10 parties égales. Il en résulte que chaque division de la règle *ab* est d'un dixième plus petite que celles de la règle AB.

Pour mesurer avec le vernier la longueur d'un objet *mn*, on place celui-ci, comme on le voit dans la figure, le long de la grande règle, et l'on trouve ainsi que cet objet a, par exemple, une longueur égale à 4 unités plus une fraction. C'est cette fraction que le vernier va servir à évaluer. Pour cela, on le fait glisser sur la règle fixe jusqu'à ce qu'il vienne se placer à l'extrémité de l'objet *mn*, puis on cherche où se fait sensiblement la coïncidence entre les divisions des deux règles. Dans la figure, elle a lieu à la huitième division du vernier, à partir du point *n*. Cela indique que la fraction à mesurer est égale à 8 dixièmes. En effet, les divisions du vernier étant plus petites d'un dixième que celles de la règle, on voit qu'à partir du point de coïncidence, en allant de droite à gauche, elles sont successivement en retard, sur celles de la règle, de 1, de 2, de 3... dixièmes. De l'extrémité *n* du vernier à la quatrième division de la règle, il y a donc 8 dixièmes; d'où *mn* égale 4 des divisions de AB, plus 8 dixièmes. Par conséquent, si les divisions de la grande règle sont des millimètres, on aura la longueur de *mn* à un dixième de millimètre près. Pour l'obtenir à un

vingtième, à un trentième de millimètre, il faudrait diviser AB en millimètres, en porter 19 ou 29 sur le vernier, puis diviser celui-ci en 20 ou 30 parties égales. Mais pour distinguer alors où se ferait la coïncidence, il faudrait faire usage d'une loupe. Dans la mesure des arcs, on fait aussi usage du vernier pour évaluer en minutes et en secondes les fractions de degré.

13. Vis micrométrique. — On nomme *vis micrométrique* toute vis qu'on emploie pour mesurer avec précision de petites longueurs ou de petites épaisseurs. Lorsqu'une vis est bien exécutée, son pas, c'est-à-dire l'intervalle entre deux filets consécutifs, doit être partout le même; d'où il résulte que si la vis tourne dans un écrou fixe, elle avance, à chaque tour, d'une longueur égale à celle du pas, et que pour une fraction de tour, $\frac{1}{10}$ par exemple, elle n'avance que de $\frac{1}{10}$ du pas. Par conséquent, si le pas est d'un millimètre, et si, à l'extrémité de la vis, est un cercle gradué en 360 degrés et tournant avec elle, en ne faisant marcher ce cercle que d'une division, on fera avancer la vis de $\frac{1}{360}$ de millimètre. On a donc là un moyen de mesurer avec une grande précision des longueurs ou des épaisseurs très-faibles.

* **14. Cathétomètre.** — Cet instrument sert à mesurer, dans le sens de la verticale, la distance de deux points donnés; par exemple, la différence de hauteur de deux colonnes liquides. Réduit à sa plus simple expression, il consiste en une tige verticale le long de laquelle glisse une lunette horizontale, qui, par sa course entre deux points, en fait connaître la distance verticale. La figure 2 donne une vue d'ensemble du cathétomètre, et les figures 3 et 4 en donnent les détails sur une plus grande échelle.

Une colonne d'acier de 1^m,20 de hauteur, montée sur un trépied à vis calantes, porte le corps du cathétomètre. On nomme ainsi un tube creux de laiton PQ, qui s'engage comme un manchon sur la colonne d'acier, et tourne librement autour. Pour cela, le tube PQ est surmonté d'un chapeau de cuivre z, représenté plus en grand sur la droite de la figure 2. La tête du chapeau est traversée par une vis z. La pointe de celle-ci portant sur l'extrémité axiale de la colonne, lorsqu'on tourne la vis, on soulève tout le tube PQ, qui se trouve ainsi suspendu sur pivot, guidé à sa partie inférieure par un collier qui embrasse un tourillon conique réservé à la base de la colonne.

Le long du tube PQ glissent deux chariots AB et DC, reliés entre eux par une vis de rappel t. Le premier porte une lunette LL' et un niveau à bulle d'air *van* (94), montés sur une fourchette mobile autour d'un axe fixé sur le corps du cathétomètre. A la fourchette est fixé un levier i qu'on incline plus ou moins à l'aide d'une vis de rappel p, pour obtenir l'horizontalité du niveau et de la lunette.

Le bouton K, qui fait marcher la vis t, porte sur sa circonférence une division en 100 parties, et un repère o, fixé à la pièce DC, marque de combien de divisions on tourne le bouton K. Le pas de la vis t étant de $\frac{1}{2}$ millimètre, il s'ensuit que lorsqu'on tourne le bouton K de 1 division, le chariot AB et la lunette se déplacent de $\frac{1}{200}$ de millimètre. Enfin, sur toute la longueur du tube PQ est une échelle en millimètres représentée sur la droite de la figure 4, et un vernier *vv'*, lié au chariot AB, glisse le long de l'échelle.

Ces détails connus, pour déterminer la position d'un point, on abaisse ou élève

les deux chariots et avec eux la lunette, jusqu'à ce que celle-ci soit à la hauteur du point à observer; puis, fixant le chariot DC au moyen d'une vis de pression *d*, on tourne lentement le bouton K jusqu'à ce que le point de croisement de deux fils fins, qui coïncide avec l'axe optique de la lunette (580), corresponde exactement au point que l'on vise. Si on lit alors l'indication du vernier

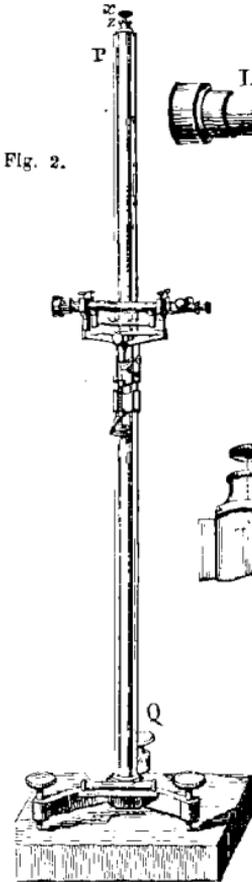


Fig. 2.

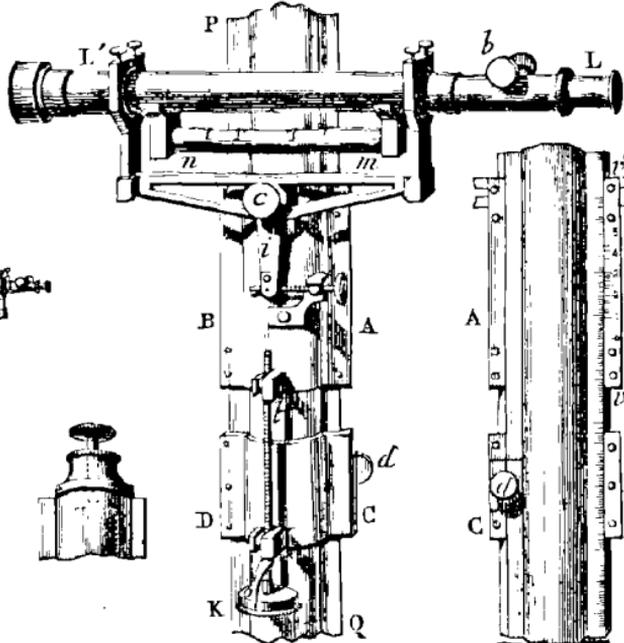


Fig. 3.

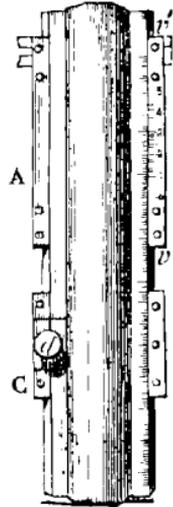


Fig. 4.

sur l'échelle, on a un nombre qui marque, au-dessus du zéro de celle-ci, la hauteur du point observé. Opérant de la même manière pour déterminer la hauteur du second point donné, la différence entre les deux nombres obtenus fait connaître, dans le sens de la verticale, la distance des deux points.

Pour donner des indications précises, le cathétomètre doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° *L'axe optique de la lunette doit être parallèle à la ligne du niveau.* Cette condition, qui est remplie d'avance par le constructeur, s'obtient à l'aide de vis de rappel dont le niveau est muni.

2° *L'axe optique de la lunette doit être perpendiculaire à l'axe de rotation.* Pour cela, notant la position de la bulle du niveau par rapport à ses repères, on tourne la lunette et le niveau de 180 degrés. Si la bulle revient exactement à la même position entre ses repères, le niveau est dans une direction parallèle à la première; ce qui indique que la rotation s'est opérée perpendiculairement à l'axe. Si la bulle n'est pas revenue à la même place, on fait marcher la vis *p* jusqu'à

ce que, dans deux positions diamétralement opposées, la bulle revienne à la même place par rapport à ses repères; la lunette est alors perpendiculaire à l'axe.

3° *L'axe de rotation de l'instrument doit être vertical.* Pour cela, le niveau *mn* étant ramené parallèlement à l'une des branches du trépied, on fait marcher la vis de cette branche jusqu'à ce que la bulle arrive entre ses repères. Tour-nant ensuite de 90 degrés, on amène de nouveau la bulle entre ses repères au moyen des deux autres vis calantes. L'axe de l'instrument est alors vertical, puis-qu'il est perpendiculaire à deux droites horizontales.

15. Divisibilité. — La *divisibilité* est la propriété que possède tout corps de pouvoir être séparé en parties distinctes.

On peut citer de nombreux exemples de l'extrême divisibilité de la matière. Par exemple, 5 centigrammes de musc suffisent pour répandre; pendant plusieurs années, des particules odorantes dans un appartement dont l'air est fréquemment renouvelé.

Le sang est composé de globules rouges flottant dans un liquide nommé *sérum*. Chez l'homme, ces globules, qui sont sphériques, ont un diamètre de $\frac{1}{150}$ de millimètre, et la goutte de sang qui peut être suspendue à la pointe d'une aiguille en contient près d'un million.

La divisibilité des corps étant poussée assez loin pour que leurs particules échappent au toucher et à la vue, même avec l'aide des microscopes les plus grossissants, on ne peut constater par l'ex-périence si la divisibilité de la matière a une limite ou si elle est indéfinie. Cependant, d'après la fixité des proportions suivant les-quelles les corps simples se combinent et la simplicité des rap-ports qui expriment leurs combinaisons multiples, on admet qu'il y a une limite à la divisibilité, et l'on regarde les corps comme formés d'éléments matériels qui ne sont pas susceptibles d'être divisés, et que pour cela on appelle *atomes*, d'un mot grec qui veut dire insécable (3).

16. Porosité. — La contraction de volume que subissent tous les corps par la compression et par le refroidissement prouve que leurs molécules ne se touchent pas, mais qu'il existe entre elles des interstices auxquels on a donné le nom de *pores*. C'est cette propriété générale de la matière de posséder des pores qu'on désigne sous le nom de *porosité*.

On distingue deux espèces de pores : les *pores physiques* ou *intermoléculaires*, interstices assez petits pour que les forces mo-léculaires attractives ou répulsives conservent leur action, et les *pores sensibles*, véritables trous ou lacunes au delà desquelles les forces moléculaires n'ont plus d'action. C'est aux pores physiques que sont dues les contractions et les dilatations qui proviennent des variations de température. Ce sont les pores sensibles qui,

dans les êtres organisés, sont le siège des phénomènes d'exhalation et d'absorption.

Les pores sensibles sont apparents dans les éponges, le bois, la pierre ponce. Les pores physiques ne le sont dans aucun cas. Cependant, tous les corps diminuant de volume par le refroidissement et par la compression, on en conclut que tous ont des pores physiques.

Pour montrer expérimentalement les pores sensibles, on prend un long tube de verre *A* (fig. 5), terminé à sa partie supérieure par un godet de cuivre *m*, et à sa partie inférieure par un pied de même métal qui peut se visser sur la *platine* *P* d'une machine à faire le vide. Le fond du godet *m* est formé d'un cuir épais de buffle *o*. On y verse du mercure de manière à recouvrir entièrement le cuir, puis on fait le vide dans le tube. Aussitôt, par l'effet de la pression atmosphérique qui pèse sur le mercure, ce liquide passe à travers les pores du cuir et tombe dans le tube sous forme d'une pluie fine. On fait passer de la même manière de l'eau à travers les pores du bois, lorsqu'on substitue au cuir ci-dessus un disque de bois coupé perpendiculairement aux fibres.

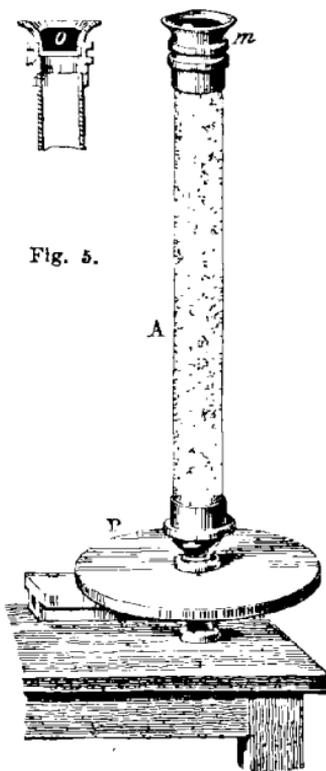


Fig. 5.

La porosité des métaux a été démontrée par l'expérience suivante, due aux académiciens de Florence, en 1661. Cherchant à constater si l'eau pouvait diminuer de volume par l'effet d'une forte pression, ils prirent une petite sphère d'argent creuse, la remplirent d'eau, et après avoir fermé hermétiquement la sphère en soudant l'orifice, ils la frappèrent à coups de marteau pour en réduire le volume. Or, à chaque coup, l'eau suintait à travers la paroi, et apparaissait à l'extérieur comme un dépôt de rosée, ce qui démontrait la porosité du métal.

17. Volume apparent et volume réel. — Eu égard à la porosité, il y a lieu de distinguer, dans tout corps, le *volume apparent*, c'est-à-dire la portion de l'espace qu'occupe le corps, et le *volume réel*, qui serait celui qu'occuperait la matière propre du corps, si

les pores pouvaient être anéantis; en d'autres termes, le volume réel est le volume apparent diminué du volume des pores. Le volume réel d'un corps est invariable; mais le volume apparent diminue ou augmente avec le volume des pores.

18. Applications. — La porosité est utilisée dans les filtres de papier, de feutre, de pierre, de charbon. Les pores de ces substances sont assez grands pour laisser passer les liquides, mais trop petits pour laisser passer les substances que ceux-ci tiennent en suspension. Dans les carrières, on pratique, dans les blocs de pierre, des rainures où l'on introduit des coins de bois bien secs; ceux-ci étant ensuite humectés, l'eau pénètre dans leurs pores, le bois se gonfle et détache des blocs considérables. Les cordes sèches, si on les mouille, augmentent en diamètre et diminuent en longueur; de là un moyen puissant qu'on a utilisé pour soulever d'énormes fardeaux.

19. Compressibilité. — La *compressibilité* est la propriété qu'ont les corps de pouvoir se réduire à un moindre volume par l'effet de la pression. Cette propriété est la conséquence de la porosité, dont elle est elle-même une preuve.

La compressibilité est très-variable d'un corps à un autre. Les corps les plus compressibles sont les gaz, qui peuvent être réduits, sous des pressions suffisantes, à un volume 10, 20 et même 100 fois plus petit que celui qu'ils occupent dans les conditions ordinaires. Toutefois, pour la plupart des gaz, on rencontre une limite de pression au delà de laquelle l'état gazeux ne persiste plus, mais est remplacé par l'état liquide.

La compressibilité des solides est bien moindre que celle des gaz, et se présente à des degrés très-différents. Les étoffes, le papier, le liège, le bois, sont les substances les plus compressibles. Les métaux le sont aussi, comme l'indiquent les empreintes que prennent les médailles sous le choc du balancier. Il est à remarquer que la compressibilité des solides a aussi une limite au delà de laquelle les corps, cédant à la pression, se désagrègent tout à coup et se réduisent souvent en poudre impalpable.

Quant aux liquides, leur compressibilité est tellement faible, qu'ils ont été longtemps regardés comme tout à fait incompressibles; mais elle se constate par l'expérience, ainsi qu'il sera démontré en hydrostatique.

20. Élasticité. — L'*élasticité* est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur forme ou leur volume primitif, lorsque la force qui altérerait cette forme ou ce volume cesse d'agir. L'élasticité peut être développée dans les corps par pression, par traction, par flexion ou par torsion. Il ne sera question ici, comme propriété

générale, que de l'élasticité de pression; les autres espèces d'élasticités, ne pouvant se produire que dans les solides, seront placées au nombre des propriétés particulières à ces corps (70).

Les gaz sont parfaitement élastiques, c'est-à-dire qu'ils reprennent exactement le même volume aussitôt que la pression redevient la même. Il en est encore ainsi des liquides, à quelque pression qu'ils aient été soumis. Aucun corps solide n'est doué d'une élasticité aussi parfaite que les gaz et les liquides, surtout lorsque les pressions ont été longtemps prolongées. Cependant l'élasticité est très-apparente dans le caoutchouc, l'ivoire, le verre; elle est à peine sensible dans les graisses, les argiles, le plomb.

Dans les solides, il y a une limite d'élasticité au delà de laquelle ils sont brisés, ou du moins ne reprennent plus exactement leur forme ou leur volume primitif. Dans les entorses, par exemple, la limite d'élasticité des ligaments a été dépassée. Une semblable limite ne se rencontre pas dans les gaz et les liquides.

L'élasticité est le résultat d'un rapprochement moléculaire, et, par suite, d'un changement de forme qui, dans les corps solides, se constate par l'expérience suivante. Sur un plan de marbre poli et recouvert d'une légère couche d'huile, on laisse tomber une petite bille d'ivoire ou de marbre. Elle rebondit à une hauteur un peu moindre que celle de la chute, après avoir produit, au point où elle a frappé, une empreinte circulaire d'autant plus étendue, que la bille est tombée d'une plus grande hauteur. Au moment du choc, la bille a donc été aplatie sur le plan, et c'est par la réaction des molécules ainsi comprimées qu'elle se relève.

21. **Mobilité, mouvement, repos.** — La *mobilité* est la propriété qu'ont les corps de pouvoir passer d'un lieu à un autre.

On nomme *mouvement* l'état d'un corps qui change de lieu; *repos*, sa permanence dans le même lieu. Le repos et le mouvement sont absolus ou relatifs.

Le *repos absolu* serait la privation complète de mouvement. Dans tout l'univers, on ne connaît aucun corps dans cet état.

Le *mouvement absolu* d'un corps serait son déplacement par rapport à un autre corps à l'état de repos absolu.

Le *repos relatif*, ou apparent, est l'état d'un corps qui paraît fixe par rapport aux corps environnants, mais qui, en réalité, participe avec eux à un mouvement commun. Par exemple, un corps qui reste à la même place dans un bateau en mouvement, est en repos par rapport au bateau, mais il est réellement en mouvement par rapport aux rives; ce n'est donc là qu'un repos relatif.

Le *mouvement relatif* d'un corps n'est que son mouvement apparent, c'est-à-dire celui qu'on mesure par rapport à d'autres

corps qu'on suppose fixes, tandis qu'eux-mêmes se déplacent. Tel est le mouvement d'un bateau par rapport aux rives d'un fleuve; car celles-ci participent avec lui au double mouvement de rotation et de translation de la terre dans l'espace.

On n'observe, dans la nature, que des états de repos et de mouvement relatifs.

22. Inertie. — L'inertie est l'inaptitude de la matière à passer d'elle-même de l'état de repos à l'état de mouvement, ou à modifier le mouvement dont elle est animée.

Si les corps tombent lorsqu'on les abandonne à eux-mêmes, cela provient d'une force qui les dirige vers le centre de la terre, et non de leur spontanéité; si la vitesse d'une bille sur un billard se ralentit graduellement, cela résulte de la résistance de l'air que la bille déplace et du frottement sur le tapis. Toutes les fois qu'il n'y a pas de résistance, le mouvement se continue sans altération, ainsi que les astres nous en offrent un exemple dans leur révolution autour du soleil.

23. Applications. — Un grand nombre de phénomènes s'expliquent par l'inertie de la matière. Par exemple, lorsque, pour franchir un fossé, nous prenons notre élan, c'est afin qu'au moment du saut, le mouvement dont nous sommes animés ajoute son effet à l'effort musculaire que nous faisons pour sauter.

Une personne qui descend d'une voiture en marche participe au mouvement de cette voiture, et si elle n'imprime à son corps un mouvement en sens contraire, à l'instant où elle touche le sol, elle est renversée dans la direction que suit la voiture.

Les marteaux, les pilons, les bocards, sont des applications de l'inertie. Il en est de même des roues de fonte qu'on nomme *volants*, qui servent à régulariser le mouvement des machines.

CHAPITRE III

NOTIONS SUR LES FORCES ET LES MOUVEMENTS

24. Forces. — On nomme *force* toute cause capable de produire le mouvement ou de le modifier.

L'action des muscles chez les animaux, la pesanteur, les attractions et les répulsions magnétiques ou électriques, la tension des vapeurs, sont des forces.

En général, on donne le nom de *puissances* aux forces qui tendent à produire un certain effet, et celui de *résistances* aux

forces qui s'opposent à cet effet. Les premières, tendant à accélérer à chaque instant le mouvement, sont dites *accélératrices*; les dernières sont *retardatrices*.

Les forces peuvent n'agir sur les corps que pendant un temps très-court, comme il arrive dans les chocs, dans l'explosion de la poudre, ou bien pendant toute la durée du mouvement. On exprime le premier effet en disant qu'elles sont *instantanées*, le second en disant qu'elles sont *continues*; mais il importe d'observer qu'on entend par là non pas deux espèces de forces, mais seulement deux modes d'action des forces.

25. Équilibre. — Plusieurs forces étant appliquées à un même corps, il peut arriver que, ces forces se neutralisant mutuellement, l'état de repos ou de mouvement du corps ne soit pas modifié. On a donné à cet état particulier des corps le nom d'*équilibre*.

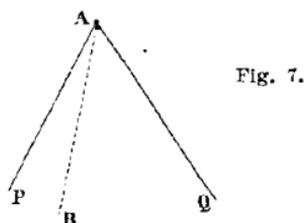
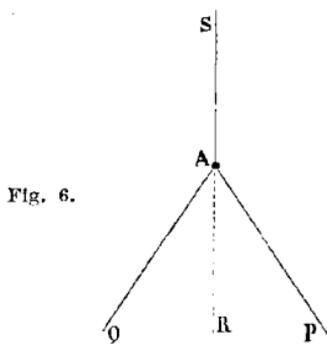
26. Caractères, unité et représentation des forces. — Toute force est caractérisée : 1^o par son *point d'application*, c'est-à-dire le point où elle agit immédiatement; 2^o par sa *direction*, c'est-à-dire la ligne droite qu'elle tend à faire parcourir à son point d'application; 3^o par son *intensité*, c'est-à-dire sa valeur par rapport à une autre force prise pour unité.

La force qu'on choisit pour unité est tout à fait arbitraire; mais, quel que soit l'effet de traction ou de pression produit par une force, un certain poids pouvant toujours produire le même effet, on compare, en général, les forces à des poids, et l'on prend pour unité de force le kilogramme. Une force est égale à 20 kilogrammes, par exemple, si elle peut être remplacée par l'action d'un poids de 20 kilogrammes. Une force qui conserve toujours la même intensité est *constante*; celle dont l'intensité augmente ou diminue est *variable*.

D'après les caractères qui déterminent une force, celle-ci est complètement connue lorsque son point d'application, sa direction et son intensité sont donnés. Pour représenter ces divers éléments d'une force, on mène par son point d'application, dans le sens de sa direction, une ligne droite indéfinie; puis, sur cette ligne, à partir du point d'application, et dans le sens de la force, on porte une unité de longueur arbitraire, le centimètre par exemple, autant de fois que la force donnée contient l'unité de force. On a ainsi une ligne droite qui détermine complètement la force. Pour distinguer les forces entre elles, on les désigne par les lettres P, Q, R..., qu'on place sur leurs directions respectives.

Pour l'intelligence de plusieurs phénomènes physiques, il est nécessaire de rappeler ici les principes suivants, qui sont démontrés dans les cours de mécanique.

27. **Résultantes et composantes.** — Lorsque plusieurs forces S, P, Q, appliquées à un même point matériel A (fig. 6), se font équilibre, l'une quelconque d'entre elles, S par exemple, résiste seule à l'action de toutes les autres. La force S, si elle était dirigée en



sens contraire, suivant le prolongement AR de SA, produirait donc, à elle seule, le même effet que le système des forces P et Q.

Toute force qui peut ainsi produire le même effet que plusieurs forces combinées, se nomme leur *résultante*, et les autres forces, par rapport à la résultante, sont ses *composantes*.

Lorsqu'un corps, sollicité par plusieurs forces, entre en mouvement, on démontre que c'est toujours suivant la direction de la résultante de toutes ces forces qu'il se meut. Par exemple, si un point matériel A (fig. 7) est sollicité en même temps par deux forces P et Q, comme il ne peut se mouvoir simultanément suivant les droites AP et AQ, il prend une direction intermédiaire AR, qui est précisément celle de la résultante des deux forces P et Q.

Tous les problèmes sur la *composition* et la *décomposition* des forces s'appuient sur les théorèmes suivants, pour la démonstration desquels nous renvoyons aux traités spéciaux de mécanique.

28. **Composition et décomposition des forces parallèles.** — 1^o Lorsque deux forces parallèles sont appliquées à un même point, elles ont une résultante égale à leur somme, si elles sont de même direction, et à leur différence, si elles sont de directions contraires. Par exemple, si deux hommes tirent un fardeau suivant des directions parallèles, avec les efforts respectifs 20 et 15, l'effort résultant est 35, ou 5, suivant qu'ils tirent dans le même sens ou en sens contraires.

2^o Lorsque deux forces parallèles et de même direction sont appliquées aux extrémités d'une droite AB (fig. 8), leur résultante R, qui est égale à leur somme, leur est parallèle, et par-

tage la droite AB en deux parties inversement proportionnelles aux forces P et Q. En d'autres termes, C étant le point d'application de la résultante, si P est deux, trois fois plus grande que Q, la distance AC est deux, trois fois plus petite que CB. Par suite, lorsque les forces P et Q sont égales, la direction de leur résultante partage la ligne AB en deux parties égales.

Réciproquement, une force unique R, appliquée en C, peut être remplacée par le système de deux forces P et Q dont elle est la somme, si celles-ci lui sont parallèles, et si, les points A, B, C étant en ligne droite, ces nouvelles forces sont en raison inverse des longueurs AC et CB.

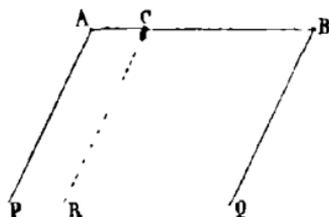


Fig. 8.

Pour obtenir la résultante de plusieurs forces parallèles et dirigées dans le même sens, on cherche, comme on a vu ci-dessus, la résultante de deux de ces forces, puis celle de la résultante trouvée et d'une troisième force, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière; ce qui produit, pour résultante finale, une force égale à la somme des forces données, de même direction, et appliquée en un point qui est invariable, quelle que soit la direction des forces, pourvu qu'elles restent parallèles entre elles. De là le nom de *centre des forces parallèles* donné à ce point.

29. **Composition et décomposition des forces concourantes.** — On appelle *forces concourantes* celles dont les directions se rencontrent en un même point où l'on peut les supposer toutes appliquées. Par exemple, lorsque plusieurs hommes, pour sonner une cloche, tirent des cordes fixés à un même nœud sur la corde de cette cloche, les forces de ces hommes sont concourantes.

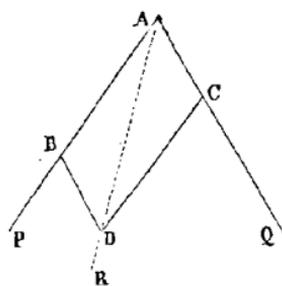


Fig. 9.

Soient d'abord deux forces concourantes P et Q (fig. 9), et A leur point d'application. Si l'on prend sur leurs directions deux longueurs AB et AC proportionnelles à leurs intensités (26), et si, des points B et C, on tire des droites respectivement parallèles aux directions des forces, on obtient un parallélogramme ABDC qu'on nomme *parallélogramme des forces*, et qui fait connaître facilement la résultante des forces P et Q, au moyen du théorème suivant, dit *théorème du parallélogramme des forces*.

30. Parallélogramme des forces. — *La résultante de deux forces concourantes est représentée, en direction et en grandeur, par la diagonale du parallélogramme construit sur ces forces.* C'est-à-dire que, dans la figure ci-dessus, la résultante R des forces P et Q est non-seulement dirigée suivant la diagonale AD, mais contient l'unité de force autant de fois que cette diagonale contient elle-même l'unité linéaire qui a été portée sur AB et AC pour représenter les forces P et Q.

Réciproquement, une force unique peut être décomposée en deux autres appliquées au même point que la première et dirigées suivant des droites données. Il suffit, pour cela, de construire sur ces droites un parallélogramme dont la force donnée soit la diagonale; les longueurs des côtés représentent les composantes cherchées.

Dans le cas d'un nombre quelconque de forces appliquées à un même point, dans diverses directions, la résultante s'obtient en appliquant successivement le théorème précédent d'abord à deux de ces forces, puis à la résultante obtenue et à une troisième force, et ainsi de suite jusqu'à la dernière.

NOTIONS SUR LES MOUVEMENTS

31. Différents genres de mouvement. — On a déjà vu (21) que le *mouvement* est l'état d'un corps qui passe d'un lieu à un autre. Un mouvement est *rectiligne* ou *curviligne*, suivant que le chemin parcouru par le mobile est une ligne droite ou une ligne courbe, et chacun de ces mouvements peut être lui-même *uniforme* ou *varié*.

32. Mouvement uniforme. — Le *mouvement uniforme*, le plus simple de tous, est celui dans lequel un mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux.

Toute force instantanée produit un mouvement rectiligne et uniforme, lorsque le mobile n'est soumis à aucune autre force et ne rencontre aucune résistance. En effet, la force n'agissant que pendant un temps très-court, le mobile, une fois abandonné à lui-même, conserve, en vertu de son inertie, la direction et la vitesse que la force lui a imprimées. Toutefois les forces continues peuvent aussi donner naissance à des mouvements uniformes. Il en est ainsi lorsqu'il se présente des résistances qui, se renouvelant sans cesse, détruisent l'accroissement de vitesse que ces forces tendent à communiquer au mobile. Par exemple, un convoi qui, sur un chemin de fer, est sollicité par une force continue, n'en prend pas moins un mouvement uniforme; car les pertes de force dues à la résistance de l'air et au frottement croissant avec

la vitesse, il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force motrice et les résistances.

33. Vitesse et loi du mouvement uniforme. — Dans le mouvement uniforme, on nomme *vitesse* le chemin parcouru dans l'unité de temps. Cette unité, tout à fait arbitraire, est généralement la seconde. Il découle de la définition du mouvement uniforme que la vitesse est constante. Dans des temps deux, trois, quatre fois plus grands, les chemins parcourus sont donc doubles, triples, quadruples. Cette loi s'exprime en disant que *les espaces parcourus sont proportionnels aux temps*.

Cette loi peut se représenter par une formule très-simple. Pour cela, soient v la vitesse, t le temps, et e l'espace parcouru. Puisque v représente l'espace parcouru dans l'unité de temps, l'espace parcouru dans 2, 3... unités de temps, sera $2v$, $3v$...; et, enfin, dans le temps t , il sera t fois v ; on a donc $e = vt$. On tire de cette formule : $v = \frac{e}{t}$; d'où l'on peut dire que, dans le mouvement uniforme, *la vitesse est le rapport du chemin parcouru au temps employé à le parcourir*.

34. Mouvement varié. — Le *mouvement varié* est celui dans lequel un mobile parcourt en temps égaux des espaces inégaux. Ce mouvement peut varier d'une infinité de manières; le seul qu'il importe de considérer ici est le *mouvement uniformément varié*.

On nomme ainsi celui dans lequel la vitesse croît ou décroît de quantités égales en temps égaux. Dans le premier cas, le mouvement est *uniformément accéléré*: tel est celui d'un corps qui tombe, abstraction faite de la résistance de l'air. Dans le second, il est *uniformément retardé*: tel est le mouvement d'une pierre lancée verticalement de bas en haut.

Le mouvement uniformément varié a toujours pour cause une *force continue constante*, agissant comme puissance ou comme résistance, suivant que le mouvement est accéléré ou retardé.

35. Vitesse et lois du mouvement uniformément accéléré. — Dans le mouvement uniformément accéléré, les espaces parcourus en temps égaux n'étant pas égaux, la vitesse n'est plus; comme dans le mouvement uniforme, le chemin parcouru dans l'unité de temps. Ici on entend par *vitesse*, en un instant donné, l'espace qui, à partir de cet instant, serait uniformément parcouru par le mobile, dans chaque seconde, si la force accélératrice cessait tout à coup, c'est-à-dire si le mouvement devenait uniforme. Par exemple, si l'on dit d'un mobile qu'il a une vitesse de 60 mètres après 10 secondes d'un mouvement uniformément accéléré, on exprime que, si la force accélératrice qui a agi jusqu'alors cessait après 10 secondes, le mobile, en vertu de son inertie, continuerait à se mouvoir en parcourant uniformément 60 mètres par seconde.

Tout mouvement uniformément accéléré, quel que soit son accroissement de vitesse, est soumis aux deux lois suivantes :

1^o *Les vitesses croissent proportionnellement aux temps.* C'est-à-dire qu'après un temps double, triple, quadruple, la vitesse est deux, trois, quatre fois plus grande. Cette loi est la conséquence de la définition du mouvement uniformément varié (34).

2^o *Les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.* C'est-à-dire que, si l'on représente par 1 le chemin parcouru en 1 seconde, les chemins parcourus en 2, 3, 4, 5... secondes, seront représentés par 4, 9, 16, 25...

Si l'on représente par a l'accroissement de vitesse par seconde, et qu'on suppose le mobile sans vitesse initiale, c'est-à-dire partant du repos, sa vitesse au bout d'une seconde est a , au bout de deux secondes $2a$, et ainsi de suite; donc, la vitesse étant v au bout de t secondes, on a $v = at$ [1], formule qui est l'expression de la première loi ci-dessus.

Pour représenter la deuxième, observons qu'un corps qui se meut pendant t secondes d'un mouvement uniformément accéléré, avec une vitesse initiale nulle et une vitesse finale at , parcourt nécessairement le même chemin que s'il était animé d'un mouvement uniforme avec une vitesse moyenne entre les vitesses zéro et at , c'est-à-dire avec la vitesse $\frac{at}{2}$. Donc, d'après la formule connue, $e = vt$,

du mouvement uniforme (33), on a $e = \frac{at}{2} \times t$, ou $e = \frac{1}{2} at^2$ [2], formule qui représente la seconde loi du mouvement uniformément accéléré.

Des formules [1] et [2] ci-dessus on tire, en éliminant t , $v^2 = 2ae$, d'où $v = \sqrt{2ae}$, formule qui a de nombreuses applications.

Réciproque de la loi des espaces. — La formule [2] ci-dessus fait voir que, dans tout mouvement uniformément accéléré, les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps; or, réciproquement, *tout mouvement, dans lequel les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps, est uniformément accéléré.*

En effet, si le temps t prend un accroissement très-petit t' , l'espace parcouru e prend un accroissement e' , aussi très-petit, et la formule [2] devient

$$e + e' = \frac{1}{2} a (t + t')^2, \text{ ou } e + e' = \frac{1}{2} at^2 + att' + \frac{1}{2} at'^2 \text{ [3].}$$

De l'égalité [3] retranchant l'égalité [2] membre à membre, on tire

$$e' = att' + \frac{1}{2} at'^2, \text{ d'où } \frac{e'}{t'} = at + \frac{1}{2} at' \text{ [4].}$$

Or, t' pouvant devenir aussi petit que l'on veut, il est permis de supposer la vitesse constante pendant l'intervalle t' , ce qui donne $\frac{e'}{t'} = v$. De plus, le terme $\frac{1}{2} at'$ ayant pour limite zéro, c'est-à-dire pouvant décroître jusqu'à zéro, on peut le négliger; l'égalité [4] devient donc $v = at$, formule qui est bien celle de la première loi du mouvement uniformément accéléré.

33. Proportionnalité des forces aux accélérations; quantité de mouvement. — On démontre, en mécanique rationnelle, que, lorsque plusieurs forces constantes F, F', F'' ,....., agissent successivement sur un même corps, elles lui

impriment, en temps égaux, des accélérations de vitesse $G, G', G'' \dots$, proportionnelles à ces forces, c'est-à-dire qu'on a $\frac{F}{F'} = \frac{G}{G'}$, $\frac{F}{F''} = \frac{G}{G''} \dots$

Ce principe permet donc de mesurer les forces par les accélérations de vitesse qu'elles communiquent aux mobiles, les forces étant estimées en kilogrammes et les vitesses en mètres; de plus, comme des égalités ci-dessus on tire $\frac{F}{G} = \frac{F'}{G'}$, $\frac{F}{G} = \frac{F''}{G''} \dots$

on voit que, pour un même corps, le rapport entre la force qui le sollicite et l'accélération de vitesse qu'elle lui communique est constant, quelle que soit la force.

C'est ce rapport constant que les mécaniciens ont adopté pour mesurer la *masse* des corps (4), et ils disent que *deux corps sont de même masse, quand, sollicités par des forces égales, ils prennent, dans le même temps, des accélérations de vitesse égales.*

En représentant par M et m les masses de deux corps, par F et f les forces qui agissent sur eux, et par V et v les vitesses qu'elles leur communiquent dans le même temps, on a donc $\frac{F}{V} = M$, et $\frac{f}{v} = m$; ou $F = MV$, et $f = mv$. Divisant ces

deux dernières égalités membre à membre, on a $\frac{F}{f} = \frac{MV}{mv}$.

Le produit MV de la masse d'un corps par la vitesse dont il est animé, a reçu le nom de *quantité de mouvement* de ce corps. On peut donc énoncer la dernière égalité ci-dessus en disant que *deux forces quelconques sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles impriment à deux masses différentes.* Par conséquent, si l'on prend pour unité de force celle qui imprimerait à l'unité de masse l'unité de vitesse dans l'unité de temps, on voit que les forces peuvent se mesurer par les quantités de mouvement qui leur correspondent.

Les forces étant proportionnelles aux quantités de mouvement, il en résulte que, pour une même force, le produit MV est constant; c'est-à-dire que la masse devenant deux, trois fois plus grande, la vitesse est deux, trois fois plus petite. Ce résultat se déduit de la dernière égalité ci-dessus, en y faisant $F = f$, ce qui

donne $MV = mv$, ou $\frac{M}{m} = \frac{v}{V}$; c'est-à-dire que *les vitesses imprimées par une même force à deux masses inégales sont en raison inverse de ces masses.*

Si $V = v$, on a $\frac{F}{f} = \frac{M}{m}$; c'est-à-dire que *deux forces sont entre elles comme les masses auxquelles elles impriment des vitesses égales.*

37. **Force vive, travail mécanique.** — On nomme *force vive* d'un corps animé d'une vitesse V le produit MV^2 de la masse de ce corps par le carré de sa vitesse; et *travail mécanique* d'une force, pendant un temps donné, le produit de l'intensité de cette force par le chemin parcouru dans le même temps, dans le sens de sa direction, par son point d'application; c'est-à-dire que T étant le travail, F l'intensité de la force et E le chemin parcouru, on a $T = F \times E$, l'effort F étant mesuré en kilogrammes, et le chemin E en mètres. Quant à l'unité de travail mécanique, elle est le *kilogrammètre*. On nomme ainsi le travail nécessaire pour élever 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur en 1 seconde. Par exemple, si un homme élève 25^k à 12^m de hauteur en 1 minute, son travail mécanique par seconde est $\frac{25 \times 12}{60} = 5$ kilogrammètres.

38. **Relation entre le travail mécanique et la force vive.** — Il existe, entre la force vive que possède un corps en mouvement et le travail mécanique qu'il a fallu dépenser pour lui imprimer la vitesse dont il est animé, cette relation simple que *le travail est la moitié de la force vive*; c'est-à-dire que $T = \frac{1}{2} MV^2$.

En effet, si une force F imprime, dans le temps t , la vitesse V à une masse M , la quantité de mouvement communiquée dans l'unité de temps est $\frac{MV}{t}$. Par suite, prenant pour unité de force, comme on l'a vu ci-dessus (36), celle qui imprime l'unité de vitesse à l'unité de masse dans l'unité de temps, on a $F = \frac{MV}{t}$ [1]. Mais la vitesse du mobile passant de zéro à V , sa vitesse moyenne est $\frac{V}{2}$, et le chemin E parcouru dans le temps t est $\frac{V}{2} \times t$; donc on a $E = \frac{Vt}{2}$ [2]. Multipliant membre à membre les égalités [1] et [2], il vient $F \times E = \frac{MV}{t} \times \frac{Vt}{2}$, ou $T = \frac{1}{2} MV^2$.

39. **Principe général des forces vives.** — Quelle que soit la force qui agit sur un corps pour accélérer ou retarder son mouvement, la quantité de travail mécanique dépensée égale la moitié de la variation de la force vive du corps.

En effet, soient v et v' les vitesses imprimées à une masse M par une force continue F dans les temps t et t' , e et e' les espaces parcourus dans les mêmes temps, et a l'accélération de vitesse par seconde; on sait (35) qu'on a

$$v^2 = 2ae, \text{ et } v'^2 = 2ae', \text{ d'où } v'^2 - v^2 = 2a(e' - e) \text{ [1].}$$

Or on a vu ci-dessus (36) que $F = Ma$, d'où $a = \frac{F}{M}$; portant cette valeur de a dans l'égalité [1] et réduisant, il vient

$$F(e' - e) = \frac{1}{2} M(v'^2 - v^2) \text{ [2],}$$

équation qui n'est autre chose que l'expression du principe énoncé ci-dessus, puisque le premier membre est le travail consommé pour faire passer la masse M de la vitesse v à la vitesse v' , et le second membre la demi-différence entre les forces vives Mv'^2 et Mv^2 possédées par le mobile après les temps t' et t .

L'équation [2], qu'on nomme *équation du travail*, établit l'équivalence entre le travail et la force vive. Toutefois, obtenue théoriquement, elle ne se vérifie pas dans la pratique à cause des pertes de force vive par les frottements et par les chocs, même dans les meilleures machines. Or, en tenant compte de ces pertes, on observe encore qu'une certaine quantité de force vive disparaît. On a longtemps expliqué cette déperdition en disant qu'il y avait de la *force vive détruite*. Dans la nouvelle théorie dynamique, où la force vive est indestructible comme la force et le mouvement, la quantité de force vive qu'on ne retrouve pas dans le second membre de l'équation du travail n'est pas anéantie, mais transformée en *force vive moléculaire*, qui se manifeste sous forme de chaleur, et même d'électricité, de magnétisme et de lumière, comme on en verra plus tard de nombreux exemples.

Le principe de l'équivalence entre le travail mécanique et la force vive rencontrera une importante application dans la détermination de l'*équivalent mécanique* de chaleur (408).

LIVRE II

ATTRACTION UNIVERSELLE, PESANTEUR ET FORCES MOLÉCULAIRES

CHAPITRE PREMIER

EFFETS GÉNÉRAUX DE LA PESANTEUR

40. **Attraction universelle, ses lois.** — L'*attraction universelle* est une force en vertu de laquelle tous les corps de l'univers tendent sans cesse les uns vers les autres.

Cette force agit sur tous les corps, qu'ils soient en repos ou en mouvement. Elle est toujours réciproque entre eux, et s'exerce à toutes les distances, ainsi qu'à travers toutes les substances.

L'attraction universelle prend le nom de *gravitation*, lorsqu'elle s'exerce entre les astres; celui de *pesanteur*, quand on considère l'attraction que la terre exerce sur les corps pour les ~~les~~ tomber; tandis qu'on donne le nom d'*attraction moléculaire* à la force qui lie entre elles les molécules des corps. On va voir ci-après quelles sont les lois de la gravitation et de la pesanteur, mais on ignore celles de l'attraction moléculaire.

Les philosophes de l'antiquité avaient adopté l'hypothèse d'une *tendance de la matière vers des centres communs* sur la terre et sur les astres. Képler admit une attraction réciproque entre le soleil et les planètes. Bacon, Galilée, Hooke, ont également reconnu une attraction universelle; mais c'est Newton qui, le premier, se fondant sur les lois de Képler sur le mouvement des planètes, a démontré que la gravitation est une loi générale de la nature, et que *tous les corps s'attirent entre eux en raison composée des masses et en raison inverse du carré des distances*.

Depuis Newton, l'attraction de la matière par la matière a été démontrée expérimentalement par Cavendish, célèbre chimiste et physicien anglais. Ce savant, au moyen d'un appareil qu'on nomme *balance de Cavendish*, et qui n'est autre chose qu'une balance de torsion (71), est parvenu à rendre sensible l'attraction exercée par une grosse boule de plomb sur une petite sphère de cuivre.

L'attraction universelle est un fait rigoureusement prouvé par les mouvements relatifs des astres; mais on en ignore complète-

ment la cause. Depuis Newton, on s'est habitué à la regarder comme une propriété intrinsèque de la matière. Cependant l'illustre auteur de la théorie de la gravitation universelle dit lui-même qu'il n'a parlé de la gravitation universelle que comme d'un fait, d'une force constatée par l'observation; mais il n'assigne pas la cause de cette force, se bornant à dire que les phénomènes se produisent *comme si la matière s'attirait*.

En effet, admettre que la matière est inerte, et admettre qu'elle s'attire, sont deux idées incompatibles; c'est pourquoi, quoique ignorant la cause de l'attraction à distance, ne doit-on pas la regarder comme une cause occulte émanant de la matière ¹.

41. Pesanteur. — La pesanteur est la force en vertu de laquelle les corps abandonnés à eux-mêmes *tombent*, c'est-à-dire se dirigent vers le centre de la terre. Cette force, qui n'est qu'un cas particulier de l'attraction universelle, est due à l'attraction réciproque qui s'exerce entre la masse de la terre et celle des corps.

Ainsi que la gravitation universelle, la pesanteur agit en raison inverse du carré de la distance et proportionnellement à la masse. Elle s'exerce sur tous les corps, dans quelques conditions qu'ils se trouvent, et si quelques-uns, comme les nuages, la fumée, semblent s'y soustraire en s'élevant dans l'atmosphère, on verra bientôt (173) qu'il faut en rapporter la cause à la pesanteur même.

42. Direction de la pesanteur, verticale, horizontale. — Lorsque les molécules d'une sphère matérielle agissent par attraction, en raison inverse du carré de la distance, sur une molécule située hors de cette sphère, on démontre, en mécanique rationnelle, que la résultante de toutes ces attractions est la même que si toutes les molécules de la sphère étaient condensées à son centre. Il résulte de ce principe qu'en chaque point de la surface du globe, l'attraction de la terre est dirigée vers son centre. Toutefois l'aplatissement de la terre aux pôles, la non-homogénéité de ses parties, les inégalités de sa surface, sont autant de causes qui peuvent changer la direction de la pesanteur, mais d'une quantité peu sensible.

On nomme *verticale* la direction de la pesanteur, c'est-à-dire

¹ « S'il est quelque chose de certain au monde, dit l'abbé Moigno (*Matière et Force*, p. 57), c'est que les molécules des corps et les corps eux-mêmes ne s'attirent pas réellement; c'est que l'attraction n'est pas une force réelle, mais seulement une force explicative; c'est que tout se passe comme si les corps s'attiraient, quoiqu'il soit incontestablement vrai que les corps ne s'attirent pas. Newton, comme Euler, comme tous les philosophes dignes de ce nom, n'ont pu voir dans la matière que deux choses, l'inertie et le mouvement primitivement imprimé par une volonté libre, moteur premier et infini. Et c'est avec ces deux grandes choses, l'inertie et le mouvement, que la science avancée doit pouvoir expliquer un jour tous les phénomènes du monde physique. »

la ligne droite que suivent les corps en tombant. Sur tous les points du globe, les verticales convergeant sensiblement vers le centre, leur direction change d'un lieu à un autre; mais, pour des points peu distants les uns des autres, tels que les molécules d'un même corps ou de corps voisins, on regarde les verticales comme rigoureusement parallèles; en effet, le rayon moyen de la terre, c'est-à-dire celui qui correspond à la latitude de 45° , étant de 6 367 400 mètres, les angles de ces verticales entre elles sont inappréciables. Toutefois, pour deux points éloignés l'un de l'autre, l'angle n'est pas négligeable. Il est d'environ $2^{\circ} 12'$ entre les verticales de Paris et de Dunkerque, et de $7^{\circ} 28'$ entre celles de Paris et de Barcelone. L'angle formé ainsi par les verticales de deux lieux différents s'obtient en observant, de chacun d'eux, une même étoile, et mesurant l'angle que le rayon visuel fait avec la verticale. La différence des angles trouvés est l'angle des deux verticales entre elles.

On entend par *ligne horizontale*, *plan horizontal*, une ligne, un plan perpendiculaires à la verticale.

43. **Fil à plomb.** — La verticale en un lieu quelconque se détermine par le *fil à plomb*. On nomme ainsi un fil auquel est suspendue une petite balle de plomb (fig. 10). Ce fil, étant fixé par son extrémité supérieure et abandonné à lui-même, prend naturellement la direction verticale; car on verra bientôt qu'un corps qui n'a qu'un point d'appui ne peut être en équilibre qu'autant que son centre de gravité et le point d'appui sont situés sur une même verticale (47).

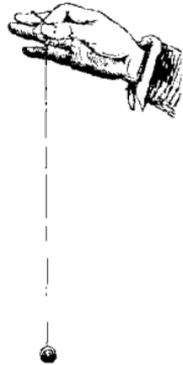


Fig. 10.

Le fil à plomb ne peut indiquer si la direction de la pesanteur en un lieu est constante. En effet, si l'on observait que le fil à plomb, d'abord parallèle au mur d'un édifice, a cessé de l'être, on ne saurait dire si c'est la pesanteur qui a changé de direction, ou si c'est le mur qui s'est incliné. Mais, en traitant des propriétés des liquides, nous verrons que leur surface ne peut demeurer horizontale, ou *être de niveau*, qu'autant qu'elle est perpendiculaire à la direction de la pesanteur (88). Par conséquent, si cette direction changeait, il en serait de même du niveau des mers. La stabilité de ce niveau est donc une preuve que la direction de la pesanteur est constante.

Toutefois, près d'une grande masse de matière, comme une montagne, le fil à plomb s'écarte de la verticale: la Condamine et Bouguer ont constaté que la montagne de Chimborazo imprime au fil à plomb une déviation de $7''$,5.

CHAPITRE II

DENSITÉ, POIDS, CENTRE DE GRAVITÉ, BALANCES

44. Densité absolue et densité relative. — La *densité* d'un corps est sa masse sous l'unité du volume (4). On ne peut assigner la *densité absolue*, c'est-à-dire la quantité réelle de matière qu'un corps renferme, mais seulement sa *densité relative*, c'est-à-dire la quantité de matière qu'il contient, à volume égal, par rapport à un autre corps pris pour terme de comparaison. Ce corps, pour les solides et les liquides, est l'eau distillée, prise à 4 degrés au-dessus de zéro; pour les gaz, c'est l'air. Par conséquent, quand on dit que la densité du zinc est 7, cela signifie que, sous le même volume, ce métal contient 7 fois plus de matière que l'eau; c'est-à-dire qu'on prend la densité de l'eau pour unité.

En représentant par V le volume d'un corps, par M sa masse absolue, et par D sa quantité de matière sous l'unité de volume, c'est-à-dire sa densité absolue, la quantité totale de matière contenue dans le volume V est V fois D ; d'où $M = VD$. De cette égalité on tire $D = \frac{M}{V}$; d'où l'on peut dire encore que la densité absolue d'un corps est le rapport de sa masse à son volume.

45. Poids. — On distingue, dans tout corps, le *poids absolu*, le *poids relatif* et le *poids spécifique*.

Le *poids absolu* d'un corps est la pression qu'il exerce sur l'obstacle qui l'empêche de tomber. Cette pression n'est autre chose que la résultante des actions de la pesanteur sur chacune des molécules du corps; d'où il résulte qu'elle est d'autant plus grande, que le corps contient plus de matière; ce qu'on exprime en disant que le *poids d'un corps est proportionnel à sa masse*.

Le *poids relatif* est celui qui se détermine au moyen de la balance; c'est le rapport du poids absolu du corps à un autre poids déterminé qu'on a choisi pour unité. Dans le système métrique, cette unité est le gramme. Ainsi, quand on trouve qu'un corps pèse 58 grammes, 58 est son poids relatif. En adoptant une autre unité, le poids relatif changerait, mais le poids absolu serait le même.

Enfin, le *poids spécifique* d'un corps est le rapport de son poids, sous un certain volume, à zéro, à celui d'un égal volume d'eau distillée et à 4 degrés au-dessus de zéro. Par exemple, si l'on dit que le poids spécifique du zinc est 7, cela exprime qu'à volume égal le zinc à zéro pèse 7 fois plus que l'eau distillée prise à 4 degrés.

Le poids des corps, à volume égal, étant proportionnel à leur masse, si un corps contient deux, trois fois plus de matière que l'eau, il doit être deux, trois fois plus pesant; par suite, le rapport entre les poids, ou le poids spécifique, doit être le même que le rapport entre les masses, ou la densité relative. C'est pourquoi les expressions *densité relative* et *poids spécifique* sont souvent regardées comme équivalentes. Toutefois, si la pesanteur était détruite, il n'y aurait plus ni poids absolu ni poids relatif, tandis qu'il y aurait toujours lieu de considérer les densités. Celles-ci ne pourraient se déterminer alors par la balance; mais on a vu (36) que le rapport des masses est le même que le rapport des forces qui imprimeraient à ces masses une même vitesse dans le même temps, ce qui permettrait encore de déterminer les densités.

On a vu également (36) que la masse d'un corps est égale au rapport constant de la force qui le sollicite à l'accélération de vitesse qu'elle lui imprime; si donc on représente par P le poids absolu d'un corps, c'est-à-dire la force qui tend à le faire tomber, par g l'accélération de vitesse que la pesanteur lui imprime, accélération qui peut être prise pour intensité de cette force, enfin par M la masse du corps, on a $\frac{P}{g} = M$, d'où $P = Mg$.

Cette formule fait voir que le poids d'un corps est proportionnel à sa masse et à l'intensité de la pesanteur. En y remplaçant M par sa valeur VD (44), on a $P = VDg$. Avec un autre corps, dont le poids, le volume et la densité seraient P' , V' , et D' , on aurait de même $P' = V'D'g$. Pour $D = D'$, on a $\frac{P}{P'} = \frac{V}{V'}$ [1]; et pour $P = P'$, on a $VD = V'D'$, d'où $\frac{V}{V'} = \frac{D'}{D}$ [2]. De l'égalité [1], on conclut qu'à densité égale, les poids sont proportionnels aux volumes; et de l'égalité [2], qu'à poids égal, les volumes sont en raison inverse des densités.

On verra bientôt les procédés à l'aide desquels on détermine les poids spécifiques des solides et des liquides par rapport à l'eau. Ceux des gaz se prennent par rapport à l'air.

46. Centre de gravité, sa détermination expérimentale. — Le *centre de gravité* d'un corps est le point par lequel passe constamment la résultante des actions de la pesanteur sur les molécules de ce corps dans toutes les positions qu'il peut prendre.

Tout corps a un centre de gravité unique. En effet, soit une masse quelconque (fig. 11), et m, m', m'', m''', \dots , ses molécules. Toutes celles-ci étant sollicitées par la pesanteur suivant des directions verticales, il en résulte un système de forces parallèles dont on obtient la résultante en cherchant d'abord celle des forces qui sollicitent deux molécules quelconques m et m' (28), puis la résultante de la force ainsi obtenue et de celle qui sollicite une troisième molécule m'' , et ainsi de suite jusqu'à la résultante finale P , appliquée en G et représentant le poids du corps. Or, si l'on donne au

corps une autre position, comme le montre la figure 12, les molécules $m, m', m'' \dots$, étant encore sollicitées par les mêmes forces que lorsque le corps était dans la position représentée dans la figure 11, la résultante des forces qui sollicitent m et m' continue à passer en o , puis la résultante suivante en o' , et ainsi de suite jusqu'à la résultante finale P , qui passe encore en G , où elle coupe la direction GP' qu'avait la même résultante, par rapport au corps,

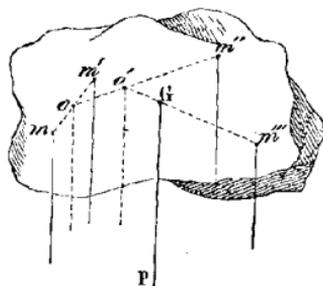


Fig. 11.

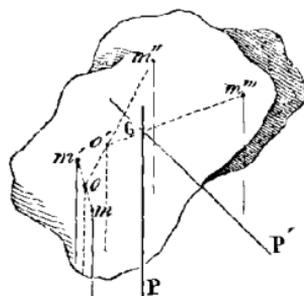


Fig. 12.

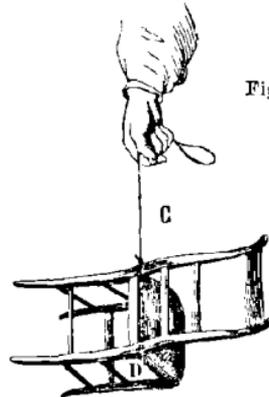
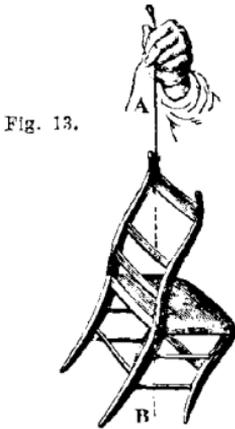
dans la première position. La même chose ayant lieu dans toutes les positions qu'on donne au corps, le point G , par lequel passe constamment la direction du poids, est le centre de gravité; ce point est le même que le centre des forces parallèles (28).

La recherche du centre de gravité d'un corps quelconque est du domaine de la géométrie; mais, dans plusieurs cas, on peut le déterminer immédiatement. Par exemple, dans une ligne droite homogène, le centre de gravité se trouve au milieu de la droite; dans un cercle, il est au centre: il en est de même pour une sphère. Dans les cylindres, il est au milieu de l'axe. En statique, on fait voir que, dans un triangle, le centre de gravité se trouve sur la ligne qui joint un des sommets au milieu du côté opposé, et aux deux tiers de cette ligne à partir du sommet. Dans les pyramides, il est placé sur la droite qui joint le sommet au centre de gravité de la base, et aux trois quarts de cette droite à partir du sommet; il en est de même dans les cônes.

On peut, dans plusieurs cas, déterminer le centre de gravité par l'expérience. Pour cela, on suspend le corps à un cordeau, successivement dans deux positions différentes, comme le montrent les figures 13 et 14; puis on cherche le point où le cordeau CD , dans la seconde position, va couper la direction AB , qu'avait le cordeau dans la première: ce point est le centre de gravité cherché. En effet, dans chaque position l'équilibre ne pouvant s'établir qu'au-

tant que le centre de gravité vient se placer au-dessous du point d'attache du cordeau et sur sa direction (47), il en résulte que le centre de gravité doit être placé à la fois sur les deux directions du cordeau, et, par conséquent, à leur point de rencontre.

Dans les corps dont la forme et l'homogénéité sont invariables,



la position du centre de gravité est constante ; dans le cas contraire, la position de ce point change. C'est ce qui arrive chez les animaux, où la position du centre de gravité varie avec les attitudes.

47. Équilibre des corps pesants. — L'action de la pesanteur sur un corps se réduisant toujours à une force unique, verticale, dirigée de haut en bas, et appliquée au centre de gravité, il suffit, pour qu'il y ait équilibre, que cette force soit détruite par la résistance d'un point fixe par lequel elle passe. Par suite, si le corps repose sur un seul point d'appui, le centre de gravité doit se trouver sur la verticale menée par ce point ; si le corps est soutenu par deux points, la verticale passant par le centre de gravité doit rencontrer la droite qui les joint ; si le corps est supporté par plusieurs points, la verticale menée par le centre de gravité doit passer dans l'intérieur de la *base*, c'est-à-dire du polygone qu'on obtient en joignant les points d'appui.

Dans les tours de Pise et de Bologne, qui sont tellement inclinées à l'horizon, qu'elles semblent menacer les passants de leur chute, l'équilibre persiste, parce que la verticale menée par le centre de gravité de l'édifice passe dans l'intérieur de la base.

Un homme est d'autant plus ferme sur ses pieds, que ceux-ci présentent une base plus grande ; car il peut alors donner à ses mouvements plus d'amplitude, sans que la verticale menée par

son centre de gravité se trouve en dehors de cette base. S'il se pose sur un pied, la stabilité diminue; elle diminue encore s'il s'élève sur la pointe du pied. Dans cette position, un très-faible balancement suffit pour que le centre de gravité ne soit plus au-dessus de la base, et pour rompre l'équilibre.

48. **Divers états d'équilibre.** — Selon la position du centre de gravité par rapport aux points d'appui, il se présente trois états d'équilibre: l'état d'*équilibre stable*, celui d'*équilibre instable*, et celui d'*équilibre indifférent*.

L'*équilibre stable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, y revient de lui-même aussitôt qu'aucun obstacle ne s'y oppose. Cet état se présente toutes les fois qu'un corps est dans une position telle, que son centre de gravité est plus bas que dans toute autre position voisine. Si le corps est alors déplacé, son centre de gravité ne peut être que relevé, et comme la pesanteur tend sans cesse à l'abaisser, elle le ramène, après une suite d'oscillations, à sa position première, et l'équilibre se rétablit. Tel est le cas d'un balancier d'horloge, ou celui d'un œuf sur un plan horizontal, lorsque son grand axe est parallèle à ce plan.

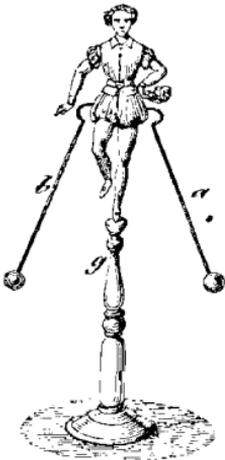


Fig. 15 (h = 21).

Comme exemple d'équilibre stable, on construit de petites figures d'ivoire (fig. 15), qu'on fait tenir sur un pied en les chargeant de deux boules de plomb placées assez bas pour que, dans toutes les positions, le centre de gravité g des boules et de la petite figure se trouve au-dessous du point d'appui.

L'*équilibre instable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, ne tend qu'à s'en écarter davantage. Cet état se présente toutes les fois qu'un corps est dans une position telle, que son centre de gravité est plus haut que dans toute autre position voisine; car, par un déplacement quelconque, le centre de gravité étant abaissé, la pesanteur ne tend qu'à l'abaisser davantage. Tel est le cas d'un œuf reposant sur un plan horizontal, de manière que son grand axe

soit vertical, ou d'un bâton qu'on fait tenir en équilibre debout sur un doigt.

Enfin, on nomme *équilibre indifférent* celui qui persiste dans toutes les positions que peut prendre un corps. Ce genre d'équilibre se rencontre lorsque, dans les diverses positions du corps, son centre de gravité n'est ni relevé ni abaissé, ainsi qu'il arrive

pour une roue de voiture soutenue sur son essieu, ou pour une sphère reposant sur un plan horizontal.

La figure 16 représente trois cônes, A, B, C, placés respective-

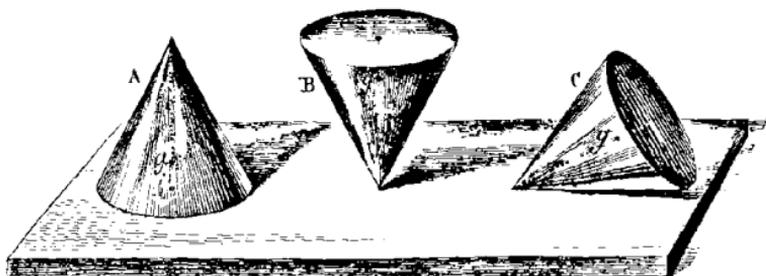


Fig. 16.

ment dans les positions d'équilibre stable, instable et indifférent; la lettre *g* désigne la position du centre de gravité.

49. **Levier.** — Avant de faire connaître la théorie des balances, nous rappellerons ici une autre théorie qui appartient au cours de mécanique, celle du levier, sans laquelle ce qui a rapport aux balances ne peut être bien compris.

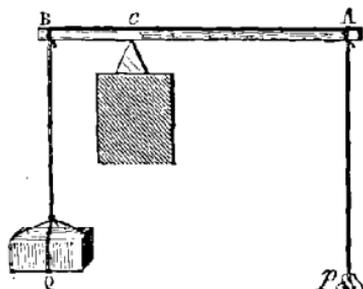


Fig. 17.

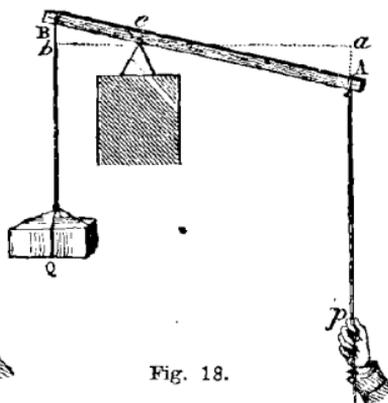


Fig. 18.

On nomme *levier* toute barre AB (fig. 17), droite ou courbe, s'appuyant sur un point fixe *c*, autour duquel elle est sollicitée à tourner en sens contraires par deux forces parallèles ou concourantes. Celle qui agit comme *moteur* est la *puissance*, l'autre est la *résistance*. Selon la position du point d'appui par rapport aux points d'application de la puissance et de la résistance, on distingue trois genres de leviers : 1° le *levier du premier genre*, quand le point d'appui est entre la puissance et la résistance; 2° le *levier du second genre*, lorsque la résistance est entre le point

d'appui et la puissance; 3^o le *levier du troisième genre*, quand la puissance se trouve entre le point d'appui et la résistance.

Dans les trois genres de leviers, les distances respectives de la puissance et de la résistance au point d'appui se nomment *bras de levier*. Si le levier est droit et perpendiculaire aux directions de ces deux forces, comme dans la figure 17, les deux portions *Ac* et *Bc* du levier sont elles-mêmes les bras de levier; mais si le levier est incliné par rapport à la direction des forces (fig. 18), les bras de levier sont les perpendiculaires *ca* et *cb* abaissées du point fixe sur les directions des forces.

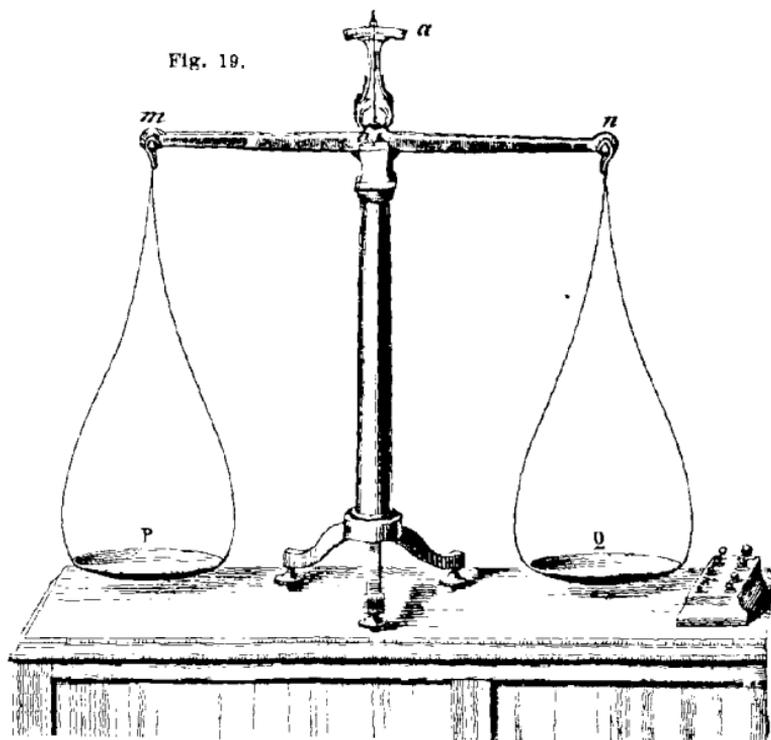
Or on démontre en mécanique qu'une force qui tend à faire tourner un levier autour de son point d'appui produit d'autant plus d'effet que sa direction passe plus loin de ce point, ou, ce qui est la même chose, qu'elle agit sur un plus grand bras de levier. Par suite, lorsque la puissance et la résistance ont même intensité et agissent sur des bras de levier égaux, elles produisent le même effet, mais en sens contraires, et dès lors se font équilibre; mais si elles agissent sur des bras de levier inégaux, si, par exemple, le bras de levier de la puissance est deux, trois fois plus grand que celui de la résistance, il découle du principe ci-dessus que les effets ne seront égaux qu'à la condition que la puissance soit deux, trois fois plus petite que la résistance; ce qu'on exprime en disant que, *pour que deux forces se fassent équilibre à l'aide d'un levier, leurs intensités doivent être en raison inverse des bras de levier auxquels elles sont appliquées.*

C'est-à-dire que, dans la figure 18, on a $\frac{P}{Q} = \frac{bc}{ac}$; d'où $P \times ac = Q \times bc$. Or, en mécanique, le produit $P \times ac$ d'une force par la perpendiculaire abaissée du centre de rotation *c* sur sa direction se nomme *moment* de cette force par rapport à ce point. On peut donc énoncer l'égalité ci-dessus, en disant que, lorsque deux forces se font équilibre à l'aide d'un levier, *les moments de la puissance et de la résistance par rapport au point d'appui sont égaux.*

50. Balances. — On nomme *balances* des instruments qui servent à déterminer le poids relatif des corps. On en construit de plusieurs sortes.

La balance ordinaire (fig. 19) consiste en un levier du premier genre *mn*, nommé *fléau*, dont le point d'appui est au milieu; aux deux extrémités sont suspendus des *bassins* ou *plateaux* *P*, *Q*, de même poids, destinés à recevoir, l'un des objets à peser, l'autre des poids cotés. Le fléau est traversé, en son milieu, par un prisme d'acier *ok* (fig. 21), qu'on nomme *couteau*; pour diminuer le frottement, l'arête vive de celui-ci, qui est l'*axe de suspension* du fléau, repose à ses deux bouts sur deux pièces polies *x*, *y*, d'agate ou d'acier, qui constituent la *chape*. Aux extrémités du

fléau sont adaptés deux prismes plus petits, dont l'arête vive est en haut et parallèle à celle du couteau central. C'est sur cette arête que reposent, à l'aide de crochets, les plateaux P et Q fig. 20. Enfin, à la partie supérieure du fléau est fixée une longue aiguille



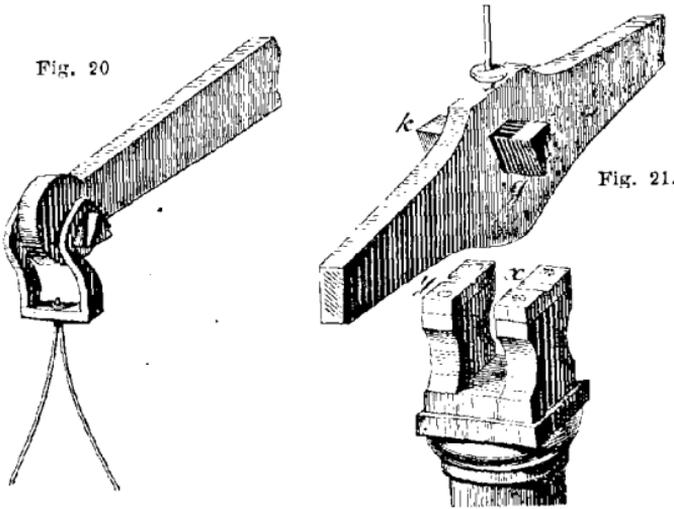
qui oscille devant un arc gradué *a*, fixe et porté par une colonne de laiton sur laquelle reposent la chape et le fléau. Quand ce dernier est bien horizontal, la pointe de l'aiguille correspond au milieu de l'arc. La colonne est portée par un pied à trois vis calantes, à l'aide desquelles on lui donne la position verticale.

Ces détails connus, il reste à chercher les conditions auxquelles doit satisfaire une balance : 1^o pour être *précise*, c'est-à-dire pour donner des pesées exactes ; 2^o pour être *sensible*, ou pour osciller sous l'influence d'une très-petite différence de poids.

51. Conditions de précision. — 1^o Les deux bras du fléau doivent être rigoureusement égaux en longueur et en poids ; sinon, d'après la théorie du levier, il faudrait dans les bassins des poids inégaux pour se faire équilibre. Pour vérifier si les bras du fléau sont égaux, on place des poids dans les deux plateaux, de ma-

nière que le fléau prenne la position horizontale. Transposant ensuite les poids respectivement d'un bassin dans l'autre, le fléau reste horizontal si les bras sont égaux; car, dans ce cas, les poids le sont aussi; sinon il incline du côté du bras le plus long.

Il ne suffit pas que les bras du fléau soient égaux, il faut que, pendant ses oscillations, leur longueur reste constante. C'est pour



satisfaire à cette condition qu'on fait reposer les plateaux sur deux prismes aux arêtes vives desquels correspondent, dans toutes les inclinaisons, les points de suspension (fig. 20).

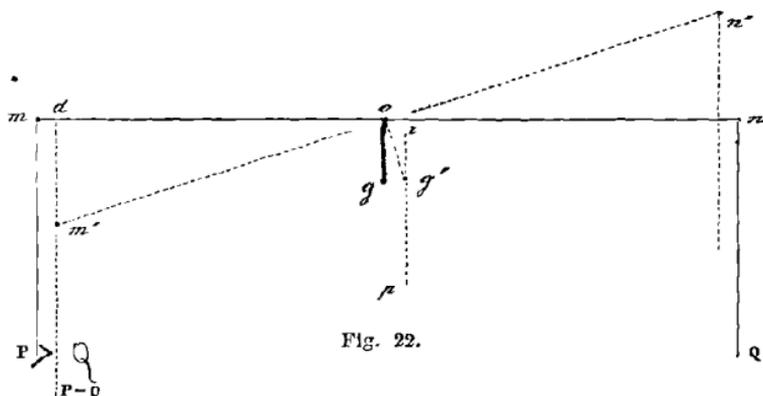
2° *Le centre de gravité du fléau, quand celui-ci est horizontal, doit se trouver sur la verticale qui passe par l'arête de suspension du couteau.* En effet, on a vu (47), pour un corps qui n'est soutenu que par un point ou par une droite, que l'équilibre n'est possible qu'autant que le centre de gravité est situé sur la verticale menée par ce point ou par cette droite.

3° *Le centre de gravité du fléau doit être au-dessous de l'arête du couteau.* Cette condition est nécessaire pour que l'équilibre du fléau soit stable; car, si son centre de gravité était au-dessus de l'arête de suspension, il ne pourrait prendre qu'un état d'équilibre instable (48), ce qu'on exprime en disant que la balance est folle; et si le centre de gravité coïncidait avec l'arête du couteau, l'effet de la pesanteur sur le fléau se trouvant détruit dans toutes les positions qu'on lui donne, il ne pourrait osciller, et ne ferait qu'incliner du côté où il y a excès de poids.

Lorsque les trois conditions ci-dessus sont satisfaites, les bas-

sins étant vides, la balance prend d'elle-même la position d'équilibre horizontale. Il en est encore ainsi quand on place dans les plateaux des poids égaux; car ceux-ci représentant des forces égales appliquées à deux bras de leviers égaux, il y a équilibre.

Si les poids sont inégaux, le fléau abandonne la position horizontale pour incliner vers le plus grand poids; mais il est à remarquer qu'il y a toujours une inclinaison du fléau pour laquelle



le poids de celui-ci fait équilibre à la différence des poids qui sont dans les plateaux. En effet, P et Q étant ces deux poids, et P plus grand que Q , soient m , o et n les intersections des arêtes des trois prismes par un plan vertical (fig. 22), p le poids du fléau, mn sa direction horizontale, g la position qu'occupe alors son centre de gravité, et g' celle qu'occupe ce point quand le fléau est incliné suivant $m'n'$. Ce dernier est alors sollicité en sens contraires par les deux poids $P - Q$ et p , dont les moments par rapport au centre d'oscillation o sont respectivement $(P - Q) \times od$ et $p \times oi$. Or, tandis que les facteurs $P - Q$ et p sont des quantités constantes, les facteurs od et oi varient avec l'inclinaison, od décroissant de om à zéro, et oi croissant de zéro à og' ; donc il y aura toujours un angle d'inclinaison mom' , pour lequel les deux moments seront égaux, ce qui donne l'équilibre (49).

52. **Conditions de sensibilité.** — Une balance est d'autant plus sensible, toutes choses égales d'ailleurs :

1° Que les bras du fléau sont plus longs.

En effet, on a vu ci-dessus (51) que la force qui fait incliner le fléau est l'excès de poids $P - Q$ appliqué au bras de levier od ; mais celui-ci, qui est la projection de om' sur om , est d'autant plus grand, que le bras du fléau est plus long; donc l'action de $P - Q$ croît avec la longueur du fléau.

2° Que le poids du fléau est moindre.

3° Que le centre de gravité du fléau est plus rapproché de l'axe de suspension.

Car la résistance qui s'oppose à l'inclinaison du fléau étant son poids p appliqué au bras de levier oi , et oi étant la projection de $og' = og$, plus les quantités p et og seront petites, plus la résistance à l'inclinaison le sera elle-même; d'où découlent la deuxième et la troisième condition ci-dessus.

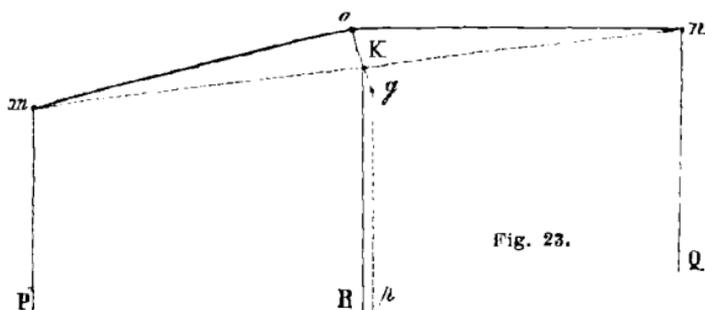


Fig. 23.

4° Les trois points de suspension des plateaux et du fléau doivent être en ligne droite.

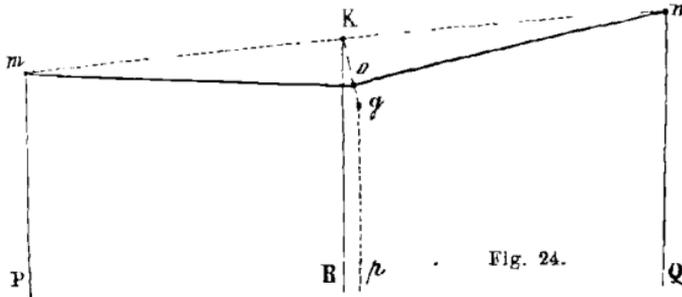
En effet, soit d'abord le point de suspension o du fléau au-dessus de la droite mn qui joint les points de suspension des plateaux (fig. 23), et soit P plus grand que Q d'une quantité p' . La résultante R des poids P et Q équivalant à $p' + 2Q$, la première partie p' reste appliquée en m , où elle fait incliner le fléau du côté de l'excès de poids, tandis que la deuxième partie $2Q$, appliquée en K milieu de mn , concourt avec le poids p du fléau pour faire osciller celui-ci en sens contraire. La balance perd donc de sa sensibilité.

Si le point o est au-dessous de la droite mn (fig. 24), la même décomposition des poids P et Q en $p' + 2Q$ ayant lieu, le poids $2Q$, toujours appliqué en K , agit dans le même sens que p' pour faire incliner le fléau. La balance tend donc à gagner en sensibilité. Cependant cette disposition est à rejeter, parce que la somme des moments de p' et de $2Q$ par rapport au point o étant, en général, plus grande que le moment de p par rapport au même point, la balance serait folle dans le plus grand nombre de cas.

Au contraire, lorsque les points m , o et n sont en ligne droite (fig. 22), le poids $2Q$, appliqué au point o même, est détruit par la résistance de ce point, et le fléau incline par la seule action de l'excès de poids p' appliqué en m . Il est à remarquer qu'alors la

pression exercée en o par la résultante $2Q$ étant détruite, et p' étant toujours très-petit, la sensibilité de la balance est indépendante de la grandeur des poids P et Q , abstraction faite toutefois du frottement du couteau sur la chape, frottement d'autant plus grand, que la balance est plus chargée.

5° Dans la limite de charge de la balance, le fléau doit être inflexible; car, s'il fléchit, non-seulement son centre de gravité s'abaisse, mais encore les points de suspension des plateaux.



6° Le frottement, aux points d'appui du couteau et aux points de suspension des plateaux, doit être le plus petit possible. C'est pour obtenir ce résultat que dans les balances de précision (54) on fait usage de chapes bien polies d'agate ou d'acier.

53. **Expression algébrique des conditions de sensibilité de la balance.** — On peut exprimer par une formule simple les trois premières conditions de sensibilité données dans le paragraphe précédent. Pour cela, soient α l'angle dom' (fig. 22), qui représente l'inclinaison du fléau, et p' la différence $P - Q$ des poids placés dans les plateaux. On a déjà vu (49) que le fléau étant en équilibre dans la position inclinée, on a $p' \times od = p \times oi$ [1]. Or le triangle rectangle dom' donne $od = om' \cos \alpha$, et dans le triangle oig' , semblable à dom' , comme ayant les côtés homologues perpendiculaires, on a $oi = og' \sin \alpha$. Portant ces valeurs dans l'égalité [1], et remplaçant om' et og' par leurs égales om et og , il vient $\frac{p'}{p} = \frac{og}{om} \tan \alpha$, d'où $\tan \alpha = \frac{p' \times om}{p \times og}$ [2].

Or l'angle α étant assez petit pour qu'on puisse remplacer la tangente α par l'arc α , qui mesure l'inclinaison et, par suite, la sensibilité de la balance, on voit par l'égalité [2] que cette sensibilité est directement proportionnelle à om , et inversement proportionnelle à p et à og , ce qui comprend les trois premières conditions exprimées au paragraphe 52.

* 54. **Balance de précision.** — La balance représentée dans la figure 19 est celle employée dans le commerce, auquel elle offre une précision suffisante; mais en physique, en chimie surtout, pour les analyses, on doit faire usage de balances plus précises.

La figure 25 montre une balance de précision construite par M. Deleuil, et sensible à un demi-milligramme. Afin de la garantir des agitations de l'air, on la reconvre d'une cage de verre qui la préserve de la poussière et de l'humidité. La face antérieure s'ouvre à volonté pour opérer les pesées: cette face n'est pas représentée dans le dessin, afin de ne pas masquer les détails.

Deux montants de fonte A et B supportent à leur sommet chacun un plateau d'agate sur lequel repose, à l'aide d'un prisme d'acier, le fléau *aa*. A chaque extrémité de celui-ci est fixé un prisme d'acier, l'arête en dessus, destiné à supporter une chape d'agate à laquelle est attaché un des plateaux. Si ces prismes restaient en contact avec les plans d'agate, leurs arêtes s'émousse-

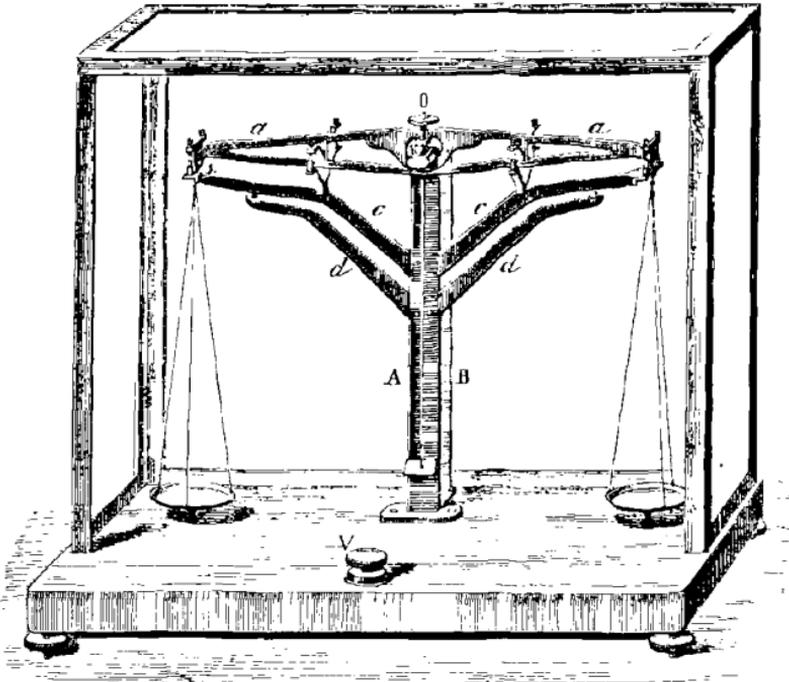


Fig. 25.

raient, et la balance perdrait de sa sensibilité. C'est pour éviter cet inconvénient qu'on adapte aux balances de précision un accessoire important, la *fourchette*, pièce mobile, destinée à soulever les plateaux et le fléau, toutes les fois que la balance ne fonctionne pas.

Les deux bras *d, d*, portés par le montant A, sont fixes et ne servent qu'à guider la fourchette. Celle-ci consiste en une pièce de fonte *cc*, aussi longue que le fléau : elle s'élève et s'abaisse à frottement doux le long du montant A, à l'aide d'une tige masquée par ce dernier dans le dessin; mais on verra ci-après le mécanisme qui fait monter et descendre la fourchette (fig. 28).

Pour faire comprendre mieux le jeu de la fourchette, la figure 27 représente, sur une plus grande échelle, le système qui sert à soulever les plateaux, et la figure 26, celui qui sert à soulever le fléau. A l'extrémité du fléau *a* (fig. 27) est un prisme d'acier *i*, et au-dessus de celui-ci une pièce *pq*, qui porte un des plateaux; dans la face inférieure de cette pièce est encastré un plan d'agate qui s'appuie sur le prisme quand la balance fonctionne. Au-dessous du fléau *a* est le bout de la fourchette *c*, qui porte deux boulons cylindriques *m, n*, disposés avec précision au-dessous de deux pièces coniques liées à la chape *pq*. Par suite, lorsque la fourchette monte, les boulons *m* et *n*, entaillés de cavités

convenablement disposées, reçoivent les deux cônes fixés à la pièce *pq*, soulèvent celle-ci et avec elle le plateau, qui se trouve ainsi porté tout entier par la fourchette. En même temps, le même effet se produit identiquement à l'autre extrémité du fléau. Un mécanisme analogue sert à soulever le fléau pour empêcher son couteau de reposer sur la chape. Pour cela, à la partie moyenne de chacun des bras du fléau *aa* sont adaptées deux pièces coniques *r, s* (fig. 26), et, exactement au-dessous, sont fixés à la fourchette *c* deux boulons *k, h*, portant des cavités destinées à recevoir les cônes *r* et *s*. Par cette disposition, la

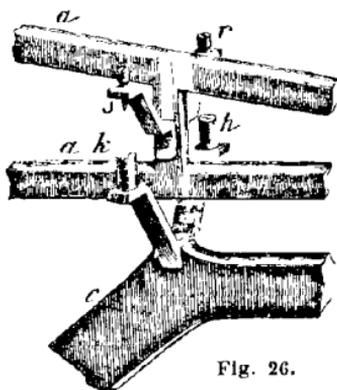


Fig. 26.

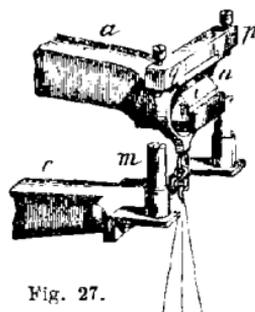


Fig. 27.

fourchette ayant déjà soulevé les plateaux, comme on l'a vu ci-dessus, et continuant à monter, les boulons *k* et *h* rencontrent les cônes *s, r*, et les soulèvent. Le même effet se produit simultanément en quatre points du fléau, celui-ci est soulevé, et les trois prismes restent sans charge tant que la fourchette est soulevée.

La figure 28 représente le mécanisme à l'aide duquel on fait marcher la fourchette. Il se compose d'un levier *ab* placé sous la tablette qui porte la balance. Ce levier, mobile autour d'un axe horizontal *A*, est articulé d'un bout à une tige *D* reliée à la fourchette et la faisant marcher; de l'autre, il porte un ap-

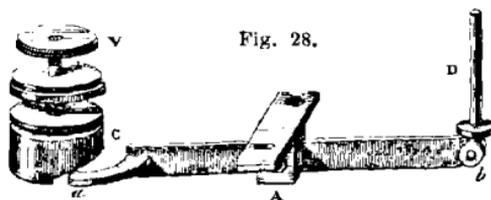


Fig. 28.

pendice *a* sur lequel presse une pièce cylindrique *C* entaillée en hélice à sa base. On fait tourner cette pièce à l'aide d'un bouton *V* représenté en avant de la balance (fig. 25). Lorsque, en tournant, le bord incliné de la pièce *C* presse sur l'appendice *a* et l'abaisse, la tige *D* est soulevée et avec elle la fourchette. En tournant en sens contraire, la tige *D* s'abaisse et la fourchette descend.

Sur le fléau est un bouton à vis *O* (fig. 25); son usage est de régler la sensibilité de la balance. En effet, comme il est partie adhérente du fléau, lorsqu'on remonte ce bouton, le centre de gravité de tout le système est relevé, et la sensibilité augmente (52, 3°); l'inverse se produit quand on abaisse le bouton. Si on le relève trop, la balance devient folle.

55. Méthode des doubles pesées. — On doit à Borda, physicien français, mort à Paris en 1799, un procédé qui permet d'obtenir des pesées exactes avec une balance dont les bras sont inégaux. Pour cela, on place le corps dont on veut connaître le poids dans un des plateaux, et on lui fait équilibre, dans l'autre, avec de la grenaille de plomb ou du sable; puis on enlève du premier plateau le corps à peser, et on le remplace par des grammes et des subdivisions de gramme jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse de nouveau. Le poids obtenu ainsi est exactement celui du corps; car, dans cette double pesée, le corps et les grammes agissent tour à tour sur le même bras du fléau pour faire équilibre à la même résistance.

On peut aussi déterminer le poids d'un corps avec précision par la méthode suivante, qui consiste à peser deux fois le corps, en le plaçant successivement dans chacun des plateaux, ce qui revient encore à une double pesée, puis à déduire par le calcul le poids cherché des deux résultats obtenus.

En effet, ayant posé le corps à peser dans l'un des plateaux, et dans l'autre des grammes jusqu'à ce qu'il y ait équilibre, soient x le poids cherché, p le nombre des grammes qui lui font équilibre, et a et b les longueurs des bras de levier correspondant respectivement aux poids x et p . D'après le principe d'équilibre du levier donné plus haut (49), on a $\frac{x}{p} = \frac{b}{a}$, ou $ax = pb$ [1]. De même, si l'on représente par p' le nombre des grammes qui font équilibre au corps après l'avoir changé de plateau, on a $bx = ap'$ [2]. Multipliant membre à membre les égalités [1] et [2], et supprimant le facteur commun ab , on a

$$x^2 = pp', \text{ d'où } x = \sqrt{pp'}.$$

Ce qui fait voir que le poids cherché est moyen proportionnel entre les deux poids p et p' .

Les deux bras d'une balance n'étant jamais parfaitement égaux, on doit toujours, dans les pesées de précision, faire usage de l'une des deux méthodes ci-dessus. Toutefois cela ne suffit pas pour obtenir rigoureusement le poids d'un corps. En effet, il sera démontré (173) que tout corps pesé dans l'air perd une partie de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace; d'où il résulte que tout poids obtenu par la balance n'est qu'un poids apparent, moindre que le poids réel. On verra (174) comment on déduit, par le calcul, le poids réel du poids apparent.

CHAPITRE III

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS, INTENSITÉ DE LA PESANTEUR, PENDULE

56. Lois de la chute des corps. — En négligeant la résistance de l'air, c'est-à-dire en supposant que les corps tombent dans le vide, leur chute est soumise aux trois lois suivantes :

1^{re} Loi. — *Tous les corps, dans le vide, tombent également vite.* Cette loi se démontre par l'expérience, au moyen d'un tube de verre de 2 mètres de longueur environ, fermé à l'une de ses extrémités et terminé, à l'autre, par un robinet de cuivre. On y introduit des corps de densités différentes, par exemple, du plomb, du liège, du papier, une barbe de plume; puis on fait le vide avec la machine pneumatique. Retournant ensuite le tube brusquement, on voit tous les corps qu'on y a introduits tomber également vite (fig. 29). Mais si, après avoir fait rentrer un peu d'air, on renverse de nouveau le tube, on remarque un faible retard pour les corps les plus légers. Enfin, ce retard devient très-apparent lorsqu'on a laissé rentrer tout à fait l'air. Donc si, dans les conditions ordinaires, les corps tombent inégalement vite, cela provient uniquement de la résistance de l'air, et non de ce que la pesanteur s'exerce avec plus d'intensité sur certaines substances que sur d'autres. Un corps qui a deux fois plus de masse qu'un autre est bien, en réalité, attiré vers la terre par une force double; mais cette force double devant mettre en mouvement une quantité de matière double, on a vu (36) qu'elle ne peut lui donner que la même accélération de vitesse que reçoit l'autre corps d'une force deux fois plus petite.

La résistance que l'air oppose à la chute des corps est surtout sensible pour les liquides. Dans l'air, ils se divisent et tombent en gouttelettes; dans le vide, ils tombent, comme ferait une masse solide, sans se diviser. Ce phénomène se démontre avec le *marteau d'eau*. On nomme ainsi un tube de verre un peu gros, de 30 à 40 centimètres de long, rempli d'eau à moitié et fermé à la lampe après qu'on en a chassé l'air par l'ébullition. Lorsqu'on retourne ce tube brusquement, l'eau, en tombant, vient frapper l'extrémité inférieure en rendant un son sec, comme le ferait le choc de deux corps solides.

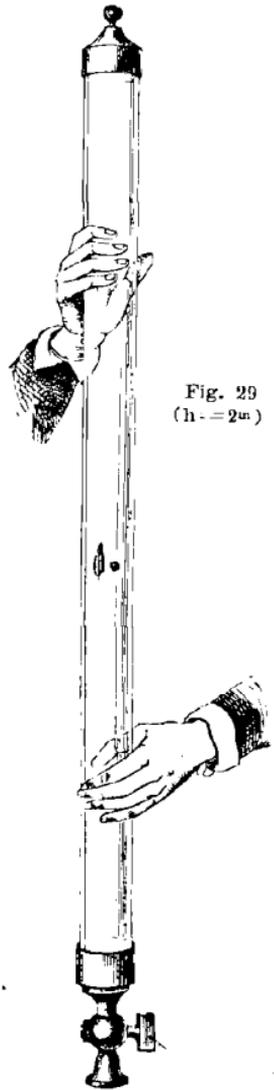


Fig. 29
(h = 2^m)

2^e LOI, OU LOI DES ESPACES. — *Les espaces parcourus par un corps qui, partant de l'état de repos, tombe dans le vide, sont proportionnels aux carrés des temps pendant lesquels ils ont été parcourus.* En d'autres termes, dans des temps représentés par 1, 2, 3, 4..... les espaces parcourus le sont respectivement par 1, 4, 9, 16.....

3^e LOI, OU LOI DES VITESSES. — *La vitesse acquise par un corps qui tombe dans le vide est proportionnelle au temps pendant lequel il est tombé.* C'est-à-dire qu'au bout d'un temps 2, 3, 4 fois plus grand, la vitesse acquise est elle-même 2, 3, 4 fois plus grande.

On va voir ci-après comment la loi des espaces et celle des vitesses se vérifient par l'expérience (57, 58 et 59).

Conséquence. — Puisque, d'après la deuxième loi, l'espace parcouru dans la première seconde étant 1, les espaces parcourus dans 2, 3, 4, 5..., secondes sont 4, 9, 16, 25..., il en résulte que l'espace parcouru dans la deuxième seconde est 4 moins 1, ou 3; dans la troisième seconde, il est 9 moins 4, ou 5; dans la quatrième, 16 moins 9, ou 7, et ainsi de suite; c'est-à-dire que *les espaces parcourus successivement dans la première, la deuxième, la troisième, la quatrième.... seconde, sont entre eux comme la suite naturelle des nombres impairs 1, 3, 5, 7....*

Les lois de la chute des corps ne sont vraies que dans le vide et pour des hauteurs de chute peu considérables. Dans l'air, elles sont modifiées par la résistance que rencontrent les corps; de plus, on verra bientôt qu'à des hauteurs inégales dans l'atmosphère, l'intensité de la pesanteur n'est pas rigoureusement la même (61).

C'est Galilée qui, à la fin du xvi^e siècle, découvrit les lois de la pesanteur, et les fit connaître dans ses cours, à l'université de Pise, où il professait les mathématiques.

57. **Plan incliné.** — Les appareils qui servent à démontrer les

lois de la chute des corps sont le *plan incliné*, la *machine d'Atwood* et l'*appareil à indications continues de M. Morin*.

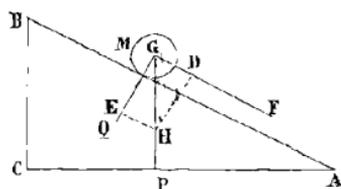


Fig. 30.

d'un plan incliné. En effet, représentons par BAC (fig. 30) l'angle d'un plan incliné BA avec un plan horizontal AC, et par BC une perpendiculaire abaissée d'un point quelconque B de la ligne AB sur la ligne AC. Un corps quelconque M s'appuyant sur le plan incliné, son poids P pourra être décomposé en deux forces Q et F, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au plan incliné. La première sera détruite par la résistance du plan, et la force F agira seule sur la masse M pour

la faire descendre. Pour calculer la valeur de F , on porte sur GP une longueur GH qui représente le poids P , et l'on achève le parallélogramme $DGEH$ (30) ; la force F est alors représentée par DG . Or les triangles DGH et ABC sont semblables, comme ayant les angles égaux, ce qui donne $\frac{DG}{GH} = \frac{BC}{AB}$, ou $\frac{F}{P} = \frac{BC}{AB}$.

De cette dernière égalité on conclut que la force F est d'autant plus petite par rapport à P , que la hauteur BC du plan incliné est plus petite par rapport à sa longueur AB . On peut donc rendre la force F aussi petite qu'on le veut, et ralentir le mouvement du mobile M de manière à pouvoir compter, sur le plan incliné, les chemins parcourus en une, deux, trois... secondes, et cela sans que les lois du mouvement soient changées, puisque la force F est continue et constante. C'est en opérant ainsi que Galilée a fait voir que les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps ; ce qui est la loi des espaces (56, 2°). Or on a vu (35) que lorsque les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir, le mouvement est uniformément accéléré : donc de l'expérience de Galilée on déduit la loi des vitesses (56, 3°).

58. **Machine d'Atwood.** — Les lois de la chute des corps se démontrent encore au moyen de la *machine d'Atwood*, ainsi nommée du nom de son inventeur, professeur de chimie à Cambridge, à la fin du siècle dernier. Cette machine se compose d'une colonne de bois (fig. 31) de 2^m,30 environ de hauteur. A son sommet est une cage de verre sous laquelle est placée une poulie de cuivre R ; sur celle-ci s'enroule un fil de soie assez fin pour que son poids puisse être négligé, et soutenant, à ses deux bouts, deux poids égaux K, K' . L'axe de la poulie, au lieu de reposer sur deux coussinets fixes, s'appuie sur les jantes croisées de quatre roues mobiles. Par cette disposition, l'axe de la poulie transmettant son mouvement aux quatre roues, au lieu d'un frottement de glissement, il se produit un frottement de roulement qui est beaucoup plus doux. Sur le devant de la colonne est fixé un mouvement d'horlogerie H , que règle un pendule à secondes P , au moyen d'un échappement à ancre (fig. 45, page 55). Ce dernier est représenté sur le cadran, au-dessus de la roue de rencontre qui en occupe le centre. Cet échappement oscille avec le pendule, et, en inclinant tantôt à droite, tantôt à gauche, il laisse passer, à chaque oscillation, une dent de la roue de rencontre. L'axe de celle-ci porte, à l'extrémité antérieure, une aiguille qui marque les secondes, et à l'extrémité postérieure, derrière le cadran, un excentrique e (fig. 32), qui tourne avec l'aiguille dans le sens de la flèche. Cet excentrique, en appuyant sur le levier ba , fait basculer un plateau n sur lequel se place le corps dont on veut observer la chute. Pour cela, à l'axe horizontal qui porte le plateau n est fixé un taquet i , qui s'appuie sur le bout supérieur du levier ab . Tant que ce levier n'est pas chassé par l'excentrique, le taquet est maintenu et avec lui le plateau n ; mais à l'instant où l'extrémité a du levier, en inclinant à droite, abandonne le taquet, le plateau n bascule, et le poids qu'il

soutenait tombe. Le système est réglé de façon que la chute commence au moment précis où l'aiguille du cadran H arrive au zéro de la graduation.

Enfin, parallèlement à la colonne est une échelle de bois divisée en centimètres, et destinée à mesurer les espaces parcourus par le corps qui tombe. Sur cette échelle sont deux *courseurs*, c'est-à-dire deux pièces mobiles qui, à l'aide de vis de pression, peuvent se placer à telle hauteur qu'on veut. Ces curseurs sont représentés dans différentes positions, sur la droite de la machine, dans les figures 32 à 37. L'un d'eux A (fig. 32 à 34) porte un disque plein, qui sert à arrêter, à un moment donné de sa chute, le corps qui tombe; l'autre B (fig. 35 à 37) porte un anneau, qui se laisse traverser par le corps qui tombe, mais arrête au passage un poids additionnel m qu'on place sur ce corps, et qui consiste en une lame de laiton plus longue que le diamètre intérieur de l'anneau. La figure 38 représente sur une plus grande échelle le poids additionnel m et le poids K sur lequel il se place. Dans la figure 31, les poids K, K' se font équilibre, et ce n'est qu'en vertu de l'excès de poids m qu'on pose sur le premier, que l'équilibre est rompu et que la chute du poids K est déterminée.

La machine d'Atwood donne le moyen de ralentir la vitesse de chute, et de faire succéder, à volonté, un mouvement uniforme à un mouvement accéléré.

Pour apprécier comment cette machine peut ralentir le mouvement, supposons que la petite plaque de laiton m tombe d'abord seule, et représentons par m' sa masse et par g sa vitesse au bout d'une seconde; d'où sa quantité de mouvement est $m'g$ (36). Si maintenant on place la plaque m sur le poids K, elle ne peut tomber qu'en communiquant une partie de sa vitesse aux deux poids K et K', puisque, ceux-ci se faisant équilibre, la pesanteur est sur eux sans effet. Par conséquent, c'est la même force qui faisait tomber le poids m , quand il était seul, qui maintenant va mouvoir ce poids et les deux poids K et K'. La quantité de mouvement sera donc la même (36). Or, si l'on représente par x la vitesse au bout d'une seconde, et par M la masse de chacun des poids K, K', la quantité de mouvement est maintenant $(m' + 2M)x$. L'égalant à celle de la masse m' lorsqu'elle tombait seule, on a $(m' + 2M)x = gm'$; d'où $x = \frac{gm'}{m' + 2M}$. Si l'on suppose, par exemple, que les poids K et K' soient

chacun 16, le poids m étant 1, on trouve $x = \frac{g}{33}$; c'est-à-dire que la vitesse est 33 fois plus petite que si le corps tombait librement dans l'air, ce qui permet de le suivre dans sa chute, et rend la résistance de l'air négligeable.

Les diverses pièces de la machine étant connues, proposons d'abord de démontrer que *les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps*. Pour cela, le pendule P étant arrêté et l'aiguille du cadran hors du zéro, on place le poids additionnel m sur le poids K, et l'on pose celui-ci ainsi chargé sur le

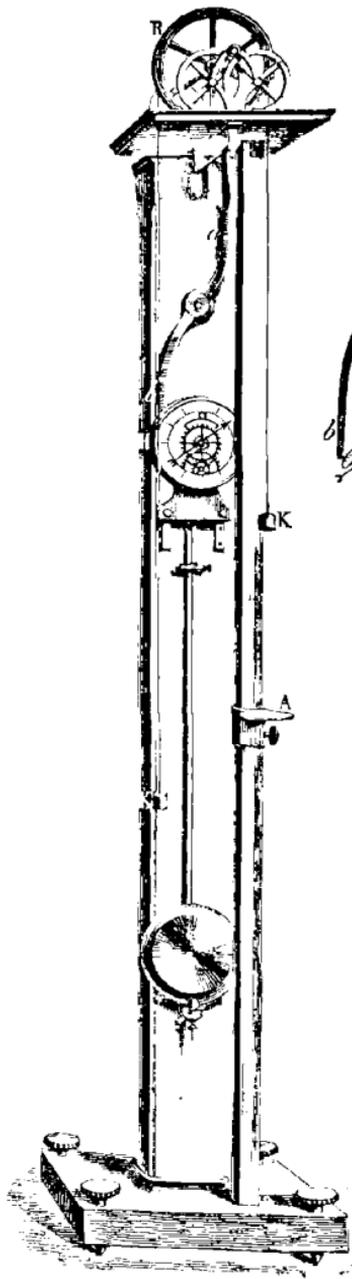


Fig. 31.

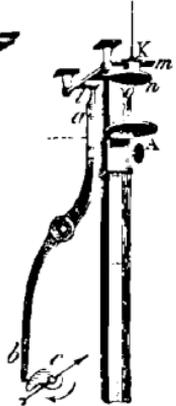


Fig. 32.



Fig. 33.



Fig. 34.



Fig. 35.

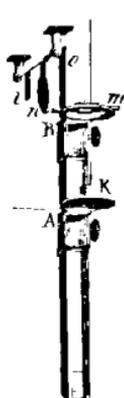


Fig. 36.



Fig. 37.

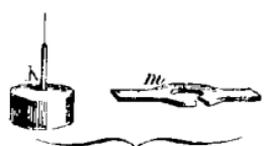


Fig. 38.

plateau n (fig. 32), maintenu horizontalement par le levier ab , et correspondant au zéro de l'échelle. Ne faisant alors usage que du curseur plein A, on le place par tâtonnement à une distance telle du zéro de l'échelle, que les deux poids K et m mettent 1 seconde à tomber de o en A, lorsqu'on met le pendule en mouvement et que l'excentrique e fait basculer le plateau (fig. 33).

Admettons qu'on ait ainsi trouvé que la hauteur de chute, en 1 seconde, soit 7. Re commençant alors l'expérience de la même manière, mais en abaissant le curseur à une distance quatre fois plus grande, c'est-à-dire à la 28^e division de l'échelle (fig. 34), on observe que cet espace est parcouru juste en 2 secondes par les deux poids K et m . On trouve de même qu'une hauteur neuf fois plus grande, ou de 63 divisions, est parcourue en 3 secondes, et ainsi de suite : la loi des espaces est donc vérifiée.

Il reste à vérifier que *les vitesses croissent proportionnellement aux temps*. Pour cela, il faut se rappeler que, dans le mouvement accéléré, on entend par vitesse, en un moment donné, celle du mouvement uniforme qui succède au mouvement accéléré (35). Par conséquent, pour constater suivant quelle loi varie la vitesse d'un corps qui tombe, il suffit de mesurer la vitesse du mouvement uniforme qui succède au mouvement accéléré, successivement après une, deux, trois... secondes de chute.

La substitution du mouvement uniforme au mouvement accéléré s'obtient au moyen du curseur annulaire B. Pour cela, on commence par placer celui-ci à une distance telle (fig. 35), que les deux poids K et m , réunis, mettent, à tomber jusqu'en B, 1 seconde, comme dans la première expérience; puis le poids additionnel m étant alors arrêté par le curseur B (fig. 36), et le poids K continuant seul à descendre, on place le curseur plein A au-dessous de B, à l'intervalle convenable pour que le poids K mette 1 seconde à descendre d'un curseur à l'autre. Or, de o en B, le mouvement est uniformément accéléré, tandis que de B en A il est uniforme; car le petit poids m étant arrêté par le curseur annulaire, la pesanteur n'agit plus de B en A, et le mouvement ne se continue qu'en vertu de l'inertie. Le nombre des divisions de l'échelle parcourues en une seconde par le poids K, d'un curseur à l'autre, représente donc la vitesse acquise par les deux poids K et m au bout d'une seconde de chute (35).

Re commençant alors l'expérience, on descend le curseur annulaire B à une distance quatre fois plus grande que la première fois (fig. 37), en sorte que les deux poids K et m mettent 2 secondes à tomber de o en B, d'après la seconde loi (56); puis on fixe le curseur plein A à une distance du curseur B double de celle qui

les séparait tout à l'heure. Or, les deux points K et m mettant maintenant 2 secondes à parcourir la distance oB , d'un mouvement uniformément accéléré, on observe que le poids K descend, seul, en 1 seconde, de B à A . Donc, puisque la distance BA est maintenant double de ce qu'elle était d'abord, la vitesse acquise au bout de 2 secondes est double de celle acquise après 1 seconde. On constate de même qu'après 3, 4, 5 secondes de chute, cette vitesse est 3, 4, 5 fois plus grande; donc la troisième loi est vérifiée.

59. **Appareil à indications continues de Morin.** — Le principe de cet appareil, dont l'idée première est due à Poncelet, est que le corps tombant trace lui-même, sur un cylindre tournant, le chemin parcouru. La figure 39 en montre une vue d'ensemble, et la figure 40 en donne les détails. L'appareil se compose d'un bâti de bois de 2 mètres de hauteur, qui sert à maintenir verticalement un cylindre de bois M , très-léger et pouvant tourner librement sur deux pivots. Ce cylindre est recouvert d'un papier divisé en carrés égaux par des lignes horizontales et verticales équidistantes. Ces dernières servent à mesurer le chemin parcouru par le corps qui tombe le long du cylindre, et les lignes horizontales à partager en parties égales la durée de la chute.

Le corps qui tombe est une masse de fonte P , portant un crayon i pressé contre le papier par un petit ressort. Dans sa chute, cette masse est guidée par deux fils de fer bien tendus qui passent dans des oreilles sur les deux côtés. A sa partie supérieure, la même masse porte un mentonnet qui s'appuie sur l'extrémité d'un levier coudé AC . Par suite, en tirant sur un cordeau K attaché au levier, celui-ci lâche le mentonnet, et la masse P tombe. Si le cylindre M était fixe, le crayon tracerait sur le papier une ligne droite qui serait une génératrice du cylindre; mais si ce dernier tourne d'un mouvement uniforme, le crayon trace une courbe mn , qui sert à constater la loi de la chute.

Quant à la rotation du cylindre, elle s'obtient à l'aide d'un poids Q suspendu à une corde qui s'enroule sur un treuil G . L'axe de celui-ci porte à un bout une roue dentée c qui mène deux vis sans fin a et b , dont la première fait tourner le cylindre et l'autre deux ailettes $x x'$. A l'autre bout du treuil est une roue à rochet o dans les dents de laquelle s'engage l'extrémité d'un rochet B , qui empêche le treuil et tout le système de tourner. Mais en tirant sur un cordeau H attaché au rochet, la roue o devient libre, le poids Q descend et tout le système se met à tourner. Le mouvement est d'abord accéléré; mais l'air présentant aux ailettes une résistance d'autant plus grande, que la rotation est plus rapide, cette résistance finit par égaler l'accélération que tend à imprimer la pesan-

teur. A partir de ce moment, le mouvement devient uniforme, ce qui arrive quand le poids Q a parcouru environ les trois quarts de sa course. C'est alors que, tirant sur le cordeau K , on fait tomber la masse P , et que le crayon trace la courbe mn .

Fig. 39
(h=2^m,20).

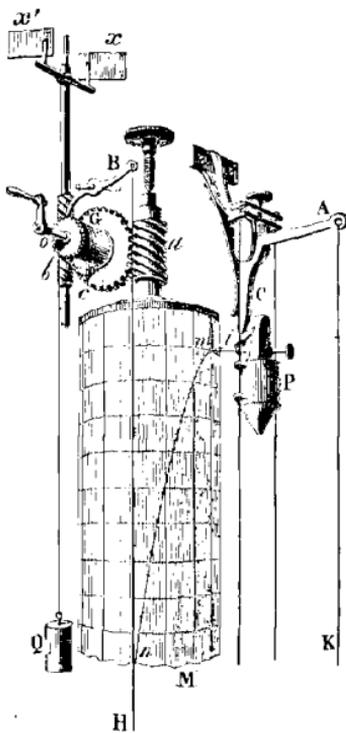
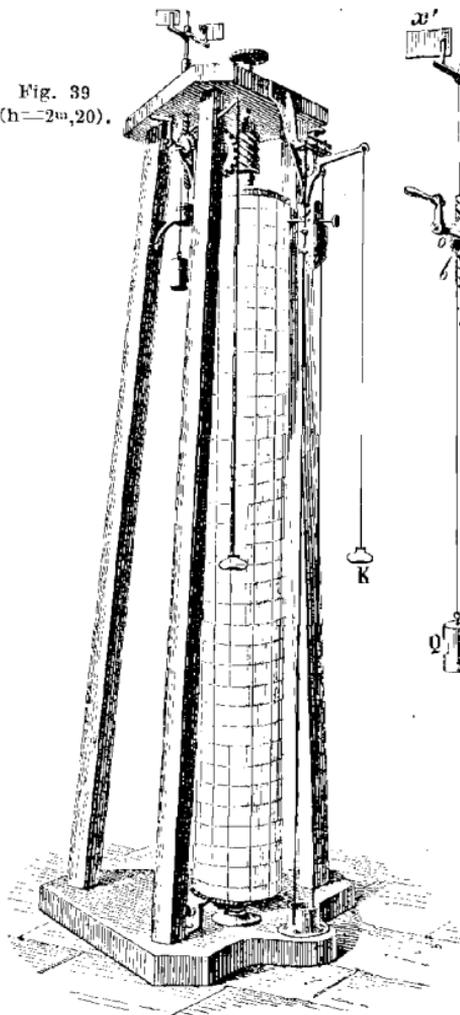


Fig. 40.

Si l'on enlève alors la feuille de papier de dessus le cylindre, et qu'on la développe sur un plan, on obtient la figure 41, dans laquelle les longueurs Ma , Ma' , Ma'' , Ma''' représentant des intervalles de temps 1, 2, 3, 4...., les droites ac , $a'c'$, $a''c''$, $a'''c'''$, représentent les espaces parcourus respectivement dans ces intervalles

par le corps qui tombe. Or, si l'on prend la distance ac pour unité, c'est-à-dire si on la suppose égale à 1, on trouve que $a'c'$ vaut 4, $a''c''$ 9, $a'''c'''$ 16; ce qui vérifie que les espaces ac , $a'c'$, $a''c''$, croissent comme les carrés des temps Ma , Ma' , Ma''

La relation en vertu de laquelle, en un point quelconque c''' de la courbe MN , la distance $a'''c'''$, ou Mp , est proportionnelle

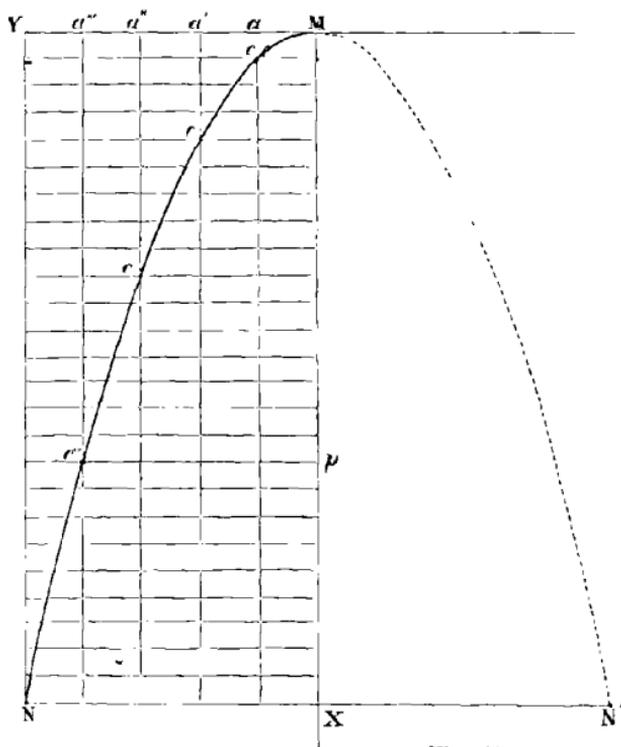


Fig. 41.

au carré de Ma''' , ou de pc''' , fait voir que cette courbe est une branche de la courbe NMN' connue en géométrie sous le nom de *parabole*. Le point M en est le sommet, et la droite MX l'axe.

60. Formules relatives à la chute des corps. — La chute des corps dans le vide s'effectuant suivant un mouvement uniformément accéléré, dans les limites du moins où la pesanteur peut être regardée comme constante (61), les formules trouvées plus haut (35) pour ce mouvement s'appliquent aussi à la chute des corps dans le vide. Seulement toutes les fois qu'il s'agit de la pesanteur, on est convenu de représenter l'accélération de vitesse par seconde par g .

Les formules s'écrivent donc alors sous les formes $v = gt$ [1], et $e = \frac{1}{2}gt^2$ [2], qui correspondent respectivement à la troisième et à la deuxième loi de la chute des corps (56).

Si, dans la formule [2], on fait $t = 1$, il vient $e = \frac{1}{2}g$; d'où $g = 2e$. C'est-à-dire que la vitesse acquise au bout de l'unité de temps est double de l'espace parcouru dans le même temps.

Dans l'égalité [1], la vitesse v est exprimée en fonction du temps; mais on peut aussi l'exprimer en fonction de l'espace parcouru, en éliminant t entre les égalités [1] et [2]. Pour cela, on tire de la première $t = \frac{v}{g}$, d'où $t^2 = \frac{v^2}{g^2}$.

Portant cette valeur de t^2 dans l'égalité [2], on a $e = \frac{1}{2}g \times \frac{v^2}{g^2}$, ou $e = \frac{v^2}{2g}$, en supprimant le facteur commun g . Multipliant par $2g$ les deux membres de cette égalité, il vient $v^2 = 2ge$; si l'on extrait la racine, on a enfin $v = \sqrt{2ge}$ [3].

Cette formule se déduit de la formule $v = \sqrt{2ae}$ (35), en y remplaçant a par g ; elle montre que lorsqu'un corps tombe dans le vide, la vitesse acquise en un instant donné est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de chute.

61. Causes qui modifient l'intensité de la pesanteur. — Trois causes font varier l'intensité de la pesanteur : la distance au centre de la terre, l'aplatissement de celle-ci aux pôles, et la force centrifuge.

1° L'attraction terrestre s'exerçant comme si toute la masse du globe était condensée à son centre, et cette traction agissant en raison inverse du carré de la distance (41 et 42), il en résulte que l'intensité de la pesanteur croît ou décroît, quand les corps s'approchent ou s'écartent de la terre. Toutefois cette variation n'est pas apparente dans les phénomènes qui s'observent à la surface de notre globe, parce que son rayon moyen étant de 6 367 400 mètres, l'intensité de la pesanteur reste sensiblement la même lorsqu'un corps s'élève ou s'abaisse de quelques dizaines de mètres. Mais, pour des hauteurs plus considérables, la pesanteur ne peut plus être regardée comme constante. Les lois de la chute des corps énoncées au paragraphe 56 ne doivent donc être admises que pour les corps qui tombent d'une faible hauteur.

Si un corps tombait d'une grande hauteur vers la terre, jusqu'à la surface de celle-ci, la pesanteur agirait toujours sur le corps en raison inverse du carré de la distance au centre; mais si c'est à partir de la surface de la terre qu'on suppose qu'un corps tombe, le calcul fait voir que la loi n'est plus la même, et que si la terre était parfaitement homogène, l'intensité de la pesanteur serait alors *directement proportionnelle* à la distance au centre, ce qui résulte de la portion de la masse terrestre que le corps laisse au-dessus de lui en tombant. Toutefois ce résultat de la théorie ne se vérifie pas par l'expérience dans les puits très-profonds qui servent à l'exploitation des mines, ce qu'on explique parce que la densité des couches superficielles du globe est beaucoup moindre que celle des couches situées à une plus grande profondeur.

2° L'intensité de la pesanteur varie encore avec la latitude, à

cause de l'aplatissement de la terre à ses deux pôles ; car, vers ces points, les corps sont plus rapprochés du centre du sphéroïde terrestre, et par conséquent plus attirés.

3^o La troisième cause qui modifie l'intensité de la pesanteur est la *force centrifuge*. On nomme ainsi une force à laquelle donne naissance le mouvement circulaire, et en vertu de laquelle les masses animées de ce mouvement tendent à s'éloigner de l'axe de rotation. On démontre, en mécanique, que la force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation ; donc, sous un même méridien, cette force croît à mesure qu'on approche de l'équateur, où elle atteint son maximum, puisque c'est là qu'a lieu la plus grande vitesse. Au pôle, la force centrifuge est nulle.

Sous l'équateur, la force centrifuge est directement opposée à la pesanteur et égale $\frac{1}{289}$ de son intensité. Or 289 étant le carré de 17, si le mouvement de rotation de la terre était 17 fois plus rapide, la force centrifuge, qui est proportionnelle au carré de la vitesse, serait, sous l'équateur, 289 fois plus intense qu'elle ne l'est, c'est-à-dire égale à la pesanteur, et les corps ne pèseraient pas ; pour un mouvement de rotation plus rapide, ils seraient lancés dans l'espace par l'effet de la force centrifuge.

Quand on avance de l'équateur vers les pôles, la pesanteur est de moins en moins affaiblie par l'effet de la force centrifuge : d'abord, parce que cette dernière force décroît dans le même sens ; ensuite, parce que, sous l'équateur, elle est directement opposée à la pesanteur, tandis qu'en avançant vers les pôles, sa direction devient de plus en plus inclinée par rapport à celle de cette force. C'est ce que montre la figure 42, dans laquelle PP' représente l'axe de rotation de la terre, et EE' l'équateur terrestre.

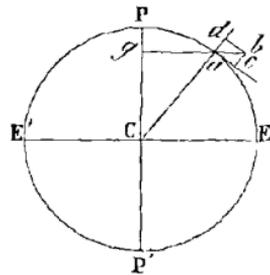


Fig. 42.

En un point quelconque E de ce cercle, la force centrifuge est dirigée suivant CE, et agit tout entière pour diminuer l'intensité de la pesanteur ; mais en un point a, plus rapproché du pôle, la force centrifuge étant représentée par une droite ab perpendiculaire à l'axe PP', tandis que la pesanteur agit suivant ac, on voit que la pesanteur n'est plus directement opposée à la force centrifuge, mais seulement à sa composante ad, qui est d'autant plus petite par rapport à ab, que le point a est plus près du pôle.

62. **Mesure de l'intensité de la pesanteur.** — D'après ce qui précède, la pesanteur pouvant être considérée, dans un même lieu et pour des hauteurs de chute peu considérables, comme une force

accélératrice constante, on prend pour mesure de son intensité la vitesse qu'elle imprime, en une seconde, aux corps qui tombent dans le vide, sans avoir égard à la masse, puisque, dans le vide, tous les corps tombent également vite (56).

Cette vitesse se représente par g . Elle croît de l'équateur au pôle : à Paris, d'après Borda et Cassini, elle est de $9^m,8088$; à l'équateur elle n'est que de $9^m,7800$. On verra bientôt comment elle se détermine, en chaque lieu, à l'aide du pendule (67).

Les variations d'intensité que subit la pesanteur avec la latitude ou l'altitude modifient le poids absolu des corps (45), mais ne changent rien à leur poids relatif, c'est-à-dire à celui que donne la balance. En effet, l'action de la pesanteur s'exerce également sur toutes les substances, l'augmentation ou la diminution de poids qui résulte des variations de cette force est la même, en chaque lieu, pour les corps à peser et pour les poids métriques ou autres dont on fait usage. En un mot, le nombre de grammes qui représente le poids d'un corps à Paris, le représente aussi au pôle ou à l'équateur. Ce qui varie, c'est le poids du gramme, qui croît ou décroît proportionnellement à l'intensité de la pesanteur.

63. **Pendule.** — On distingue deux sortes de pendules : le *pendule simple* et le *pendule composé*. Le *pendule simple* est celui qui serait formé d'un point matériel pesant, suspendu par un fil inextensible, sans masse et sans poids, à un point fixe autour duquel il pourrait librement *osciller*, c'est-à-dire prendre un mouvement de va-et-vient plus ou moins rapide. Ce pendule ne peut se réaliser; il est purement théorique, et ne sert qu'à déterminer par le calcul les lois des oscillations du pendule.

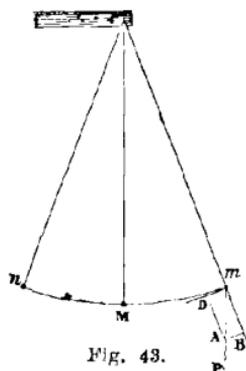
On nomme *pendule composé* tout corps qui peut osciller autour d'un point ou d'un axe fixe. Quand le pendule oscille autour d'un point, celui-ci prend le nom de *centre de suspension*; si le mouvement a lieu autour d'une droite horizontale, cette droite est appelée *axe de suspension*. Le pendule composé est le seul qu'on puisse construire. Sa forme peut varier à l'infini; mais, en général, il consiste en une masse métallique, lenticulaire ou sphérique, suspendue à une tige mobile autour d'un axe horizontal; tels sont les balanciers d'horloge; tel est le pendule P (fig. 31).

Les pendules composés sont suspendus, soit à l'aide d'un coupeau analogue à celui des balances (fig. 21), soit à l'aide d'une lame d'acier, mince et flexible, qui se courbe légèrement à chaque oscillation (fig. 45).

Pour nous rendre compte du mouvement oscillatoire du pendule, considérons d'abord un pendule simple cM , dont M soit le point matériel, et c le centre de suspension (fig. 43). Lorsque le

point M se trouve au-dessous du point c , sur la verticale passant par ce point, l'action de la pesanteur est détruite; mais si le point M est transporté en m , son poids P se décompose en deux forces: l'une dirigée suivant le prolongement mB du fil, l'autre suivant la tangente mD à l'arc mMn . La composante mB est détruite par la résistance du point c , tandis que la composante mD sollicite le point matériel à descendre de m en M . Arrivé en ce dernier point, le pendule ne s'arrête pas; car, en vertu de son inertie, il est entraîné dans la direction Mn .

Or, si l'on répète, en un point quelconque de l'arc Mn , la même construction qu'en m , on reconnaît que la pesanteur qui, de m en M , a agi comme force accélératrice, agit, de M en n , comme force retardatrice. Elle enlève donc successivement au mobile la vitesse acquise pendant la descente; cette force doit donc diminuer la vitesse exactement de la même quantité dont elle l'a augmentée de m en M , en sorte qu'elle l'aura entièrement détruite lorsque le pendule se sera élevé en n , au-dessus de la position M , à la même hauteur que le point m . Le pendule revenant alors de n vers M , la même série de phénomènes se reproduit, et le pendule tend ainsi à osciller éternellement en décrivant des arcs égaux des deux côtés du point M . Mais, dans les expériences, il n'en est jamais ainsi, deux causes contribuant sans cesse à ralentir le mouvement et même à le détruire: la première est la résistance du milieu dans lequel le pendule se meut; la seconde est le frottement qui se produit sur l'axe de suspension.



64. **Lois des oscillations du pendule.** — On nomme *oscillation* le passage du pendule d'une position extrême m à l'autre position extrême n . L'arc mn est l'*amplitude* d'oscillation. Enfin, la *longueur* du pendule simple est la distance du point de suspension c au point matériel M .

On démontre, en mécanique, que les oscillations du pendule simple, dans le vide, sont soumises aux quatre lois suivantes:

1^o *Pour un même pendule, les petites oscillations sont isochrones.* C'est-à-dire qu'elles se font très-sensiblement en temps égaux, tant que leur amplitude ne dépasse pas 2 à 3 degrés. L'isochronisme des petites oscillations du pendule persiste dans l'air comme dans le vide. En effet, le calcul fait voir que la résistance de l'air, augmentant la durée de la demi-oscillation descendante, diminue d'une quantité égale celle de la demi-oscillation ascen-

dante, en réduisant son amplitude. Mais, si l'air ne trouble pas l'isochronisme des petites oscillations par sa résistance, il en augmente la durée par la perte de poids que subit le pendule dans l'air (173); car, par cette perte de poids, la force qui sollicite le pendule à osciller est moindre.

C'est Galilée qui, le premier, constata l'isochronisme des petites oscillations du pendule. On rapporte qu'il fit cette découverte, jeune encore, en observant les mouvements d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise.

2^e Pour des pendules de même longueur, la durée des oscillations est la même, quelle que soit la substance dont le pendule est formé. C'est-à-dire que des pendules de fer, de plomb, de cuivre, exécutent le même nombre d'oscillations dans le même temps, s'ils sont d'égale longueur.

3^e Pour des pendules inégaux, la durée des oscillations est proportionnelle à la racine carrée de la longueur. C'est-à-dire que la longueur devenant 4, 9, 16... fois plus grande, la durée des oscillations l'est seulement 2, 3, 4... fois davantage.

4^e Sous des latitudes différentes, ou à des altitudes inégales, la durée des oscillations, pour des pendules de même longueur, est en raison inverse de la racine carrée de l'intensité de la pesanteur.

Ces lois découlent de la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, à laquelle on est conduit en appliquant le calcul au mouvement du pendule simple. Dans cette formule, t représente la durée d'une oscillation; l , la longueur du pendule; g , l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire la vitesse acquise, au bout d'une seconde, par un corps qui tombe dans le vide (82). Quant à π , c'est une quantité constante qui représente le rapport de la circonférence au diamètre, et qui égale 3,141592.

Les deux premières lois du pendule se déduisent immédiatement de la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$; car cette formule ne contenant ni l'amplitude de l'oscillation, ni la densité de la substance dont le pendule est formé, la valeur de t est indépendante de ces deux quantités.

Pour en déduire la troisième loi, considérons un second pendule dont la longueur soit l' et la durée des oscillations t' . D'après la formule ci-dessus, on a

$t' = \pi \sqrt{\frac{l'}{g}}$. Or ces deux formules peuvent s'écrire sous la forme

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

En les divisant membre à membre, et supprimant les facteurs communs π et \sqrt{g} , on a $\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l'}}$, formule qui est l'expression de la troisième loi ci-dessus.

De même, pour la quatrième loi, soient g, g' les intensités de la pesanteur en deux lieux différents, et t, t' les durées des oscillations d'un même pendule en

ces deux lieux, on a $t = \pi \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{g}}$, et $t' = \pi \frac{\sqrt{l'}}{\sqrt{g'}}$. Divisant membre à membre, on trouve $\frac{t}{t'} = \frac{\sqrt{g'}}{\sqrt{g}}$, formule qui est bien l'expression de la quatrième loi.

En élevant au carré les deux membres de cette dernière égalité, on a $\frac{g'}{g} = \frac{t^2}{t'^2}$; c'est-à-dire que la quatrième loi peut encore s'énoncer en disant que, pour un même pendule, dans deux lieux différents, l'intensité de la pesanteur est en raison inverse du carré de la durée des oscillations.

65. Longueur du pendule composé. — Les lois et la formule ci-dessus s'appliquent aussi au pendule composé; mais alors il faut définir ce qu'on entend par sa *longueur*. Pour cela, observons que tout pendule composé étant formé d'une tige pesante terminée par une masse plus ou moins considérable, les divers points matériels de ce système tendent, d'après la troisième loi du pendule, à décrire leurs oscillations dans des temps d'autant plus longs, qu'ils sont plus éloignés du point de suspension. Or tous ces points étant invariablement liés entre eux, leurs oscillations se font nécessairement dans le même temps. Par suite le mouvement des points les plus rapprochés de l'axe de suspension se trouve retardé, tandis que celui des plus éloignés est accéléré. Entre ces deux positions extrêmes, il y a donc des points qui ne sont ni accélérés ni retardés, et qui oscillent comme s'ils n'étaient pas liés au reste du système. Ces points étant équidistants de l'axe de suspension, leur ensemble constitue un *axe d'oscillation* parallèle au premier. C'est la distance de l'axe de suspension à l'axe d'oscillation qu'on nomme *longueur du pendule composé*. En d'autres termes, la longueur d'un pendule composé est celle du pendule simple qui ferait ses oscillations dans le même temps.

L'axe d'oscillation jouit de la propriété d'être réciproque de l'axe de suspension: c'est-à-dire qu'en suspendant le pendule par son axe d'oscillation, la durée des oscillations reste la même, ce qui montre que la longueur n'a pas changé. Cette propriété, démontrée pour la première fois par Huyghens, physicien hollandais, donne le moyen de trouver expérimentalement la longueur du pendule composé. Pour cela, on retourne le pendule et on le suspend au moyen d'un axe mobile, qu'on place, après quelques tâtonnements, en un point tel, que le nombre des oscillations, dans le même temps, soit le même qu'avant le retournement. Ce résultat obtenu, la longueur cherchée est la distance du deuxième axe de suspension au premier. Si l'on substitue alors la valeur obtenue ainsi à la place de l , dans la formule du pendule simple, celle-ci devient applicable au pendule composé, et les lois des oscillations sont les mêmes que pour le pendule simple.

La longueur du pendule qui *bat la seconde*, c'est-à-dire qui fait ses oscillations en une seconde, varie avec l'intensité de la pesanteur ; elle est :

Sous l'équateur.	0 ^m ,991033
A Paris.	0 ^m ,993866
Au pôle.	0 ^m ,996671

66. **Vérification des lois du pendule.** — On ne peut vérifier les lois du pendule simple qu'au moyen du pendule composé, en ayant soin de construire celui-ci de manière qu'il atteigne, autant que possible, les conditions du premier. Pour cela, on suspend à l'extrémité d'un fil fin une petite sphère d'une substance très-dense, par exemple, de plomb ou de platine. Le pendule ainsi formé oscille sensiblement comme le pendule simple dont la longueur serait égale à la distance du centre de la petite sphère au point de suspension.

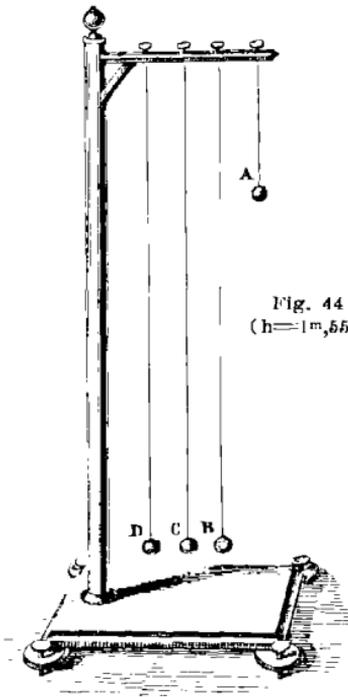


Fig. 44
($h=1^m,55$).

Pour vérifier la loi de l'isochronisme des petites oscillations, on fait osciller le pendule ainsi construit, et on compte le nombre d'oscillations qu'il exécute, en temps égaux, lorsque l'amplitude est successivement de 3, 2 ou 1 degré environ. On observe ainsi que le nombre des oscillations est constant, et par suite leur durée.

Pour démontrer la seconde loi, on prend plusieurs pendules B, C, D (fig. 44), construits de la même manière que le précédent, ayant tous des longueurs égales, et terminés par des sphères de même diamètre, mais de substances différentes, par exemple, de plomb, de cuivre, d'ivoire. Or on observe qu'en négligeant la résistance de l'air, tous ces pendules font, dans le même temps, le même nombre d'oscillations ; d'où l'on conclut que la pesanteur agit sur toutes les substances avec la même intensité, ce qu'on a déjà constaté (56).

On vérifie la troisième loi en faisant osciller des pendules dont les longueurs sont respectivement 1, 4, 9..., et l'on trouve que

les nombres d'oscillations correspondants sont comme $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots$, ce qui montre que leur durée est successivement $1, 2, 3, \dots$

La quatrième loi ne peut se vérifier qu'en se déplaçant à la surface de la terre, pour se rapprocher ou s'écartier de l'équateur.

67. Usages du pendule. — Le pendule sert à constater, ainsi qu'on vient de le voir ci-dessus, que la pesanteur sollicite tous les corps avec la même intensité. Il a servi encore à déterminer l'intensité de la pesanteur sur les différents points de notre globe, la masse des montagnes et la densité de la terre. L'isochronisme de ses oscillations l'a fait appliquer comme régulateur aux horloges. Enfin, Foucault l'a fait servir à la démonstration expérimentale du mouvement de rotation diurne de la terre.

Pour mesurer l'intensité de la pesanteur (62) à l'aide du pendule, on résout

l'équation $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ (64), par rapport à g . En éle-

vant les deux membres au carré, on trouve $t^2 = \pi^2 \frac{l}{g}$;

d'où l'on tire $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$. Donc, pour connaître g , il faut

commencer par mesurer la longueur l d'un pendule composé (65), puis mesurer la durée t de ses oscillations; ce qui s'obtient en cherchant combien il fait d'oscillations dans un nombre de secondes connu, et en divisant ce dernier nombre par le nombre d'oscillations.

C'est en opérant ainsi qu'on a déterminé la valeur de g en différents points du globe, et que Borda et Cassini ont trouvé qu'elle est, à Paris, de $9^m,8088$. En tenant compte de la perte de poids des corps dans l'air (173), Bessel a trouvé que la vraie valeur de g , à Paris, est $9^m,8096$.

Une fois la valeur de g connue en chaque lieu, on en déduit, par le calcul, la distance au centre de la terre, et, par suite, la forme de celle-ci.

C'est Huyghens qui, le premier, appliqua le pendule comme régulateur aux horloges, en 1657, et le ressort spiral aux montres, en 1665. La figure 45 montre le mécanisme à l'aide duquel le pendule sert à régler la marche des horloges et des pendules d'appartement. Sa tige s'engage dans une fourchette a destinée à transmettre le mouvement à une seconde tige b , laquelle est liée à un axe horizontal o . À cet axe est fixée une pièce mn

qu'on nomme *échappement à ancre*, à cause de sa forme, et qui se termine à ses extrémités par deux palettes alternativement en prise avec les dents d'une roue R , qui est dite la *roue de ren-*

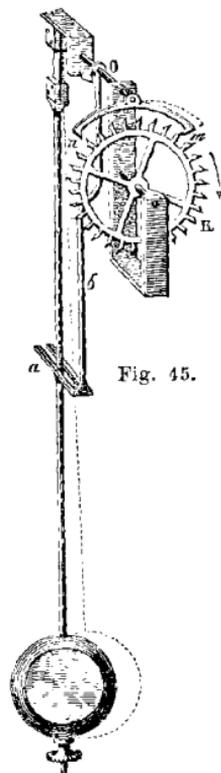


Fig. 45.

contre. Cette roue, sollicitée par le moteur qui fait marcher l'horloge, tend à prendre un mouvement de rotation continu dans le sens marqué par la flèche. Si le pendule est au repos, la roue est arrêtée par la palette m , et avec elle tout le mouvement d'horlogerie. Au contraire, si le pendule oscille et prend la position indiquée en ligne ponctuée, la dent qui butait contre la palette échappe, et la roue tourne, mais d'une demi-dent seulement, parce que l'arc mn inclinant en sens contraire, la palette n vient à son tour arrêter une dent. Puis, à l'oscillation suivante, cette dent échappe, et c'est la palette m qui arrête alors la dent qui vient après celle qu'elle arrêta d'abord, et ainsi de suite; en sorte qu'à chaque oscillation double du pendule, la roue de rencontre avance d'une dent. Or les oscillations du pendule étant isochrones, la roue de rencontre et le mécanisme de l'horloge, qui en est solidaire, marchent et s'arrêtent à des intervalles égaux, et, par conséquent, indiquent des divisions égales du temps.

68. **Problèmes sur la pesanteur.** — I. Un corps tombant librement dans le vide, quelle sera sa vitesse, à Paris, après 45 secondes de chute?

Cette question se résout à l'aide de la formule $v = gt$ (60), en y faisant $g = 9^m,8088$ (62), et $t = 45^s$; ce qui donne

$$v = 9^m,8088 \times 45 = 441^m,396.$$

A une autre latitude que celle de Paris, la valeur de g n'étant plus $9^m,8088$; la vitesse acquise par le corps qui tombe serait plus grande ou plus petite que $441^m,396$.

II. Pendant combien de temps doit tomber un corps, dans le vide, pour acquérir, à Paris, une vitesse de 600 mètres, qui est celle d'un boulet de canon?

De la formule $v = gt$, on tire $t = \frac{v}{g}$, d'où remplaçant g et v par leurs valeurs,

$$\text{on a } t = \frac{600}{9,8088} = 61^s,16.$$

III. Quel est le temps nécessaire à un corps pour tomber, dans le vide, d'une hauteur de 1000 mètres?

De la formule $e = \frac{1}{2}gt^2$ (60), on tire $t = \sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{\frac{2000}{9,8088}} = 14^s,28$.

IV. De quelle hauteur devrait tomber un corps, dans le vide, pour acquérir une vitesse de 300 mètres?

La formule $v^2 = 2ge$ (60) donne $e = \frac{v^2}{2g}$, d'où $e = \frac{90000}{2 \cdot 9,8088} = 4587^m,7$.

V. Sur un plan incliné dont la longueur AB (fig. 30) égale 1000 mètres, et la hauteur BC 5 mètres, quel est l'effort nécessaire pour traîner un poids de 2500 kilogrammes, abstraction faite du frottement?

En représentant par P le poids, et par F la force cherchée, on a vu (57) qu'on a l'égalité $\frac{F}{P} = \frac{BC}{AB}$, d'où $F = \frac{P \times BC}{AB} = \frac{2500 \times 5}{1000} = 12^m,500$.

VI. Un projectile étant lancé verticalement, de bas en haut, dans le vide, avec une vitesse initiale de $245^m,22$, on demande après quel temps le mobile s'arrêtera pour retomber, et à quelle hauteur il s'élèvera.

Soient a la vitesse initiale imprimée au mobile et t la durée de l'ascension;

la pesanteur, agissant pendant ce temps comme force retardatrice, diminue la vitesse a d'une quantité égale à g en une seconde, et d'une quantité gt au bout de t secondes; on a donc, au moment où le corps s'arrête, $gt = a$.

$$\text{d'où } t = \frac{a}{g} = \frac{245,22}{9,8088} = 25^s.$$

Pour calculer la hauteur à laquelle s'élève le mobile, observons que, pendant son ascension, la pesanteur lui enlevant graduellement la vitesse qu'elle lui communiquerait en temps égal, s'il tombait, il faut que le corps mette à s'élever à sa plus grande hauteur e précisément le temps qu'il mettrait à en descendre.

Donc, la hauteur d'ascension peut se calculer par la formule $e = \frac{1}{2}gt^2$ (60), qui donne $e = 4^m,9044 \times 625 = 3065^m,25$.

* CHAPITRE IV

DE QUELQUES PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES AUX CORPS SOLIDES

69. **Diverses propriétés particulières.** — Après avoir fait connaître les principales propriétés communes aux solides, aux liquides et aux gaz, nous traiterons ici de quelques propriétés particulières aux solides. Ces propriétés sont l'élasticité de traction, l'élasticité de torsion, l'élasticité de flexion, la ténacité, la ductilité et la dureté.

70. **Élasticité de traction.** — Nous avons déjà traité de l'élasticité comme propriété générale (20); mais il s'agissait seulement de l'élasticité développée par la pression. Or, dans les solides, l'élasticité peut encore se manifester par traction, par torsion et par flexion.

Pour étudier les lois de l'élasticité de traction, Savart a fait usage de l'appareil représenté dans la figure 46. Cet appareil se compose d'un support de bois auquel on suspend les tiges ou les fils sur lesquels on veut expérimenter. On fixe à leur extrémité inférieure un plateau destiné à recevoir des poids, et l'on marque sur leur longueur deux points de repère A et B, dont on mesure exactement la distance à l'aide d'un cathétomètre (14), avant que le plateau soit chargé et après.

Tant que la limite d'élasticité n'a pas été dépassée, la traction des tiges et des fils est soumise aux trois lois suivantes :

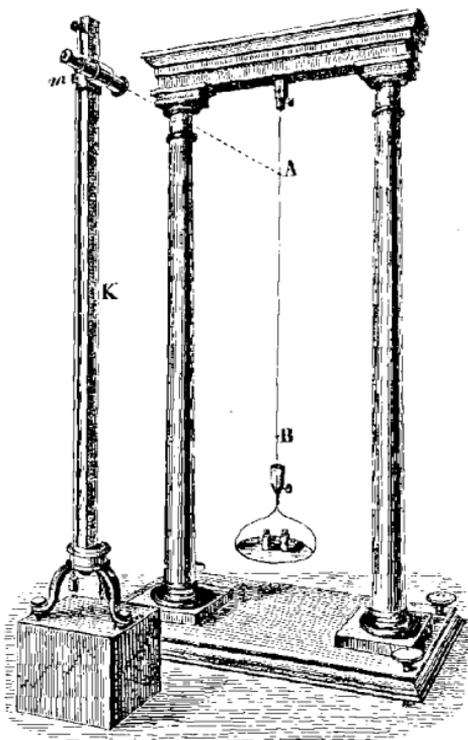


Fig. 46.

1° *Les tiges et les fils ont une élasticité parfaite, c'est-à-dire qu'ils reprennent exactement leur longueur primitive aussitôt que la traction cesse.*

2° *Pour une même substance et un même diamètre, l'allongement est proportionnel à la force de traction et à la longueur.*

3° *Pour des tiges ou des fils de même longueur, de même matière, mais d'inégale grosseur, les allongements sont en raison inverse des carrés des diamètres.*

Le calcul et l'expérience montrent que, lorsque les corps s'allongent par traction, leur volume augmente.

Wertheim, qui a fait de nombreuses expériences sur l'élasticité des métaux, a constaté, entre — 15 et 200 degrés, que l'élasticité décroît d'une manière continue à mesure que la température s'élève; le fer et l'acier font exception, leur élasticité augmentant jusqu'à 100 degrés et diminuant ensuite. Le même physicien a trouvé qu'en général toutes les causes qui augmentent la densité augmentent en même temps l'élasticité.

71. **Élasticité de torsion.** — Les lois de la torsion des fils ont été déterminées par Coulomb, physicien français, mort en 1806. Dans ses recherches, ce savant faisait usage d'un appareil qu'on nomme *balance de torsion*, lequel se compose d'un fil métallique fin, pincé à sa partie supérieure, et tendu par un poids auquel est fixée une aiguille horizontale. Au-dessous est un cercle gradué, dont le centre se trouve sur le prolongement du fil lorsque celui-ci est vertical. Si l'on écarte l'aiguille de sa position d'équilibre, d'un certain angle, qui est l'*angle de torsion*, la force nécessaire pour obtenir cet angle est elle-même la *force de torsion*. Après cette déviation, les molécules qui étaient disposées en ligne droite suivant la longueur du fil, le sont suivant une hélice enroulée autour de ce fil. Si la limite d'élasticité n'a pas été dépassée, les molécules tendent à reprendre leur position primitive, et y reviennent, en effet, aussitôt que la force de torsion n'agit plus; mais elles ne s'y arrêtent pas. En vertu de leur vitesse acquise, elles dépassent cette position en donnant naissance à une torsion en sens contraire. L'équilibre se trouvant rompu de nouveau, le fil revient sur lui-même, et l'aiguille ne s'arrête au zéro du cadran qu'après un certain nombre d'oscillations des deux côtés de ce point.

Au moyen de l'appareil qui vient d'être décrit, Coulomb a constaté que, lorsque l'amplitude des oscillations ne dépasse pas un petit nombre de degrés, ces oscillations sont soumises aux quatre lois suivantes :

1° *Elles sont très-sensiblement isochrones.*

2° *Pour un même fil l'angle de torsion est proportionnel à la force de torsion.*

3° *Pour une même force de torsion et des fils de même diamètre, l'angle de torsion est proportionnel à la longueur des fils.*

4° *Pour une même force et une même longueur de fil, l'angle de torsion est inversement proportionnel à la quatrième puissance des diamètres.*

72. **Élasticité de flexion.** — Tous les solides taillés en lames minces et fixés par une de leurs extrémités peuvent, après avoir été plus ou moins courbés, revenir à leur première forme lorsqu'ils sont abandonnés à eux-mêmes. Cette propriété est très-sensible dans l'acier trempé, le bois, le papier.

L'élasticité de flexion trouve de nombreuses applications dans les arcs, les arbalètes, les ressorts de montre, les ressorts de voiture, les pesons qui servent de balances, et les dynamomètres destinés à mesurer la force des moteurs. L'élasticité du crin, de la laine, de la plume, est utilisée dans les matelas et les coussins en usage dans l'économie domestique.

Quelle que soit l'espèce d'élasticité que l'on considère, nous avons déjà observé (20) qu'il y a toujours une limite à l'élasticité, c'est-à-dire un déplacement moléculaire au delà duquel les corps sont brisés, ou du moins ne reprennent plus leur forme première. Plusieurs causes peuvent faire varier cette limite. On constate, en effet, que l'élasticité de plusieurs métaux est augmentée par l'*écrouis-*

sage, c'est-à-dire par le rapprochement des molécules, à froid, au moyen de la filière, du laminoir ou du marteau. Quelques substances, comme l'acier, la fonte, le verre, deviennent aussi plus élastiques et en même temps plus dures par la *trempe* (77).

L'élasticité est, au contraire, diminuée par le *recuit*, opération qui consiste à porter les corps à une température moins élevée que pour la trempe et à les refroidir ensuite lentement. C'est par le recuit que l'on gradue à volonté l'élasticité des ressorts. Le verre chauffé éprouvant une véritable trempe lorsqu'il se refroidit trop rapidement, c'est pour diminuer la fragilité des objets de verre récemment fabriqués qu'on les recuit sur un foyer dont on les éloigne ensuite lentement.

73. Ténacité. — La *ténacité* est la résistance qu'opposent les corps à la traction. Pour évaluer cette force, on façonne les corps en tiges cylindriques ou prismatiques, et on les soumet, dans le sens de leur longueur, à une traction mesurée en kilogrammes et suffisante pour déterminer la rupture.

La charge qui produit la rupture est directement proportionnelle à la section transversale des fils ou des prismes, et indépendante de leur longueur. D'après de nombreuses expériences sur les métaux, la force nécessaire à la rupture est à peu près triple de celle qui correspond à la limite d'élasticité.

La ténacité diminue avec la durée de la traction. On constate, en effet, que les tiges métalliques et autres cèdent, après un certain temps, à des charges moindres que celles qui seraient nécessaires pour produire immédiatement la rupture : dans tous les cas, la résistance à la traction est moindre que la résistance à la pression.

La ténacité ne varie pas seulement d'une substance à une autre, mais, à égalité de matière, elle varie encore avec la forme des corps. Pour des sections équivalentes, le prisme est moins résistant que le cylindre. Pour une quantité de matière donnée, le cylindre creux est plus résistant que le cylindre plein, et le *maximum* de ténacité a lieu lorsque le rayon extérieur est au rayon intérieur dans le rapport de 11 à 5.

Pour un même corps, la forme a la même influence sur la résistance à l'écrasement que sur la résistance à la traction. En effet, un cylindre creux, à masse et à hauteur égales, est plus résistant qu'un cylindre plein; d'où il résulte que les os des animaux, les plumes des oiseaux, les tiges des graminées, opposent plus de résistance que s'ils étaient pleins, la masse restant la même.

Enfin, la ténacité, de même que l'élasticité, varie pour un même corps avec le sens que l'on considère. Dans les bois, par exemple, la ténacité et l'élasticité sont plus grandes dans le sens des fibres que dans le sens transversal. Cette différence s'observe, en général, dans tous les corps dont la texture n'est pas la même suivant toutes les directions.

74. Adhésion. — On nomme *adhésion* l'attraction moléculaire qui se manifeste entre les corps en contact. Deux glaces, par exemple, étant superposées, finissent par adhérer tellement, qu'on ne peut plus les séparer sans les rompre. Cette force agit non-seulement entre les solides, mais entre les solides et les liquides, entre les solides et les gaz.

L'adhésion entre les solides n'est point un effet de la pression atmosphérique, car elle s'observe dans le vide. Elle croît avec le degré de poli des surfaces et avec la durée de leur contact; en effet, la résistance à la séparation est d'autant plus grande, que le contact a été prolongé plus longtemps. Enfin, l'adhésion entre les corps solides est indépendante de leur épaisseur, ce qui indique que l'attraction moléculaire ne s'exerce qu'à de très petites distances.

Plongés dans l'eau, dans l'alcool et dans la plupart des liquides, les corps solides en sortent recouverts d'une couche liquide : c'est un effet d'adhésion.

On remarque aussi des phénomènes d'adhésion entre les gaz et les solides. Par exemple, si l'on plonge dans une dissolution gazeuse une lame polie et bien nettoyée de verre ou de métal, on voit sa surface se recouvrir rapidement de bulles de gaz très petites et très-nombreuses. Pour expliquer la formation de

ces bulles, Henrici, dans des expériences récentes, fait observer qu'à l'adhésion entre le liquide et le gaz dissous s'ajoute ici celle entre le solide et les deux autres corps, et que, suivant celle des attractions qui prédomine, se présentent les trois cas suivants : 1^o si c'est l'attraction entre le liquide et le gaz qui l'emporte, la présence du corps solide est sans effet; 2^o si c'est l'attraction entre le solide et le gaz, il y a condensation de ce dernier à la surface, mais sans dégagement de gaz; 3^o si c'est l'attraction entre le solide et le liquide qui prédomine, du gaz devient libre et se dégage.

75. **Ductilité.** — On nomme *ductilité* la propriété que possèdent un grand nombre de substances de changer de forme par l'effet de pressions ou de tractions plus ou moins considérables.

Pour l'argile, la clore, de faibles efforts sont suffisants pour produire une déformation; pour d'autres substances, comme le verre, les résines, il faut en outre l'action de la chaleur; pour les métaux, il faut des efforts puissants, comme la percussion, la filière, le laminoir.

La ductilité prend le nom de *malleabilité* lorsqu'elle se produit sous le marteau. Le métal le plus malléable est le plomb, le plus ductile au laminoir est l'or; à la filière, c'est le platine.

La grande ductilité du platine a permis à Wollaston d'obtenir des fils de ce métal qui n'avaient que $\frac{1}{1200}$ de millimètre de diamètre. Pour arriver à ce résultat, ce savant recouvrait d'argent un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre, de manière à obtenir un cylindre de 5 millimètres de grosseur dont l'axe seul était de platine. En tirant ce cylindre à la filière, jusqu'à ce qu'il fût aussi fin que possible, les deux métaux s'allongeaient également. Faisant alors bouillir le fil dans l'acide azotique, l'argent était dissous, et le fil de platine restait seul. 1000 mètres de ce fil ne pesaient que 5 centigrammes.

76. **Dureté.** — La *dureté* est la résistance qu'offrent les corps à être rayés ou usés par d'autres corps.

Cette propriété n'est que relative; car un corps dur par rapport à une substance est mou par rapport à une autre. On distingue la dureté relative de deux corps en cherchant celui qui raye l'autre sans en être rayé. On a constaté ainsi que le plus dur de tous les corps est le diamant, car il raye tous et n'est rayé par aucun. Après lui viennent le saphir, le rubis, le cristal de roche, les silex, les grès, etc. Les métaux à l'état de pureté sont assez mous.

Les alliages sont plus durs que leurs métaux. C'est pour augmenter la dureté de l'or et de l'argent, dans la bijouterie et dans la fabrication des monnaies, qu'on les allie avec le cuivre.

La dureté d'un corps n'est pas en rapport avec sa résistance à la pression. Le verre, le diamant, sont beaucoup plus durs que le bois; mais ils résistent beaucoup moins au choc du marteau.

La dureté des corps est utilisée dans les poudres à polir, telles que l'émeril, la ponce, le tripoli. Le diamant, étant le plus dur de tous les corps, ne peut s'user qu'à l'aide de l'égrisée, qui n'est elle-même que du diamant pulvérisé.

77. **Trempe.** — La *trempe* est le refroidissement brusque d'un corps après qu'il a été porté à une température élevée. Dans cette opération, l'acier et la fonte acquièrent une grande dureté, et c'est surtout dans ce but que la trempe est utilisée. Tous les instruments tranchants sont d'acier trempé. Mais il est des corps sur lesquels la trempe produit un effet tout opposé. L'alliage des *tam-tam*, qui est composé de 1 partie d'étain sur 4 de cuivre, devient ductile et malléable lorsqu'il est refroidi brusquement; au contraire, il est dur et fragile comme le verre lorsqu'il est refroidi avec lenteur.

LIVRE III

DES LIQUIDES

CHAPITRE PREMIER

HYDROSTATIQUE

78. **Objet de l'hydrostatique.** — *L'hydrostatique* est la science qui a pour objet l'étude des conditions d'équilibre des liquides et celle des pressions qu'ils exercent, soit dans leur masse, soit sur les parois des vases qui les contiennent.

La science qui traite du mouvement des liquides se nomme *hydrodynamique*, et l'application de celle-ci à l'art de conduire et d'élever les eaux se désigne spécialement sous le nom d'*hydraulique*. On ne traitera ici que de l'hydrostatique.

79. **Caractères généraux des liquides.** — On a déjà vu (5) que les liquides sont des corps dont les molécules, par suite d'une très-faible cohésion, cèdent au plus léger effort qui tend à les déplacer; d'où il résulte que ces corps n'affectent aucune forme stable, et qu'obéissant sans cesse à l'action de la pesanteur, ils prennent immédiatement la forme des vases dans lesquels on les verse. Leur fluidité n'est cependant pas parfaite; il existe toujours entre leurs molécules une adhérence qui produit une viscosité plus ou moins grande. Très-faible dans certains liquides, comme l'éther, l'alcool, elle est très-apparente dans l'acide sulfurique, les huiles grasses et les liqueurs fortement sucrées ou gommées.

La fluidité des liquides se retrouve, mais à un plus haut degré, dans les gaz; ce qui distingue ces deux espèces de corps, c'est que les liquides ne sont doués que d'une compressibilité et d'une élasticité à peine sensibles, tandis que les fluides aëriiformes sont éminemment compressibles et expansibles.

La fluidité des liquides est démontrée par la facilité avec laquelle ces corps s'écoulent et prennent toutes sortes de formes; leur faible compressibilité se constate par l'expérience suivante.

80. **Compressibilité des liquides.** — D'après l'expérience des académiciens de Florence rapportée précédemment (16), on a regardé longtemps les liquides comme complètement incompressibles. Depuis, des recherches sur le même sujet ont été faites

par plusieurs physiciens, et tous ont constaté que les liquides sont plus ou moins compressibles.

Les appareils destinés à mesurer la compressibilité des liquides ont reçu le nom de *piézomètres*. Nous allons décrire ici celui d'Oersted avec les modifications qui y ont été faites par Despretz

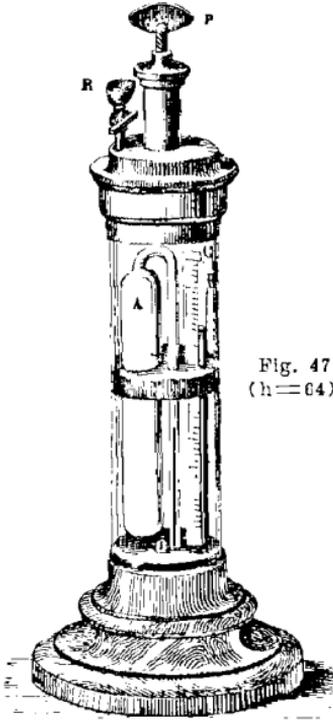


Fig. 47
(h = 64).

et Saigey. Cet appareil se compose d'un cylindre de cristal à parois épaisses, d'un diamètre de 8 à 9 centimètres (fig. 47). Ce cylindre, qui est complètement rempli d'eau, est fermé, à sa base, par un pied de cuivre, dans lequel il est solidement mastiqué; à sa partie supérieure, il s'ajuste dans une garniture cylindrique de cuivre, fermée par un plateau qui se dévisse à volonté. Ce plateau porte un entonnoir R, destiné à introduire l'eau dans le cylindre, et une tubulure de cuivre dans laquelle est un piston qui ferme hermétiquement et qu'on fait marcher au moyen d'une vis de pression P.

Dans l'intérieur de l'appareil est un réservoir de verre A, rempli du liquide à comprimer. Ce réservoir se termine, à sa partie supérieure, par un tube capillaire qui se recourbe et vient plonger dans un bain de mercure O. Ce tube a été divisé d'avance en n parties d'égale capacité, et l'on a déterminé le nombre N de ces parties contenues dans le réservoir A. Pour cela, soient p le poids de mercure à zéro contenu dans les n divisions du tube capillaire, et P le poids du même liquide contenu dans le réservoir A à la même température; on a l'égalité $\frac{N}{n} = \frac{P}{p}$, d'où $N = \frac{Pn}{p}$.

Dans l'intérieur du cylindre est un *manomètre à air comprimé*. On nomme ainsi un tube de verre B, plein d'air; le bout supérieur est fermé, et le bout inférieur, qui est ouvert, plonge dans le bain de mercure O. Lorsqu'on n'exerce aucune pression sur l'eau qui remplit l'appareil, le tube B est complètement plein d'air; mais lorsqu'au moyen de la vis P et du piston, on comprime l'eau, la pression se transmet au mercure, qui s'élève dans le tube

B en comprimant l'air qu'il contient. Une échelle graduée C indique la réduction de volume de l'air, et c'est d'après cette réduction de volume qu'on apprécie la pression exercée sur le liquide contenu dans le cylindre, ainsi qu'il sera démontré en traitant du manomètre (162). Enfin, sur la plaque de cuivre qui porte le manomètre est fixé un thermomètre qui donne la température de l'eau. Ce thermomètre n'est pas représenté dans la figure.

Pour expérimenter avec le piézomètre, on commence par remplir le réservoir A du liquide à comprimer; puis, par l'entonnoir R, on remplit d'eau le cylindre. Tournant alors la vis P de manière à faire descendre le piston, celui-ci exerce une pression sur l'eau et le mercure qui sont dans l'appareil, et, par l'effet de cette pression, non-seulement le mercure s'élève dans le tube B, mais aussi dans le tube capillaire soudé au réservoir A, ainsi que le montre le dessin. Comme l'eau s'est échauffée par l'effet de la compression, on la laisse refroidir jusqu'à ce que le thermomètre soit revenu à la température initiale; observant alors à quelle hauteur le mercure s'élève dans le tube capillaire soudé au réservoir A, on en conclut que le liquide renfermé dans ce réservoir s'est contracté et de combien il s'est contracté. En effet, si l'on représente par n' le nombre de divisions dont le mercure s'est élevé dans le tube capillaire, et par F la pression en atmosphères (160) marquée par le manomètre, $\frac{n'}{N+n}$ est la contraction pour l'unité de

volume, et $\frac{n'}{(N+n)F}$ la contraction pour l'unité de volume et l'unité de pression, c'est-à-dire le *coefficient de compressibilité*. Toutefois ce n'est là que la compressibilité *apparente*. En effet, Ørsted, dans ses expériences, avait supposé que la capacité du réservoir A demeurerait invariable, ses parois étant également comprimées intérieurement et extérieurement par le liquide (81). Mais l'analyse mathématique prouve que ce volume diminue par l'effet des pressions extérieure et intérieure. En tenant compte de ce changement de capacité, Colladon et Sturm ont trouvé, pour une pression égale au poids de l'atmosphère, et à la température de zéro, les coefficients de compressibilité absolue suivants :

Mercure.	5	millionièmes.
Eau distillée non privée d'air.	49	
Eau distillée privée d'air	51	—
• Éther sulfurique.	138	—

Ils ont de plus observé, pour l'eau et le mercure, que, dans de certaines limites, le décroissement de volume est proportionnel à la pression.

Quelle que soit la compression à laquelle on ait soumis un liquide, l'expérience fait voir qu'aussitôt que l'excès de pression cesse, le liquide revient exactement à son volume primitif; d'où l'on conclut que *les liquides sont parfaitement élastiques*.

81. **Principe d'égalité de pression, ou principe de Pascal.** — En regardant les liquides comme parfaitement élastiques, doués

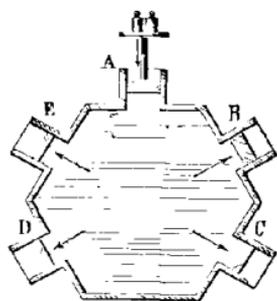


Fig. 48.

d'une fluidité parfaite, et en les supposant soustraits à l'action de la pesanteur, on a été conduit au principe suivant, connu sous le nom de *principe d'égalité de pression*, et aussi sous celui de *principe de Pascal*, parce qu'il a été posé pour la première fois par le célèbre écrivain et géomètre Blaise Pascal.

Toute pression exercée sur un liquide se transmet en tous sens, avec la même intensité, à surface égale à celle qui reçoit la pression.

Pour interpréter cet énoncé, concevons un vase de forme quelconque, rempli d'eau ou de tout autre liquide que nous supposons sans poids, et soient, sur les parois de ce vase, diverses tubulures cylindriques A, B, C..., fermées par des pistons mobiles (fig. 48). Si, sur le piston supérieur A, on exerce, de dehors en dedans, une pression quelconque, de 20 kilogrammes, par exemple, instantanément cette pression se transmet sur la face interne des pistons B, C, D..., qui, tous, sont poussés de dedans en dehors par une pression 20, si leur surface égale celle du premier piston; mais pour des surfaces deux, trois fois plus grandes, la pression transmise est de 40 ou 60 kilogrammes, c'est-à-dire que non-seulement la pression se transmet également dans tous les sens, mais est *proportionnelle à la surface qui la reçoit*. Telle est la double signification qu'il faut attacher au principe ci-dessus, qui sert de base à toute l'hydrostatique.

Le principe d'égalité de pression doit être admis comme une conséquence de la constitution des liquides. Toutefois on peut, par l'expérience suivante, démontrer que la pression se transmet, en effet, dans tous les sens. Un tube dans lequel glisse un piston (fig. 49) est terminé par une sphère creuse sur laquelle sont placées de petites tubulures cylindriques perpendiculaires à ses parois. La sphère et le cylindre étant remplis d'eau, on pousse le piston, et le liquide jaillit par tous les orifices, et non pas seulement par celui qui est opposé au piston.

Quant à la proportionnalité des pressions aux surfaces, on ne

peut en donner une démonstration expérimentale rigoureuse, à cause de l'influence du poids des liquides et du frottement des pistons. Cependant on arrive à une vérification approchée par l'expérience représentée dans la figure 50. Deux cylindres d'inégal diamètre, réunis par une tubulure, sont remplis d'eau, et sur la surface du liquide reposent deux pistons P et p, qui fer-

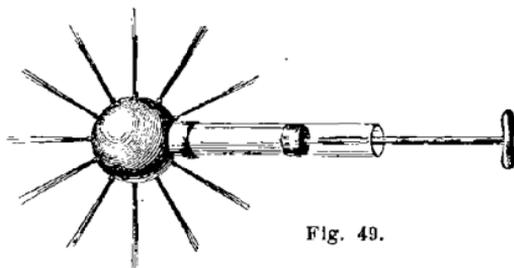


Fig. 49.

ment hermétiquement les cylindres, mais qui peuvent glisser dans ceux-ci à frottement très-doux. Enfin supposons que la surface du grand piston égale, par exemple, trente fois celle du petit. Cela posé, si l'on place sur celui-ci un poids quelconque, soient 2 kilogrammes, aussitôt la pression résultante se transmet à l'eau et au grand piston, et comme cette pression est de 2 kilogrammes sur chaque portion de surface égale à celle du petit piston, il en résulte que le grand doit supporter de bas en haut une poussée de 30 fois 2, ou de 60 kilogrammes. En effet, si l'on charge le grand piston de ce poids, on remarque que l'équilibre persiste; mais pour une charge sensiblement plus grande ou plus petite, l'équilibre est rompu. En représentant par S et s les surfaces du grand et du petit piston, on peut donc poser :

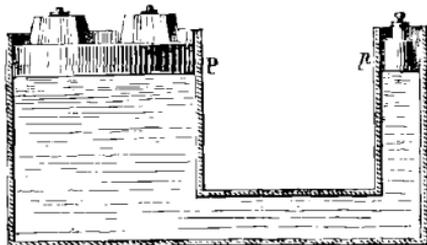


Fig. 50.

$$\frac{P}{p} = \frac{S}{s}, \text{ d'où } Ps = pS.$$

Dans tout ce qui suit sur les pressions transmises par les liquides aux parois des vases, il importe d'observer que ces pressions devront toujours être supposées *perpendiculaires à ces parois*. En effet, toute pression oblique se décompose en deux autres (30), l'une perpendiculaire à la paroi, et l'autre dirigée

dans son plan ; or cette dernière étant sans effet sur la paroi, c'est seulement la pression perpendiculaire qu'on a à considérer.

Enfin, observons que tout ce qu'on vient de dire du principe de Pascal ne s'applique pas seulement aux parois des vases, mais aux molécules liquides en un point quelconque de la masse.

PRESSIONS DÉVELOPPÉES DANS LES LIQUIDES
PAR LA PESANTEUR

82. Pression verticale de haut en bas, ses lois. — Soit d'abord un liquide quelconque en équilibre dans un vase vertical de forme cylindrique, et concevons ce liquide divisé en tranches horizontales d'égale épaisseur et, par suite, de même poids. La seconde tranche supportant une pression égale au poids de la première, la troisième supporte une pression égale au poids des deux premières, et, par conséquent, double ; la quatrième, une pression égale au poids des trois premières, c'est-à-dire triple ; et ainsi de suite. D'où l'on conclut que la pesanteur fait naître dans les liquides des pressions intérieures soumises aux lois suivantes :

1^o *Pour un même liquide, la pression, en un point quelconque de la masse, est proportionnelle à la profondeur.*

2^o *La pression est la même sur tous les points d'une même tranche horizontale ; car tous sont à la même profondeur.*

3^o *Pour une même profondeur, dans des liquides différents, la pression est proportionnelle à la densité du liquide.* En effet, d'après la formule $P = VDg$ (45), le poids d'un liquide et, par conséquent, la pression qu'il exerce sont proportionnels à sa densité.

On a considéré ci-dessus le cas d'un liquide contenu dans un vase cylindrique vertical ; mais il va être démontré (84) que la pression exercée par un liquide est indépendante de la forme du vase qui le contient et de la quantité de liquide, et ne dépend que de la profondeur. Il s'ensuit que les lois ci-dessus sont générales et s'appliquent à tous les cas.

83. Pression verticale de bas en haut. — La pression que les tranches supérieures d'un liquide exercent sur les tranches inférieures fait naître dans celles-ci, de bas en haut, une réaction égale et contraire, qui est une conséquence du principe de la transmission de pression en tous sens. Cette pression de bas en haut se désigne sous le nom de *poussée des liquides*. Elle est très-sensible lorsqu'on plonge la main dans un liquide, surtout s'il a une grande densité, comme le mercure.

Pour la constater par l'expérience, on se sert d'un tube de verre

A ouvert à ses deux extrémités (fig. 51). Après avoir appliqué contre l'extrémité inférieure un disque de verre O, qui sert d'obturateur, et qu'on soutient d'abord à l'aide d'un fil C, qui y est fixé, on plonge le tout dans l'eau, puis on abandonne le fil à lui-même. L'obturateur reste alors appliqué contre le tube, ce qui indique déjà qu'il supporte, de bas en haut, une pression supérieure à son poids. Enfin, si l'on verse lentement de l'eau dans le tube, le disque supporte le poids de ce liquide, et il ne tombe qu'au moment où le niveau de l'eau, à l'intérieur, est le même qu'à l'extérieur; ce qui démontre que la pression de bas en haut, qui s'exerçait sur le disque, est égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section intérieure du tube A, et pour hauteur la distance verticale du disque à la surface supérieure du liquide dans lequel plonge le tube. On conclut de là que *la poussée des liquides, en un point quelconque de leur masse, est soumise aux trois mêmes lois que la pression verticale de haut en bas* (82).

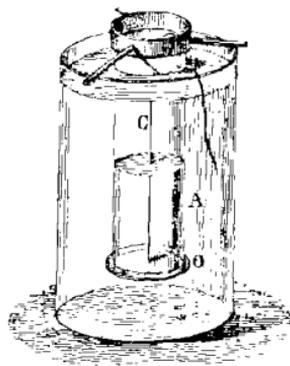


Fig. 51.

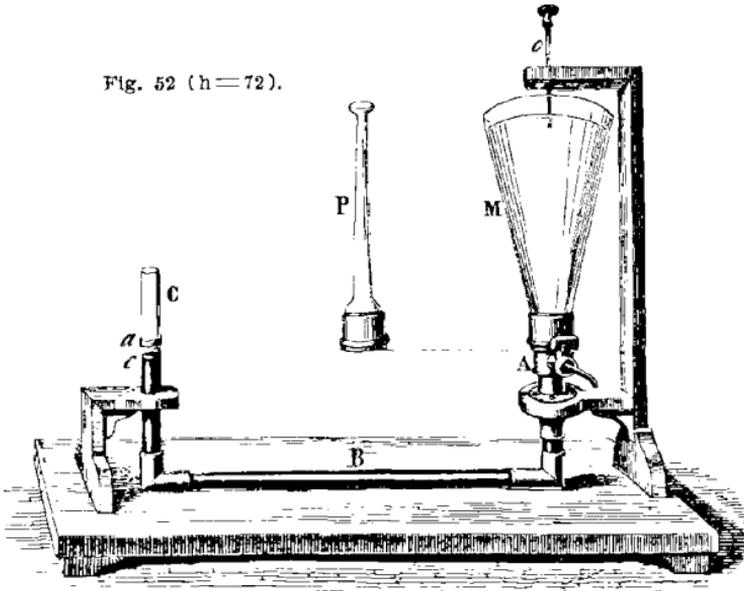
84. La pression est indépendante de la forme des vases. — La pression exercée par un liquide, en vertu de son poids, sur un point quelconque de sa masse ou sur les parois du vase qui le contient, dépend, comme on l'a vu ci-dessus (82), de la profondeur et de la densité du liquide; mais *elle est indépendante de la forme du vase et de la quantité du liquide.*

Ce principe, qui est une conséquence du principe d'égalité de pression, peut se démontrer expérimentalement à l'aide de plusieurs appareils; nous en décrirons ici deux, également en usage dans les cours de physique : celui de de Haldat (fig. 52), et celui de Pascal, modifié par Masson (fig. 53).

L'appareil de de Haldat se compose d'un tube coudé ABC, terminé, en A, par un robinet de cuivre sur lequel on peut visser successivement deux vases M et P, de même hauteur, mais de forme et de capacité différentes. Pour faire l'expérience, on commence par verser du mercure dans le tube ABC, de manière que le niveau n'atteigne pas tout à fait le robinet A. On visse alors sur le tube le vase M, qu'on remplit d'eau; celle-ci, par son poids, refoule le mercure et l'élève dans le tube C, où l'on repère son niveau au moyen d'une virole *a*, qui peut glisser le long du tube. On marque de même le niveau de l'eau dans le vase M à l'aide d'une tige mobile *o*

placée au-dessus. Cela fait, on vide le vase M au moyen du robinet, on le dévisse et on le remplace par le vase P. Versant enfin de l'eau dans celui-ci, le mercure, qui avait repris son premier niveau dans les deux branches du tube ABC, s'élève de nouveau dans le tube C, et lorsque, dans le vase P, l'eau atteint la hauteur qu'elle

Fig. 52 ($h = 72$).



avait dans le vase M, ce qu'on reconnaît au moyen de la tige o , le mercure reprend dans le tube C le même niveau que dans le premier cas, ce qu'indique la virole a : On conclut de là que, dans les deux cas, la pression transmise au mercure dans la direction ABC est la même. Cette pression est donc indépendante de la forme du vase et de la quantité de liquide. Quant au fond du vase, il est évidemment le même dans les deux cas, c'est-à-dire la surface du mercure dans l'intérieur du tube A.

Dans l'appareil de Masson (fig. 53), la pression de l'eau contenue dans le vase M ne s'exerce plus, comme dans celui de de Haldat, sur une colonne de mercure, mais sur un disque ou obturateur a , qui ferme une tubulure c , sur laquelle est vissé le vase M. Ce disque n'est pas fixé à la tubulure, mais seulement soutenu par un fil attaché à l'extrémité du fléau d'une balance. A l'autre extrémité est un bassin dans lequel on met des poids jusqu'à ce qu'ils fassent équilibre à la pression exercée par l'eau sur l'obturateur. Vidant alors le vase M, on le dévisse et l'on met

à sa place le tube étroit P. Or, si l'on remplit celui-ci d'eau à la même hauteur que l'était le grand vase, ce qu'on reconnaît au moyen du repère *o*, on observe que, pour soutenir l'obturateur, il faut juste mettre dans le plateau le même poids qu'auparavant, ce qui conduit à la même conclusion que l'expérience de

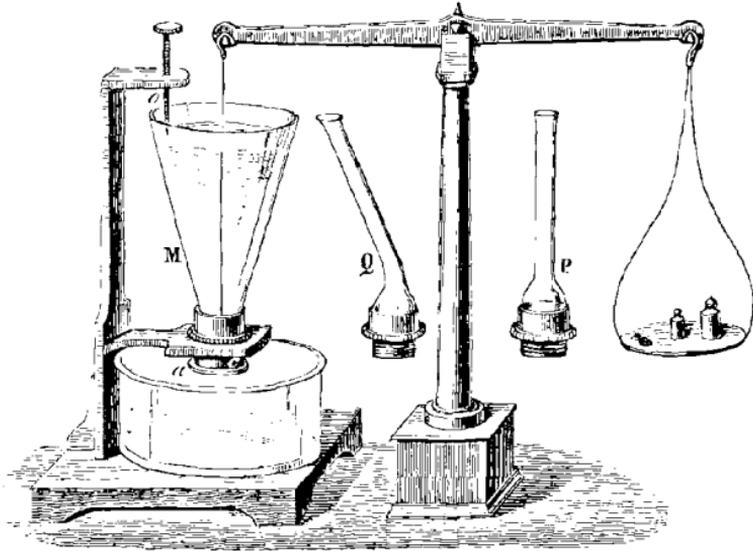


Fig. 53.

de Haldat. Même résultat si, au lieu du tube vertical P, on visse sur la tubulure *c* le tube oblique Q.

Il résulte des deux expériences qui précèdent qu'avec une très-petite quantité de liquide on peut produire des pressions considérables. Pour cela, il suffit de fixer, à la paroi d'un vase fermé et plein d'eau, un tube d'un petit diamètre et d'une grande hauteur. Ce tube étant rempli d'eau, la pression transmise sur la paroi du vase est égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette paroi et une hauteur égale à celle du tube. Pascal est parvenu ainsi, avec un simple filet d'eau de 10 mètres de hauteur, à faire éclater un tonneau solidement construit.

D'après le principe ci-dessus, on peut calculer les pressions qui se produisent au fond des mers. En effet, il sera démontré bientôt que la pression de l'atmosphère équivaut à celle d'une colonne d'eau de 10 mètres. Or les navigateurs ont observé que la sonde n'atteint pas quelquefois le fond des mers à une profondeur de 8 000 mètres et plus. C'est donc une pression de plus de 800 fois celle de l'atmosphère qui s'exerce au fond de certaines mers.

85. Pression sur les parois latérales, centre de pression. — Les pressions que fait naître la pesanteur dans les liquides se transmettant en tous sens, d'après le principe de Pascal, il en résulte, en chaque point des parois latérales, des pressions soumises aux lois données précédemment (82), et agissant toujours perpendiculairement à ces parois, quelle que soit leur forme; car on a vu (81) que toute pression oblique à une paroi se décompose en deux, l'une perpendiculaire à la paroi et produisant seule une pression, l'autre parallèle et ne produisant aucun effet. C'est la résultante des premières pressions qui représente la pression totale sur la paroi; mais ces pressions croissant proportionnellement à la profondeur et aussi proportionnellement à l'étendue de la paroi, leur résultante ne peut se trouver que par le calcul, qui fait voir que la pression totale, sur toute portion de paroi latérale, *est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base cette portion de paroi et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité à la surface libre du liquide.*

Quant au point d'application de cette pression totale, point qu'on désigne sous le nom de *centre de pression*, il est toujours un peu au-dessous du centre de gravité de la paroi. En effet, si les pressions exercées sur les différents points de la paroi étaient égales entre elles, le point d'application de leur résultante, c'est-à-dire le centre de pression, coïnciderait avec le centre de gravité de cette paroi; mais comme ces pressions croissent avec la profondeur, le centre de pression se trouve abaissé au-dessous du centre de gravité. La position de ce point se détermine par le calcul, qui conduit aux résultats suivants : 1° Sur une paroi rectangulaire, dont le bord supérieur est à fleur d'eau, le centre de pression est situé, du haut en bas, aux deux tiers de la ligne qui joint les milieux des côtés horizontaux. 2° Sur une paroi triangulaire dont la base est horizontale et à fleur d'eau, le centre de pression est au milieu de la ligne qui joint le sommet du triangle avec le milieu de cette base. 3° Si, la paroi étant encore triangulaire, le sommet est à fleur d'eau et la base horizontale, le centre de pression se trouve sur la ligne qui joint le milieu de cette base au sommet, et aux trois quarts à partir de ce point.

86. Tourniquet hydraulique. — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, il se produit sur les parois opposées, suivant chaque tranche horizontale, des pressions égales et contraires deux à deux, qui se détruisent, en sorte que rien n'indique alors l'existence de ces pressions; mais on les constate au moyen du *tourniquet hydraulique*. Cet appareil se compose d'un vase de verre M (fig. 54), reposant sur un pivot, de manière à pouvoir tourner

librement autour d'un axe vertical. Ce vase porte, à sa partie inférieure, perpendiculairement à son axe, un tube de cuivre C, coudé horizontalement et en sens contraires à ses deux extrémités. L'appareil étant rempli d'eau, il en résulte, sur les parois du tube C, des pressions intérieures qui se détruiraient comme égales et contraires deux à deux, si le tube était complètement fermé. Mais celui-ci étant ouvert à ses deux extrémités, le liquide s'écoule, et dès lors la pression ne s'exerce plus aux orifices ouverts, mais seulement sur la portion de paroi opposée A, ainsi qu'il est représenté sur la droite du dessin. La pression qui s'exerce en A, n'étant plus équilibrée par la pression opposée, imprime au tube et à tout l'appareil un mouvement de rotation dans le sens de la flèche, mouvement d'autant plus rapide,

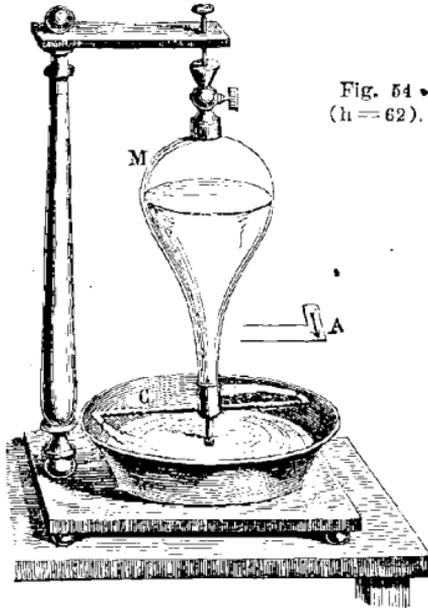


Fig. 54
(h = 62).

que la hauteur du liquide dans le vase M est plus grande, et que la section des orifices de sortie présente plus de surface.

Les pressions latérales sont utilisées dans les moteurs hydrauliques connus sous le nom de *roues à réaction*.

87. Paradoxe hydrostatique. — On a vu ci-dessus (84) que la pression sur le fond d'un vase plein de liquide ne dépend ni de la forme du vase, ni de la quantité de liquide, mais seulement de la hauteur de celui-ci au-dessus du fond. Or on ne doit pas confondre la pression ainsi exercée sur le fond avec celle que le vase lui-même exerce sur le corps qui lui sert de support. Cette dernière est toujours égale au poids total du vase et du liquide qu'il contient, tandis que la première peut être plus grande que ce poids, plus petite ou égale, suivant la forme du vase.

Par exemple, soient trois vases, A, B, C (fig. 55, 56 et 57), de même fond, mais de capacités différentes, remplis d'eau à la même hauteur. La pression sur le fond des vases est la même dans les trois; mais celle transmise par les vases au support qui les soutient est inégale. En effet, si dans le vase B on décom-

pose les pressions normales aux parois en pressions horizontales et en pressions verticales, les premières se détruisent deux à deux; tandis que les pressions verticales s'ajoutant à celles qui s'exercent sur le fond, c'est la somme de toutes ces pressions qui s'exerce sur le support. Il est donc plus pressé qu'il ne le serait

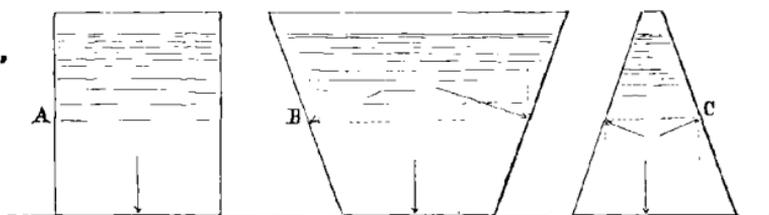


Fig. 55.

Fig. 56.

Fig. 57.

par le vase A, quoique la pression sur le fond soit la même dans les deux cas. Au contraire, dans le vase C, les pressions verticales étant dirigées en sens contraire des pressions sur le fond, ce n'est que la différence de ces pressions qui se transmet au support du vase; d'où ce support est moins pressé que par le vase A.

Cette contradiction apparente entre la pression exercée sur le fond d'un vase par le liquide qu'il contient, et celle exercée sur le support qui soutient le vase, se désigne sous le nom de *paradoxe hydrostatique*.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES

88. **Équilibre d'un liquide dans un seul vase.** — Pour qu'un liquide demeure en équilibre dans un vase de forme quelconque, il doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

1° Sa surface, en chaque point, doit être perpendiculaire à la direction de la résultante des forces qui sollicitent les molécules du liquide.

2° Une molécule quelconque, prise dans la masse, doit éprouver, en tous sens, des pressions égales et contraires.

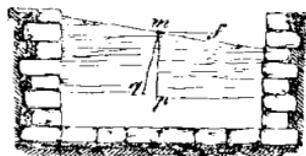


Fig. 58.

Pour démontrer que la première condition est nécessaire, supposons que mp représentant la direction de la résultante des forces qui sollicitent une molécule quelconque m de la surface (fig. 58), cette surface soit inclinée par rapport à la force mp . Celle-ci pourra alors se décomposer en deux forces mq et mf (30), l'une perpendiculaire à

la surface du liquide, l'autre à la direction mp . Or la première sera détruite par la résistance du liquide, tandis que la seconde entraînera la molécule dans la direction mf , ce qui démontre que l'équilibre est impossible.

Si la force qui sollicite le liquide est la pesanteur, mp est verticale, et alors, pour qu'il y ait équilibre, la surface libre du liquide doit être plane et horizontale (42), du moins si le liquide est contenu dans un vase ou un bassin d'une petite étendue, puisqu'en chaque point la direction de la pesanteur est alors la même. Mais il n'en est plus ainsi pour une surface liquide d'une grande étendue comme celle des mers. En effet, cette surface devant être, en chaque lieu, perpendiculaire à la direction de la pesanteur, et celle-ci changeant d'un lieu à l'autre, en se dirigeant toujours sensiblement vers le centre de la terre, il en résulte que la surface des mers change de direction en même temps que la pesanteur, et prend une forme sensiblement sphérique.

Pour prouver que le fil à plomb, en chaque lieu, est perpendiculaire à la surface des liquides en équilibre, tenant le fil à plomb à la main, comme dans la figure 10 (page 23), on en fait plonger la boule dans un vase rempli d'eau, et l'on aperçoit alors dans l'eau une image du fil exactement en ligne droite avec lui, ce qui n'aurait pas lieu s'il était oblique à la surface du liquide.

Quant à la deuxième condition d'équilibre, elle est évidente d'elle-même; car si, dans deux directions opposées, les pressions qui s'exercent sur une molécule quelconque n'étaient pas égales et contraires, la molécule serait entraînée dans le sens de la plus grande pression, et il n'y aurait pas équilibre.

Dans le cas d'un liquide soumis à la seule action de la pesanteur, ce qui est le cas général, cette seconde condition est, du reste, une conséquence du principe d'égalité de pression et de la réaction que toute pression fait naître dans la masse des liquides, et l'on pourrait l'énoncer en disant que, *dans un liquide pesant, en équilibre, les pressions sont égales sur tous les points d'une même tranche horizontale.*

89. Équilibre d'un même liquide dans plusieurs vases communicants. — Lorsque plusieurs vases de forme quelconque et contenant le même liquide communiquent entre eux, il n'y a équilibre qu'autant que le liquide, dans chaque vase, satisfait aux deux conditions précédentes (88), et, de plus, que *les diverses surfaces libres du liquide, dans tous les vases, sont situées dans un même plan horizontal.*

Soient, en effet, différents vases A, B, C, D, communiquant entre eux (fig. 59); si l'on conçoit dans le tube de communica-

tion mn une tranche liquide verticale, cette tranche ne pourra demeurer en équilibre qu'autant que les pressions qu'elle supporte de m vers n et de n vers m sont égales et contraires. Mais

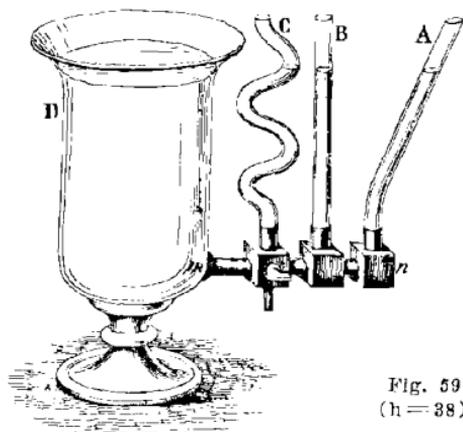


Fig. 59
(h = 38).

on a vu (85) que ces pressions sont respectivement équivalentes au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la tranche que nous considérons, et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité à la surface libre du liquide. Si l'on conçoit donc un plan horizontal passant par le centre de gravité de cette tranche, l'équilibre ne peut exister qu'autant que la hauteur du

liquide au-dessus de ce plan est la même dans chaque vase; ce qui démontre le principe énoncé ci-dessus.

90. Équilibre des liquides superposés. — Lorsque plusieurs liquides, qui ne peuvent se mélanger, sont superposés dans un même vase, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que chacun d'eux satisfasse aux conditions nécessaires dans le cas d'un seul liquide (88); de plus, pour que l'équilibre soit stable, les liquides doivent être superposés par ordre de densités croissantes de haut en bas.

Cette dernière condition se démontre expérimentalement au moyen de la *firole des quatre éléments*. On nomme ainsi un flacon long et étroit, contenant du mercure, de l'eau saturée de carbonate de potasse, de l'alcool coloré en rouge, et de l'huile de naphte. Lorsqu'on agite le flacon, les liquides semblent se mélanger; mais aussitôt qu'on le maintient au repos, le mercure, qui est le plus dense, se précipite au fond; puis, au-dessus du mercure, se déposent successivement l'eau, l'alcool et l'huile de naphte. Tel est, en effet, l'ordre des densités décroissantes de ces corps. C'est afin que l'eau ne se mêle pas à l'alcool qu'on la sature de carbonate de potasse, ce sel n'étant pas soluble dans l'alcool.

Il importe d'observer que l'état d'équilibre des liquides superposés n'est rigoureusement stable qu'autant qu'ils ne peuvent se mélanger. Sinon, par un phénomène qui sera décrit bientôt, sous le nom de *diffusion* (122), ils finissent par se mélanger spontanément, quoique les plus denses occupent la partie inférieure.

L'expérience de la fiole des quatre éléments doit être rapportée à la même cause qui fait que les solides plongés dans un liquide plus dense qu'eux viennent flotter à la surface (99).

C'est en vertu du même principe que l'eau douce, à l'embouchure des fleuves, surnage assez longtemps au-dessus de l'eau salée de la mer, et que la crème, qui est moins dense que le lait, s'en sépare peu à peu pour monter à la surface.

91. Équilibre de deux liquides hétérogènes dans deux vases communicants. — Lorsque deux liquides de densités différentes et sans action chimique l'un sur l'autre sont contenus dans deux vases communicants, aux conditions déjà connues d'équilibre (88) il faut encore ajouter celle-ci, que *les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre doivent être en raison inverse des densités des deux liquides.*

Pour le démontrer, on prend deux tubes de verre, m , n , réunis par un tube à petit diamètre, et fixés sur une planchette verticale (fig. 60); on y verse une certaine quantité de mercure, puis, dans une des branches AB, on verse de l'eau. La colonne AB exerçant en B une pression sur le mercure, le niveau de celui-ci baisse dans la branche AB et s'élève dans l'autre d'une quantité CD; en sorte que, l'équilibre étant établi, si l'on conçoit en B un plan horizontal BC, la colonne d'eau AB fait équilibre à la colonne de mercure DC. Mesurant alors les hauteurs DC et AB au moyen de deux échelles fixées parallèlement aux deux tubes, on trouve que

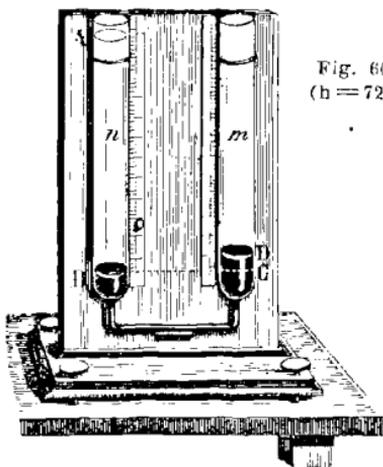


Fig. 60
(h = 72).

la première est 13 fois et demie plus petite que AB. Or on verra bientôt que la densité du mercure est 13 fois et demie plus grande que celle de l'eau; donc les hauteurs sont bien en raison inverse des densités. En effet, les pressions sur une même tranche horizontale BC devant être les mêmes, ce résultat ne peut se réaliser qu'autant qu'on gagne en hauteur ce qu'on perd en densité.

On peut déduire le principe précédent d'un calcul fort simple. Pour cela soient d et d' les densités de l'eau et du mercure, h et h' les hauteurs de ces liquides qui se font équilibre, et g l'intensité de la pesanteur. La pression en B étant proportionnelle à la densité du liquide qui est au-dessus, à sa hauteur et à l'intensité de la gravité, cette pression a pour mesure le produit dhg . Par la même

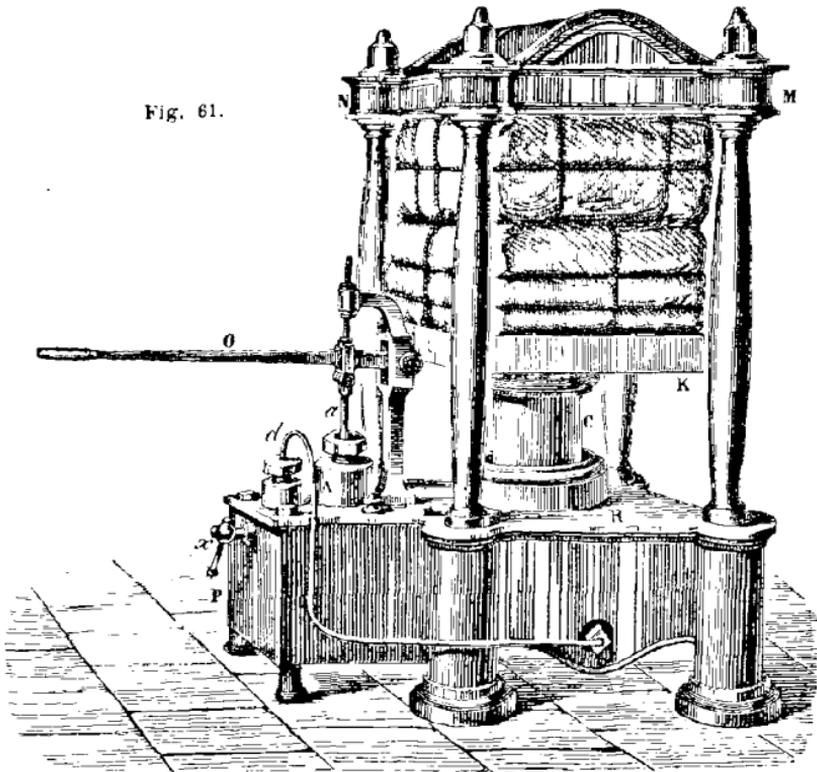
raison, la pression qui s'exerce en C a pour mesure $d'h'g$. Mais, lorsqu'il y a équilibre, ces pressions sont égales; on a donc $dhg = d'h'g$, ou $dh = d'h'$, en supprimant le facteur commun g . Or cette dernière égalité n'est autre chose que l'expression du principe qu'il s'agissait de démontrer; car les deux produits dh et $d'h'$ devant toujours rester égaux entre eux, il s'ensuit que plus d' sera grand par rapport à d , plus h' sera petit par rapport à h .

Ce principe d'hydrostatique peut servir à déterminer la densité d'un liquide. En effet, supposons que, l'une des branches du tube précédent contenant de l'eau, et l'autre de l'huile, les hauteurs respectives des colonnes liquides qui se font équilibre soient 38 centimètres pour l'huile et 35 pour l'eau. La densité de l'eau étant prise pour unité, si l'on représente par x celle de l'huile, on a

$$38 \times x = 35 \times 1; \text{ d'où } x = \frac{35}{38} = 0,921.$$

APPLICATIONS DES PRINCIPES D'HYDROSTATIQUE

92. **Presse hydraulique.** — Le principe d'égalité de pression (81) a reçu une importante application dans la *presse hydraulique*



lique, dont l'idée est due à Pascal, mais qui a été construite pour la première fois à Londres, en 1796, par Bramah.

Cet appareil, à l'aide duquel on peut produire des pressions considérables, est tout de fonte. La figure 61 en donne une vue d'ensemble, et la figure 63 une coupe verticale. Dans un corps de pompe B, à grand diamètre et à parois très-résistantes, peut monter et descendre à frottement doux un cylindre C faisant l'office de piston. A celui-ci est fixé un plateau K qui monte et descend avec lui entre quatre colonnes. Ces dernières supportent un plateau MN qui est fixe, et c'est entre ce plateau et le plateau K que sont placés les objets qu'on veut mettre en presse.

Quant à l'ascension du piston C (fig. 63), elle s'obtient à l'aide d'une pompe d'injection A, qui aspire l'eau d'un réservoir P, et la refoule dans le cylindre B. On fait marcher le piston *a* de cette pompe à l'aide d'un levier O. Lorsque le piston s'élève, la soupape S s'ouvre, et l'eau s'introduit dans le corps de pompe A; puis, quand il redescend, cette soupape se ferme, et une seconde soupape *m*, qui était fermée pendant l'ascension du piston, est soulevée actuelle-



Fig. 62.

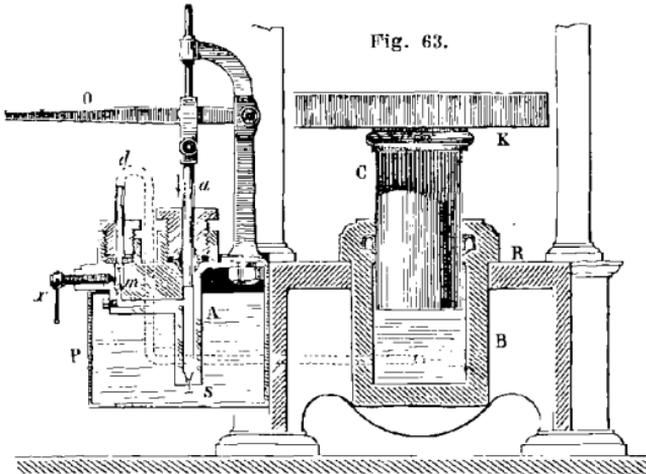


Fig. 63.

ment par la pression de bas en haut qu'elle reçoit, et l'eau est refoulée par le tube *d* jusque dans le corps de pompe B.

Il est une pièce qui mérite d'être décrite : c'est le *cuir embouti*. On nomme ainsi un cuir épais, imbibé d'huile et imperméable à l'eau, lequel sert à fermer hermétiquement le corps de pompe B. Ce cuir, recourbé en forme d'un U renversé (fig. 62), s'enroule circulairement dans une cavité pratiquée au haut de la

paroi du corps de pompe. Plus l'eau est comprimée dans celui-ci, plus le cuir s'applique d'un côté sur la paroi du corps de pompe, de l'autre sur le piston C, de manière à s'opposer à toute fuite.

La pression qu'on peut obtenir au moyen de la presse hydraulique dépend du rapport de la section du piston C à celle du piston *a*. Si la première est 50 ou 100 fois plus grande que la seconde, la pression supportée de bas en haut par le grand piston sera 50 ou 100 fois celle exercée par le petit (81). De plus, on gagne encore par le levier O. Si, par exemple, le bras de levier de la puissance égale 5 fois celui de la résistance, on gagne 5 fois en force (49). Si donc on exerce sur le levier un effort de 30^k , l'effet transmis par le piston *a* sera de 150^k , et celui que transmettra le piston C, en supposant sa section égale à 100 fois celle du petit, sera de 15000^k .

Plus le diamètre du piston C est grand par rapport à celui du piston *a*, plus on gagne en force, mais plus la course du premier est lente par rapport à celle du second; c'est-à-dire que *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*. C'est là, en effet, un principe général de mécanique qui se retrouve dans toutes les machines.

La presse hydraulique est utilisée dans tous les travaux qui nécessitent de grandes pressions. On l'emploie pour fouler les draps, pour extraire le suc des betteraves, l'huile des graines oléagineuses. Elle sert encore à éprouver les chaudières à vapeur et les chaînes destinées à la marine.

93. **Niveau d'eau.** — Le *niveau d'eau* est une application des conditions d'équilibre dans les vases communicants (89). Il se com-

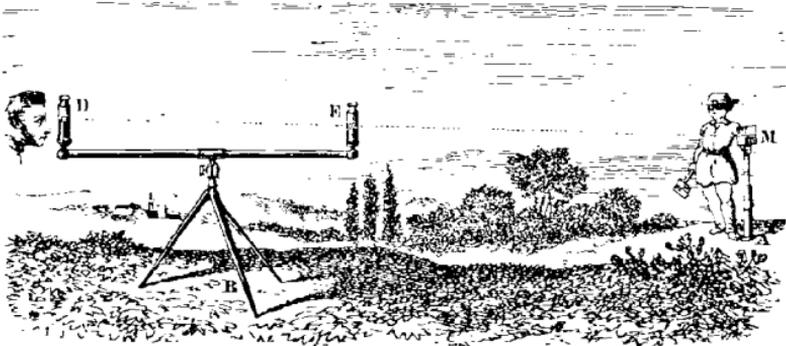


Fig. 64 ($l = 90$).

pose d'un tube de fer-blanc ou de laiton coudé à ses deux extrémités; à celles-ci sont adaptés deux tubes de verre D et E (fig. 64). Pour se servir de cet appareil, on le dispose horizontalement sur un pied à trois branches, et l'on y verse de l'eau jusqu'à ce que le li-

guide s'élève dans les deux tubes de verre. L'équilibre étant établi, le niveau de l'eau dans ces tubes est le même, et les surfaces du liquide en D et en E sont dans un même plan horizontal.

Cet instrument sert à prendre des nivellements, c'est-à-dire à déterminer de combien un point est plus élevé qu'un autre. Par exemple, si l'on veut trouver de combien un point B du sol est au-dessus d'un autre point A, on place en ce dernier point une *mire*. On nomme ainsi une règle de bois formée de deux tiges à coulisse, et terminée par une plaque de fer-blanc M, qu'on appelle le *voyant*, et qui porte à son centre un point de repère. Cette mire étant disposée verticalement en A, un observateur, placé près du niveau, dirige, par les surfaces D et E, un rayon visuel vers la mire, et fait signe à un aide, qui la tient, de l'allonger ou de la raccourcir jusqu'à ce que le point de repère se trouve sur le prolongement de la ligne DE. Mesurant alors la hauteur AM, et en soustrayant la hauteur du niveau au-dessus du sol, on connaît de combien le point B est élevé au-dessus du point A.

Le niveau déterminé de la sorte est le *niveau apparent*, c'est-à-dire celui qui correspond à des points contenus dans un plan tangent à la surface du globe supposé parfaitement sphérique. Le *niveau vrai* est celui qui correspond à des points également distants du centre de la terre. Ce n'est que pour de faibles distances que le niveau apparent peut être pris pour le niveau vrai.

94. **Niveau à bulle d'air.** — Le *niveau à bulle d'air* est plus sensible et plus précis que le niveau d'eau. Il consiste en un tube de verre AB (fig. 65) très-légèrement cintré, qu'on remplit d'un liquide très-fluide, comme l'alcool ou l'éther, en y conservant une



Fig. 65.

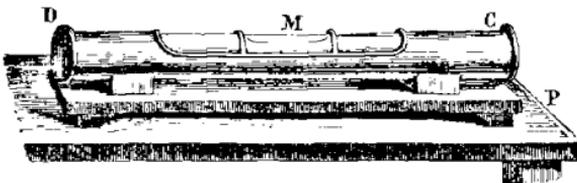


Fig. 66.

petite bulle d'air, qui tend toujours à occuper la partie la plus élevée 90. Ce tube, étant soudé à la lampe à ses deux extrémités, est renfermé dans un étui de cuivre CD ouvert en dessus (fig. 66). Celui-ci est fixé sur une règle de même métal, dressée avec soin, de manière que lorsque l'instrument repose sur un plan hori-

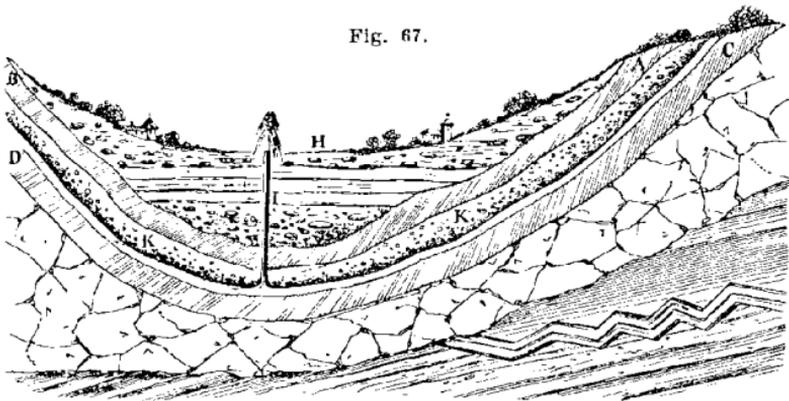
zontal P, la bulle d'air M s'arrête exactement entre deux points de repère marqués sur l'étui.

Pour prendre des nivellements avec cet instrument, on le fixe à une lunette dont il sert à indiquer les directions horizontales.

95. **Cours d'eau, puits artésiens.** — Les mers, les sources, les rivières, sont autant de vases communicants dans lesquels les eaux tendent sans cesse à prendre un niveau vrai (93).

Il en est de même des *puits artésiens*, ainsi nommés parce que c'est dans l'ancienne province d'Artois qu'ils ont d'abord été pratiqués. On y en rencontre dont l'origine paraît remonter à la fin du XII^e siècle. A une époque beaucoup plus reculée, des puits de ce genre ont été creusés en Chine et en Égypte.

Ces puits sont des trous très-étroits, forés à la sonde, et d'une profondeur très-variable. Leurs eaux sont généralement jaillissantes. Pour en comprendre la théorie, remarquons que les terrains qui composent l'écorce du globe sont, les uns perméables aux eaux, comme les sables, les graviers; les autres imperméables, comme les argiles. Cela posé, soit un bassin géographique H plus ou moins étendu, au-dessous duquel gisent deux couches imperméables



AB, CD (fig. 67), comprenant entre elles une couche perméable KK. Soit, enfin, cette dernière en communication avec des terrains plus élevés, à travers lesquels s'infiltrent les eaux des pluies. Ces eaux, suivant la pente naturelle du terrain à travers la couche perméable, se rendent au-dessous du bassin géographique que nous avons supposé, sans pouvoir communiquer avec lui, en étant séparées par la couche imperméable AB. Mais si, à partir du sol, on pratique un trou qui traverse cette couche, les eaux, tendant toujours à se mettre de niveau, s'élèvent dans ce

trou à une hauteur d'autant plus grande, qu'elles communiquent avec un terrain plus élevé.

Les eaux qui alimentent les puits artésiens viennent souvent de vingt à trente lieues. Quant à la profondeur, elle varie avec les localités. Le puits foré de Grenelle, à Paris, a 548 mètres de profondeur. L'eau qui s'en dégage est, en toute saison, à 27 degrés. D'après la loi de l'accroissement de la température des couches terrestres, quand on s'abaisse au-dessous du niveau du sol (451), il suffirait que la profondeur de ce puits eût 150 mètres de plus pour que ses eaux sortissent, toute l'année, à 32 degrés, c'est-à-dire à la température des bains.

Le puits artésien de Passy a 587^m,5 de profondeur. La température de l'eau en est de 28 degrés.

CORPS PLONGÉS DANS LES LIQUIDES

96. Pressions supportées par un corps plongé dans un liquide. — Lorsqu'un corps solide est entièrement plongé dans un liquide, sa surface supporte en chaque point des pressions qui lui sont respectivement perpendiculaires, et qui croissent avec la profondeur.

Si l'on conçoit toutes ces pressions décomposées en pressions horizontales et en pressions verticales, les premières, pour chaque tranche horizontale, sont égales et contraires deux à deux, et par conséquent se font équilibre. Quant aux pressions verticales, il est facile de voir qu'elles sont inégales et qu'elles tendent à mouvoir de bas en haut le corps immergé.

En effet, soit un cube plongé au milieu d'une masse d'eau (fig. 68), et supposons, pour plus de simplicité, ses parois latérales disposées verticalement. Ces parois supportent des pressions égales, puisqu'elles présentent la même surface et sont à la même profondeur (82 et 85). Pour deux faces opposées, il est d'ailleurs évident que les pressions sont de directions contraires; donc elles se font équilibre. Si nous considérons actuellement les pressions qui s'exercent sur les faces horizontales A et B, nous voyons que la première est pressée de haut en bas par le poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la face même et pour hauteur AD; de même, la face inférieure est poussée de bas en haut par le

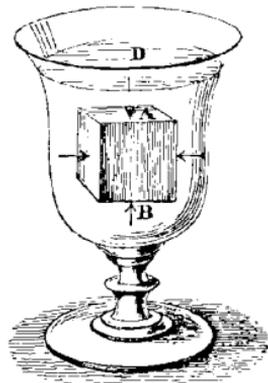


Fig. 68.

poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette face et pour hauteur BD (83). Le cube tend donc à être soulevé par la différence de ces deux pressions, laquelle est évidemment égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait même base et même hauteur que le cube; par conséquent, *cette pression équivaut au poids même du volume d'eau déplacé par le corps immergé.*

On peut encore reconnaître, par le raisonnement suivant, que tout corps immergé dans un liquide supporte, de bas en haut, une poussée égale au poids du liquide qu'il déplace. En effet, dans une masse liquide en équilibre, considérons une portion de liquide d'une forme quelconque, sphérique, ovoïde ou irrégulière, et supposons-la solidifiée, sans accroissement ni diminution de volume. Il est évident que la partie ainsi solidifiée supportera, de la part de la masse liquide, les mêmes pressions qu'auparavant, et que, par conséquent, elle sera encore en équilibre; ce qui ne peut avoir lieu que parce qu'elle supporte, de bas en haut, une poussée égale à son poids. Or, si à la place de la partie solidifiée on imagine un corps d'une autre substance, de même volume et de même forme, il supportera nécessairement les mêmes pressions que supportait le liquide solidifié, et dès lors il sera soumis, lui aussi, à une poussée égale au poids du liquide déplacé.

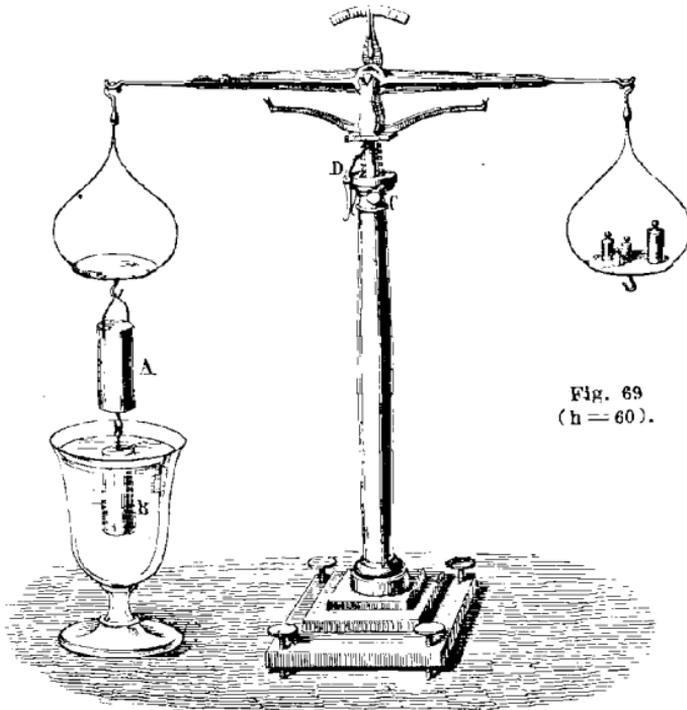
Quelle que soit la forme d'un corps plongé dans un liquide, toutes les pressions exercées à sa surface par ce liquide se réduisent à une force unique, qui est leur résultante, et le point d'application de cette résultante est le *centre de pression* du corps (85).

97. Principe d'Archimède. — D'après ce qui précède, tout corps plongé dans un liquide est soumis à l'action de deux forces opposées : la pesanteur, qui tend à l'abaisser, et la poussée du liquide, qui tend à le soulever avec un effort égal au poids même du liquide que déplace le corps. Le poids de celui-ci est donc détruit en totalité ou en partie par cette poussée; d'où l'on conclut qu'*un corps plongé dans un liquide perd une partie de son poids égale au poids du liquide déplacé.*

Ce principe, qui sert de base à la théorie des corps plongés et des corps flottants, est connu sous le nom de *principe d'Archimède*, parce qu'il fut découvert par ce célèbre géomètre, mort à Syracuse 212 ans avant l'ère chrétienne.

Le principe d'Archimède se démontre par l'expérience au moyen de la *balance hydrostatique*, laquelle est une balance ordinaire dont chaque plateau est muni d'un crochet, et dont le fléau peut s'élever et s'abaisser à volonté, à l'aide d'une crémaillère qu'on fait marcher par un petit pignon C (fig. 69). Un encliquetage D retient la crémaillère lorsqu'on l'a soulevée. Le fléau étant remonte,

on suspend, au-dessous de l'un des plateaux, un cylindre creux A, de laiton, et au-dessous de celui-ci, un cylindre plein B, dont le volume est exactement le même que la capacité du premier; puis, dans l'autre plateau, on place des poids jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse. Si alors on remplit d'eau le cylindre A, l'équilibre est



rompu; mais si l'on abaisse en même temps le fléau de manière que le cylindre B plonge en entier dans l'eau d'un vase placé au-dessous, on voit l'équilibre se rétablir. Le cylindre B perd donc, par son immersion, une partie de son poids égale au poids de l'eau versée dans le cylindre A. Or le principe d'Archimède se trouve ainsi démontré, puisque la capacité de ce dernier cylindre est précisément égale au volume du cylindre B.

98. **Détermination du volume d'un corps.** — Le principe d'Archimède donne le moyen d'obtenir avec précision le volume d'un corps de la forme la plus irrégulière, lorsqu'il n'est pas soluble dans l'eau et ne l'absorbe pas. Pour cela, l'ayant suspendu par un fil à la balance hydrostatique, on le pèse dans l'air, puis dans l'eau distillée et à 4 degrés. La perte de poids que l'on constate

alors est le poids de l'eau déplacée. Du poids de cette eau on déduit son volume, et, par suite, celui du corps immergé, qui est évidemment le même. Si, par exemple, la perte de poids est de 155 grammes, l'eau déplacée pèse 155 grammes; mais on sait que le gramme est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée et à 4 degrés; donc le volume de l'eau déplacée, et par conséquent celui du corps plongé, est de 155 centimètres cubes.

Si l'eau n'était pas à 4 degrés, il y aurait à faire une correction qui dépend des formules sur les dilatations (318).

99. Équilibre des corps immergés et des corps flottants, métacentre. — D'après les considérations théoriques qui nous ont conduits au principe d'Archimède (96 et 97), si un corps plongé dans un liquide a la même densité que lui, la poussée qui tend à sou-

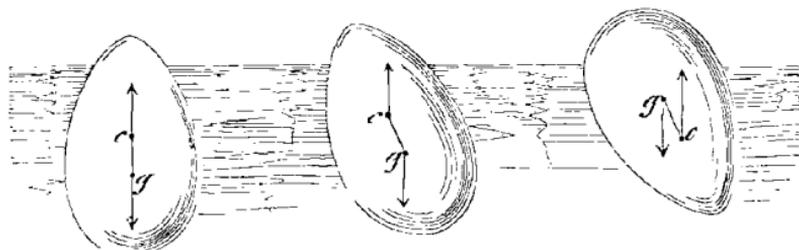


Fig. 70.

Fig. 71.

Fig. 72.

lever ce corps est précisément égale à son poids. Le corps reste donc en suspension dans le sein du liquide.

Si le corps est plus dense que le liquide, il tombe, car son poids l'emporte sur la poussée de bas en haut.

Enfin, si le corps immergé est moins dense que le liquide, c'est la poussée de celui-ci qui prédomine. Le corps prend donc un mouvement ascensionnel, et s'élève hors du liquide jusqu'à ce qu'il n'en déplace qu'un volume d'un poids égal au sien. On dit alors que le corps *flotte*. La cire, le bois et tous les corps plus légers que l'eau, flottent à sa surface.

Pour qu'un corps plongé dans un liquide, ou flottant à sa surface, demeure en équilibre, il faut deux conditions :

- 1^o *Le corps doit déplacer un poids de liquide égal au sien.*
- 2^o *Son centre de gravité et le centre de pression du liquide déplacé doivent être sur une même verticale.*

En effet, ces deux conditions étant satisfaites, le poids du corps, appliqué à son centre de gravité, et la poussée de bas en haut, appliquée au centre de pression, sont deux forces non-seulement égales, mais directement opposées; donc elles se font équilibre. On va voir dans quel cas cet équilibre est stable ou instable.

1^o Lorsque le centre de gravité est au-dessous du centre de pression (fig. 70), l'équilibre est toujours stable; car si le corps est légèrement écarté de sa position d'équilibre (fig. 71), les forces appliquées en c et en g tendent évidemment à l'y ramener.

2^o Si le centre de gravité est au-dessus du centre de pression, l'équilibre tend à être instable; car le corps étant déplacé de sa position d'équilibre (fig. 72), les forces appliquées en g et en c tendent à l'en écarter davantage.

* *Métacentre*. — Toutefois, dans le dernier cas ci-dessus, il peut y avoir équilibre stable. Par exemple soit ABC (fig. 73) la section d'un navire par un plan passant par la verticale xy , sur laquelle sont situés le centre de gravité g du navire et le centre de pression c du liquide déplacé. Lorsque le navire incline dans la position A'B'C', la ligne xy incline en $x'y'$, et le centre de gravité qui ne change pas par rapport au navire, passe de g en g' , tandis que la forme du liquide déplacé n'étant plus la même, le centre de pression change par rapport au navire, et prend, par exemple, la position c' . Cela posé, soit menée par le point c' une verticale qui coupe la droite $x'y'$ en m , point où l'on peut supposer appliquée la poussée du liquide. Si le point m est situé au-dessus du point g' , il est évident que les forces appliquées en m et en g' auront pour effet de ramener le navire à sa première position ABC, et que par suite l'équilibre est stable. Si, au contraire, le point m est au-dessous du centre de gravité en g' , les deux forces appliquées en m et en g' ont pour effet de faire chavirer le navire, et l'équilibre est instable. On donne le nom de *métacentre* au point m où la verticale $c'm$ coupe la droite $x'y'$. On peut donc résumer ce qui précède en disant, des corps flottants, qu'ils sont en équilibre stable, quand le métacentre est plus haut que le centre de gravité du corps flottant; et en équilibre instable, lorsque le métacentre est plus bas.

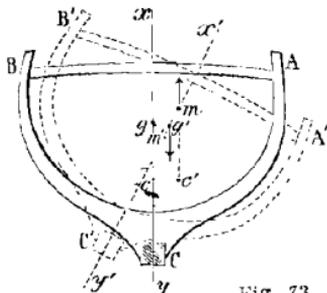


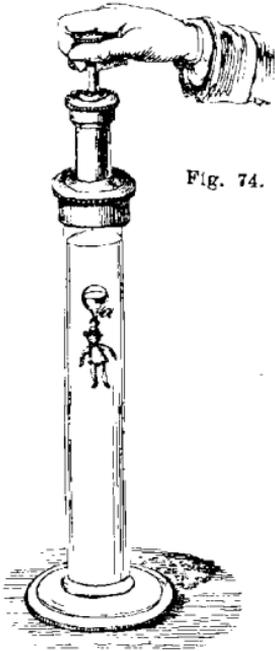
Fig. 73.

La détermination du métacentre et du centre de gravité est d'une grande importance dans l'arrimage des navires; car c'est de leur position relative que dépend la stabilité.

D'après le principe d'Archimède, les corps flottent d'autant plus facilement à la surface des liquides, que ceux-ci sont relativement plus denses. Qu'on mette, par exemple, un œuf dans de l'eau ordinaire, il va au fond, parce qu'à volume égal il pèse davantage; mais qu'on le plonge dans de l'eau saturée de sel, il surnage. Un morceau de chêne flotte sur l'eau; mais il est submergé dans l'huile. Une masse de fer surnage dans un bain de mercure; dans l'eau, elle va immédiatement au fond. Quant au volume de la partie immergée, dans les corps flottants, *il est en raison inverse de la densité du liquide, et en raison directe de celle du corps flottant.*

100. **Ludion**. — Les effets divers de suspension, d'immersion

et de flottaison dans un liquide sont reproduits avec le petit appareil qu'on nomme *ludion*. Il se compose d'une éprouvette de verre remplie d'eau en partie, et surmontée d'un tube de cuivre dans lequel est un piston qu'on fait marcher avec la main, et qui ferme hermétiquement (fig. 74).



Dans le liquide est une petite figure d'émail, soutenue par une boule de verre creuse *a*, qui contient de l'air et de l'eau, et flotte à la surface. Cette boule est percée, à sa partie inférieure, d'une petite ouverture par laquelle l'eau peut pénétrer ou sortir, selon que l'air intérieur de la boule est plus ou moins comprimé. La quantité d'eau préalablement introduite dans la boule est telle, que l'appareil n'a besoin que d'un très-petit excès de poids pour s'immerger tout à fait. Si l'on exerce donc avec la main une légère pression sur le piston comme le montre la figure, l'air qui est au-dessous se trouve comprimé, et transmet sa pression à l'eau du vase et à l'air qui est dans la boule. Il en résulte qu'une certaine quantité d'eau pénètre dans celle-ci, et que le volume d'eau déplacé par l'air étant moindre, le ludion s'immerge. Si l'on cesse alors la

pression, l'air de la boule se détend, chasse l'excès d'eau qui y a pénétré, et le corps immergé flotte de nouveau.

101. **Vessie natatoire des poissons.** — Chez les poissons, un grand nombre d'espèces portent dans l'abdomen, au-dessous de l'épine dorsale, une vessie pleine d'air qu'on nomme *vessie natatoire*. Le poisson, en la comprimant ou en la dilatant par un effort musculaire, fait varier son volume, et obtient des effets analogues à ceux qu'on vient d'observer dans le ludion.

102. **Natation.** — Le corps humain, à volume égal, est généralement plus léger que l'eau douce : aussi peut-il flotter naturellement sur ce liquide, et mieux encore sur l'eau salée de la mer, qui est plus dense. La difficulté de la natation est donc moins de se maintenir à la surface de l'eau que de pouvoir tenir la tête hors du liquide, afin de respirer librement. Or, chez l'homme, la tête, ayant un grand poids par rapport aux membres inférieurs, tend à plonger ; c'est ce qui fait que la natation est pour l'homme un art qu'il doit

cultiver. Chez les quadrupèdes, au contraire, la tête, pesant moins que la partie postérieure du corps, peut sans effort demeurer hors de l'eau; aussi ces animaux nagent-ils naturellement.

POIDS SPÉCIFIQUES, ARÉOMÈTRES A VOLUME CONSTANT

103. Définitions des poids spécifiques. — On a vu (45) que le poids spécifique d'un corps, soit solide, soit liquide, est le rapport du poids d'un volume quelconque de ce corps, supposé à zéro, au poids d'un égal volume d'eau distillée, celle-ci étant à 4 degrés au-dessus de zéro. Les poids spécifiques des corps exprimant ainsi combien ils pèsent par rapport à l'eau, il en résulte que le poids spécifique de ce liquide est pris pour unité et est représenté par 1.

D'après la définition qui précède, si l'on représente par P le poids d'un corps dont le volume est V à zéro, par p le poids à 4 degrés d'un égal volume d'eau distillée, et par D le poids spécifique du corps, on a $D = \frac{P}{p}$ [1]. Or, dans le système métrique, 1 centimètre et 1 décimètre cubes d'eau distillée pesant, à 4 degrés, respectivement 1 gramme et 1 kilogramme, pour l'eau prise dans ces conditions, on a toujours numériquement $p = V$, si l'on a soin de compter le poids en grammes ou en kilogrammes, suivant que le volume l'est en centimètres ou en décimètres cubes. La formule [1] ci-dessus devient donc $D = \frac{P}{V}$ [2]; ce qui permet de dire que le poids spécifique d'un corps est le rapport de son poids à son volume.

Enfin, si dans l'égalité [2] on prend $V = 1$, on a $D = P$; d'où l'on peut dire encore que le poids spécifique d'un corps est son poids sous l'unité de volume. Dans la détermination des poids spécifiques, nous nous appuierons sur la première définition, celle représentée par la formule $D = \frac{P}{p}$, qui est indépendante de tout système de poids et mesures.

104. Températures adoptées dans la recherche des poids spécifiques. — La condition de températures fixes, pour les corps dont on recherche le poids spécifique et pour l'eau à laquelle on les compare, est nécessaire; car les volumes des corps, solides ou liquides, variant inégalement avec la température, il en est de même de leurs poids spécifiques. C'est pourquoi on est convenu de prendre les corps à la température de zéro, et l'eau à 4 degrés, parce que c'est à cette température qu'a lieu son maximum de densité.

La condition que l'eau soit distillée est aussi nécessaire, son poids variant avec les substances qu'elle tient en dissolution.

Ces différentes conditions n'étant pas généralement satisfaites dans les méthodes qu'on emploie pour la détermination des poids spécifiques, on a à effectuer des corrections relatives à la température des corps, à celle de l'eau, et enfin à la perte de poids qu'éprouvent les corps pesés dans l'air (173). On verra, dans l'étude de la chaleur, les calculs relatifs à ces corrections (319). Du reste, elles sont presque toujours très-petites, et peuvent être négligées pour les corps lourds, comme les métaux et les pierres. Nous en ferons donc abstraction pour le moment.

Trois méthodes sont employées pour déterminer les poids spécifiques des solides et des liquides : la *méthode de la balance hydrostatique*, celle des *aréomètres* et celle du *flacon*. Toutes les trois reviennent à chercher d'abord le poids du corps dont on veut avoir le poids spécifique, puis celui d'un égal volume d'eau, et à diviser le premier poids par le second.

105. Détermination des poids spécifiques des solides. — 1^o *Méthode de la balance hydrostatique.* — Pour obtenir le poids spécifique d'un solide non soluble dans l'eau, au moyen de la balance hydrostatique (fig. 69), on le place dans un des plateaux, et dans l'autre on lui fait équilibre avec une tare. Enlevant alors le corps et le remplaçant par des poids gradués, c'est-à-dire par des grammes et des fractions de gramme, jusqu'à ce que l'équilibre se rétablisse, on a, par la méthode des doubles pesées, le poids P du corps dans l'air. On le suspend ensuite, par un fil fin, au crochet du plateau dans lequel on l'a pesé (fig. 75), et on le plonge dans l'eau distillée, en conservant dans l'autre plateau la même tare. Le corps immergé, perdant une partie de son poids égale à celui de l'eau déplacée (96), on ajoute un poids p qui ramène la balance à sa première position, et représente le poids de l'eau déplacée sous un volume égal à celui du corps; on a donc $D = \frac{P}{p}$.

2^o *Méthode de l'aréomètre de Nicholson.* — L'*aréomètre de Nicholson* est un appareil flotteur qui sert à déterminer les poids spécifiques des solides. Il se compose d'un cylindre creux de fer-blanc (fig. 76), auquel est suspendu un cône C rempli de plomb. Celui-ci a pour objet de lester l'appareil de manière que son centre de gravité se trouve au-dessous du centre de pression, condition nécessaire pour que l'équilibre soit stable (99). A sa partie supérieure, l'appareil se termine par une tige et un plateau A; ce dernier est destiné à recevoir des poids et le corps dont on cherche le poids spécifique. Enfin, sur la tige, en o , est marqué un

trait qu'on nomme *point d'affleurement*, et qui sert à indiquer quand l'appareil plonge de la même quantité.

Pour expérimenter avec cet instrument, on cherche d'abord le poids qu'il faut mettre dans le plateau A pour que l'aréomètre plonge dans l'eau jusqu'à son point d'affleurement; car, à vide, il s'élève en partie hors de l'eau. Supposons que ce poids soit

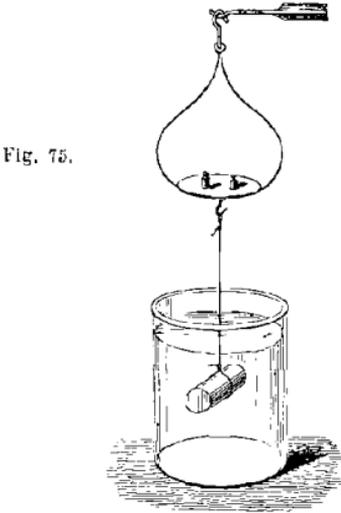
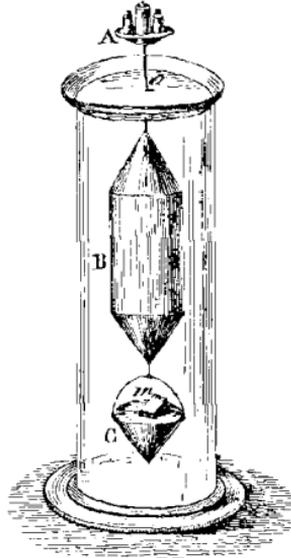


Fig. 75.

Fig. 76
(h = 40).

125 grammes, et admettons qu'il s'agisse de trouver le poids spécifique du soufre. On en prend un morceau d'un poids moindre que 125 grammes, on le place dans le plateau A, puis on ajoute des grammes jusqu'à ce que l'aréomètre affleure de nouveau. S'il a fallu ajouter, par exemple, 55 grammes, il est évident que le poids du soufre est la différence entre 125 et 55, c'est-à-dire 70. Ayant ainsi déterminé le poids du soufre dans l'air, il ne reste plus qu'à trouver le poids d'un égal volume d'eau. Pour cela, on enlève l'aréomètre, et l'on porte le morceau de soufre du plateau A sur le plateau inférieur C, en *m*. Le poids total de l'instrument n'est pas changé, et cependant, en le plongeant de nouveau, on remarque qu'il n'affleure plus, ce qui provient de ce que le soufre, étant immergé, perd de son poids une partie égale au poids de l'eau qu'il déplace. Si l'on ajoute alors, dans le plateau supérieur, des poids jusqu'à ce que l'affleurement se rétablisse, 34^{er}, par exemple, c'est là le poids du volume d'eau déplacé, c'est-à-dire du volume d'eau égal à celui du soufre. Il ne reste donc plus

qu'à diviser 70 grammes, poids du soufre dans l'air, par 34^{gr}; ce qui donne, pour le poids spécifique du soufre, 2,05.

Si la substance dont on cherche le poids spécifique est plus légère que l'eau, elle tend à surnager et ne peut demeurer sur le plateau inférieur C. On adapte alors à celui-ci un petit grillage de fil de fer mobile, qui s'oppose à l'ascension du corps, et le reste de l'expérience se fait comme ci-dessus.

3^o *Méthode du flacon.* — Cette méthode, due à Klaproth, est surtout employée pour les corps en poudre. On y fait usage d'un

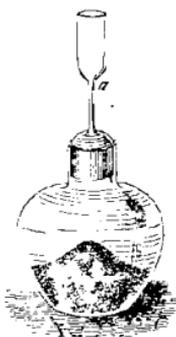


Fig. 77.

petit flacon à large goulot, fermé par un bouchon de verre usé à l'émeri. Ce bouchon est foré d'un trou qui se prolonge par une tubulure capillaire terminée elle-même par un tube à grand diamètre (fig. 77). Sur cette tubulure est un point de repère *a*, et à chaque pesée on a soin de remplir d'eau le flacon exactement jusqu'à ce point, ce qui s'obtient en plongeant en entier le flacon dans l'eau et en le bouchant pendant qu'il est ainsi immergé. Le flacon et la tubulure se trouvant alors complètement remplis, on enlève l'excès d'eau jusqu'au point *a*, au moyen d'un petit rouleau de papier Joseph. Plaçant ensuite, dans un des plateaux d'une balance, le flacon exactement rempli d'eau distillée, fermé et essuyé avec soin, et à côté le corps dont on cherche le poids spécifique, en fragment ou en poudre, on lui fait équilibre dans l'autre plateau avec de la grenaille de plomb. Enlevant alors le corps, on le remplace par un nombre de grammes *P* qui représente son poids dans l'air. Cela fait, on retire le flacon, on le débouche et l'on y introduit le corps. Remettant le bouchon de la même manière qu'il a été dit ci-dessus, on pose de nouveau le flacon dans le plateau où il était d'abord. L'équilibre n'a plus lieu; car une certaine quantité d'eau a été expulsée. Ajoutant des poids du côté du flacon jusqu'à ce que la balance reprenne sa position horizontale, le nombre de grammes ajouté représente le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps. Il ne reste donc plus qu'à faire le même calcul que dans les deux méthodes précédentes.

Dans cette expérience, il importe d'expulser une petite quantité d'air qui est adhérente à la surface des corps, et leur fait déplacer un volume d'eau trop grand. A cet effet, après avoir introduit le corps, soit en poudre, soit en fragment, dans l'eau du flacon, on place celui-ci sous la cloche de la machine pneumatique et on fait le vide; l'air se dégage alors en vertu de sa force élastique. On obtiendrait le même résultat en faisant bouillir l'eau.

106. Corps solubles dans l'eau. — Si, dans les trois méthodes que nous venons de décrire, il arrivait que le corps dont on cherche le poids spécifique fût soluble dans l'eau, on prendrait le poids spécifique de ce corps par rapport à un liquide dans lequel il ne serait pas soluble, l'alcool par exemple. Puis, cherchant, par un des procédés que nous allons décrire, le poids spécifique de l'alcool par rapport à l'eau, on obtiendrait le poids spécifique de la substance donnée en multipliant son poids spécifique par rapport à l'alcool, par celui de ce liquide par rapport à l'eau.

En effet, soient, à volume égal, P le poids de la substance, P' celui de l'alcool, P'' celui de l'eau. $\frac{P}{P'}$ sera le poids spécifique de la substance par rapport à l'alcool, et $\frac{P'}{P''}$ celui de l'alcool par rapport à l'eau. Or le produit de ces deux fractions est $\frac{P}{P''}$, poids spécifique de la substance par rapport à l'eau.

Poids spécifiques des solides à zéro, comparativement à celui de l'eau distillée et à 4 degrés, pris pour unité.

Platine éroulé	23,000	Diamants	3,501 à 3,531
— fondu	21,16.	Flint-glass	3,329
Or fondu	19,258	Marbre statuaire	2,837
Plomb fondu	11,352	Ardoise	2,89.
Argent fondu	10,474	Granit	2,70.
Bismuth fondu	9,822	Aluminium fondu	2,56.
Cuivre rouge passé à la filière.	8,878	Verre de Saint-Gobain	2,488
— — fondu	8,788	Soufre octaédrique	2,07.
Laiton	8,393	Sodium	0,972
Acier non éroulé	7,816	Glace fondante	0,930
Fer en barre	7,788	Potassium	0,865
— fondu	7,207	Hêtre	0,852
Étain fondu	7,291	Orme	0,80.
Foute	7,053	Sapin jaune	0,65.
Zinc fondu	6,861	Peuplier d'Italie	0,38.
Antimoine fondu	6,712	Liège	0,24.

107. Poids spécifiques des liquides. — *1^o Méthode de la balance hydrostatique.* — Au crochet de l'un des plateaux de la balance on suspend un corps sur lequel le liquide dont on cherche le poids spécifique n'ait pas d'action chimique; par exemple, une boule de platine ou de verre, et on lui fait équilibre dans l'autre plateau avec une tare. Plongeant ensuite la boule successivement dans l'eau distillée et dans le liquide dont on cherche le poids spécifique, soit l'alcool, l'équilibre est rompu, et les poids p et p' qu'il faut ajouter pour rétablir l'équilibre représentant le poids de l'eau déplacée, puis celui de l'alcool, à volume égal, on a $D = \frac{p'}{p}$.

2^o Méthode de l'aréomètre de Fahrenheit. — L'aréomètre de

Fahrenheit (fig. 78) est un flotteur destiné à prendre les poids spécifiques des liquides. Sa forme est analogue à celle de l'aréomètre de Nicholson ; mais il n'a pas de plateau à la partie inférieure, et il est de verre, afin de pouvoir être placé dans toute



Fig. 78.



Fig. 79.

espèce de liquides. Sa tige porte aussi un point d'affleurement destiné à obtenir un volume immergé constant. Enfin, il est lesté à la partie inférieure par une petite boule remplie de mercure.

Avant d'expérimenter avec cet aréomètre, on en détermine le poids avec précision ; puis, le faisant flotter dans une éprouvette remplie d'eau distillée, on ajoute des poids dans la capsule supérieure jusqu'à ce que le point d'affleurement atteigne le niveau de l'eau. En cet état, d'après la première condition d'équilibre des corps flottants (99), le poids de l'aréomètre, ajouté au poids qui est dans la capsule, repré-

sente le poids d'un volume d'eau égal à celui de la partie immergée de l'instrument. Déterminant de la même manière le poids d'un égal volume du liquide dont on cherche le poids spécifique, il ne reste plus qu'à diviser le dernier poids par le premier.

3^e *Méthode du flacon.* — Dans cette méthode, on fait usage d'un petit flacon de forme spéciale (fig. 79) : il se compose d'un réservoir cylindrique *b*, auquel est soudée une tige capillaire, et à celle-ci un tube plus gros *a*, fermé par un bouchon de verre pour le cas où l'on expérimente sur des liquides volatils. Sur la tige capillaire est un point de repère *c*, qui sert à marquer un volume constant de liquide.

Ayant placé le flacon vide et bien sec dans le plateau d'une balance, on lui fait équilibre par une tare, puis on le remplit d'eau distillée jusqu'en *c*, et on le remet dans la balance. Le poids *p* qu'il faut ajouter pour rétablir l'équilibre est le poids de l'eau contenue dans le flacon. Vidant alors celui-ci, le desséchant et le remplissant jusqu'en *c* du liquide dont on cherche le poids spécifique, on trouve, comme ci-dessus, son poids *p'* à volume égal ; d'où encore $D = \frac{p'}{p}$.

Poids spécifiques des liquides à zéro, comparativement à celui de l'eau distillée et à 4 degrés, pris pour unité.

Mercure	13,596	Eau distillée, à 4 degrés . . .	1,000
Bromo	2,966	— à zéro.	0,9998
Acide sulfurique monohydraté. . .	1,841	Vin de Bordeaux	0,994
— azotique quadrihydraté. . .	1,42.	Esprit de bois	0,928
Sulfure de carbone.	1,263	Huile d'olive.	0,915
Acide chlorhydrique sixhydraté . .	1,208	Huile de naphte.	0,867
— acétique monohydraté. . .	1,063	Essence de térébenthine. . . .	0,861
Lait de vache	1,030	Alcool absolu	0,795
Eau de mer	1,026	Éther sulfurique.	0,730

108. **Usage des tables des poids spécifiques.** — Les tables des poids spécifiques présentent de nombreuses applications. En minéralogie, elles fournissent un caractère distinctif pour reconnaître les espèces minérales d'après leur densité. Elles servent encore à trouver le poids d'un corps dont le volume est connu, ou réciproquement, à calculer le volume lorsque le poids est donné.

En effet, on a vu (103) qu'entre le poids relatif P d'un corps, son poids spécifique D et son volume V, il existe la relation $D = \frac{P}{V}$, ou $P = VD$, qui sert à trouver une des quantités P, V, D, quand on connaît les deux autres; mais toujours à la condition que les poids étant exprimés en grammes ou en kilogrammes, les volumes le soient en centimètres ou en décimètres cubes.

ARÉOMÈTRES A VOLUME VARIABLE

109. **Différentes espèces d'aréomètres.** — Les aréomètres de Nicholson et de Fahrenheit sont dits à *volume constant et à poids variable*, parce qu'on les fait toujours plonger de la même quantité, en y ajoutant des poids qui varient avec les solides ou les liquides sur lesquels on expérimente. Or on construit aussi des aréomètres à *volume variable et à poids constant*; c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de point d'affleurement fixe et conservent toujours le même poids. Ces instruments, nommés *pèse-sels*, *pèse-acides*, *pèse-liqueurs*, ne sont point destinés à mesurer les poids spécifiques, mais à faire connaître si les dissolutions salines, les acides, les alcools sont plus ou moins concentrés.

110. **Aréomètre de Baumé.** — Baumé, pharmacien à Paris, mort en 1804, a construit un aréomètre à poids constant, dont l'usage est très-répandu. C'est un flotteur de verre, formé d'une tige AB (fig. 80), à laquelle est soudée une boule remplie d'air, et à celle-ci une boule plus petite, pleine de mercure, qui sert de lest.

Il y a deux modes de graduer cet instrument, suivant qu'il doit plonger dans des liquides plus denses que l'eau ou moins denses.

Dans le premier cas, on en règle le poids de manière que, dans l'eau distillée et à 4 degrés, il plonge à peu près jusqu'à l'extrémité supérieure de sa tige, en un point A, où l'on marque zéro. Pour achever la graduation, on fait une dissolution de 85 parties d'eau, en poids, et 15 de sel marin. Cette dissolution étant plus

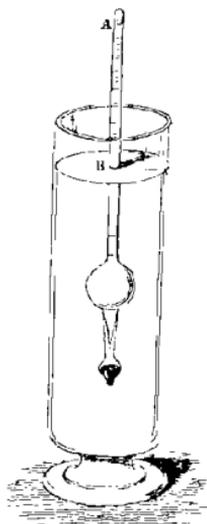


Fig. 80 ($h=26$).

dense que l'eau pure, l'appareil n'y plonge que jusqu'à un point B, où l'on marque 15. Partageant enfin l'intervalle des points A et B en 15 parties égales, et continuant les divisions jusqu'au bas de la tige, l'instrument est gradué. Les divisions sont marquées sur une bande de papier placée dans l'intérieur de la tige.

L'aréomètre ainsi construit ne peut être employé que pour les liquides plus denses que l'eau, tels que les acides et les dissolutions salines; c'est en même temps un pèse-acides et un pèse-sels. Pour les liquides moins denses que l'eau, le zéro devant se trouver au bas de la tige, la graduation est changée. Baumé a pris pour zéro le point d'affleurement dans une dissolution de 90 d'eau distillée, en poids, et de 10 de sel marin, et il a marqué 10 au point d'affleurement dans l'eau distillée. Divisant l'intervalle

de ces deux points en 10 parties égales que l'on continue jusqu'au sommet de la tige, l'appareil est gradué: c'est le pèse-liqueurs.

Les deux aréomètres que nous venons de décrire sont gradués d'une manière tout à fait arbitraire, et n'indiquent ni les densités des liquides ni les quantités de sel dissoutes. Cependant ils sont avantageusement employés pour reconnaître quand une dissolution saline ou acide a été portée à un point de concentration déterminé. En un mot, ils offrent des points de repère à l'aide desquels on reproduit rapidement des mélanges ou des dissolutions dans des proportions données, non pas avec précision, mais avec une approximation suffisante dans un grand nombre de cas. Par exemple, dans la fabrication des sirops ordinaires, on a constaté que le pèse-sels de Baumé doit marquer 35, à froid, dans un sirop bien confectionné. C'est donc là, pour le fabricant, un instrument facile à consulter pour le degré de concentration de son sirop. De même, dans l'eau de mer, à la température de 22 degrés, le pèse-sels de Baumé marque 3, ce qui donne une indication pour les bains salés ordonnés dans certaines affections.

III. Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. — L'alcoomètre de Gay-Lussac est un instrument destiné à mesurer la force des liquides spiritueux, à 15 degrés, c'est-à-dire le nombre de centièmes d'alcool pur, en volume, que contiennent ces liquides à cette température.

La forme de l'alcoomètre est entièrement celle de l'aréomètre de Baumé (fig. 80); mais sa graduation, qui est faite à 15 degrés, est différente. L'échelle placée sur la tige est divisée en 100 parties, dont chacune représente un centième d'alcool en volume; la division 0 correspond à l'eau pure, et la division 100 à l'alcool absolu. Plongé dans un liquide spiritueux à la température de 15 degrés, l'alcoomètre en donne immédiatement la force. Par exemple, si, à 15 degrés, l'alcoomètre s'enfonce dans une eau-de-vie jusqu'à la division 48, cela indique que cette eau-de-vie contient 48 centièmes de son volume d'alcool pur et le reste d'eau; car on sait que les liquides connus dans le commerce sous les noms d'eaux-de-vie et d'esprits sont des mélanges d'eau et d'alcool.

L'échelle de l'alcoomètre se gradue en plongeant successivement cet instrument dans des mélanges d'alcool et d'eau dans des proportions déterminées. Mais pour que la graduation soit exacte, il faut tenir compte de la contraction de volume que subissent l'alcool et l'eau quand on les mélange. Pour cela, on prend une éprouvette à pied, graduée en 100 parties égales, et y ayant versé de l'alcool absolu jusqu'à la division 95, on achève de la remplir jusqu'à 100 avec de l'eau distillée. Ayant ainsi un mélange qui contient en volume 95 pour 100 d'alcool absolu, on y plonge l'instrument, et au point d'affleurement on marque 95. On vide alors l'éprouvette, on y verse 90 d'alcool, et l'on achève encore de remplir jusqu'à 100 avec de l'eau distillée, ce qui donne un mélange contenant 90 pour 100 d'alcool absolu; et ainsi de suite de 5 en 5, en ayant soin de plonger chaque fois l'instrument dans les différents mélanges, et de marquer successivement sur la tige 90, 85, 80.... Divisant enfin les intervalles de 5 en 5, en cinq parties égales, l'instrument est gradué.

Il importe d'observer que, l'alcoomètre étant gradué à 15 degrés, ce n'est qu'à cette température que ses indications sont précises. A des températures plus hautes ou plus basses, les liquides se dilatant ou se contractant, l'alcoomètre s'enfonce plus ou moins, c'est-à-dire que la chaleur altère à la fois et le volume du liquide spiritueux et les indications de l'alcoomètre; de là deux causes d'erreur qui sont de même sens, et qui, réunies, peuvent s'élever à plus de 12 pour 100 de la valeur du liquide, de zéro à 30 degrés. Pour supprimer ces deux causes d'erreur, Gay-Lussac a construit

des tables qui contiennent, dans une colonne verticale, les températures de zéro à 30 degrés, et, dans une colonne horizontale, les degrés de l'alcoomètre de zéro à 100. Puis, de même que dans la table de multiplication ordinaire, au point de rencontre de la verticale abaissée de la case qui contient les degrés alcoométriques avec l'horizontale qui part de la case où sont les degrés du thermomètre, se trouve le nombre qui indique la richesse réelle du liquide spiritueux. Par exemple, un semblable liquide étant à la température de 22 degrés, et l'alcoomètre y marquant 36, on trouve dans la table que la richesse réelle de ce liquide ramené à 15 degrés est 33; c'est-à-dire qu'il contient les 33 centièmes de son volume d'alcool, et, par suite, 67 centièmes d'eau.

L'alcoomètre de Gay-Lussac, plongé dans du vin, n'en donnerait pas la richesse alcoolique, à cause des substances étrangères qu'il renferme; mais si, par une distillation préalable, on sépare de ces substances l'alcool du vin, l'alcoomètre devient applicable. En traitant de la distillation, nous dirons comment on parvient ainsi, à l'aide d'un petit alambic construit par M. Salleron, à déterminer la proportion d'alcool contenue dans un vin donné (370).

112. Pèse-sels gradués sur le principe de l'alcoomètre centésimal. — On construit aussi des pèse-sels gradués sur le principe de l'alcoomètre centésimal; c'est-à-dire qu'ils font connaître la quantité, en poids, de tel ou tel sel contenu dans une dissolution. Le zéro correspondant à l'eau pure, leur graduation se forme en faisant dissoudre 5, 10, 15, 20.... grammes du sel donné dans 95, 90, 85, 80.... grammes d'eau, jusqu'à saturation de la dissolution. Plongeant l'instrument successivement dans ces dissolutions, on marque 5, 10, 15, 20.... aux différents points d'affleurement, et on divise chaque intervalle en 5 parties égales.

Ces instruments offrent cet inconvénient, qu'il faut un pèse-sels spécial pour chaque espèce de sel. Celui qui aurait été gradué pour l'azotate de potasse, par exemple, ne donnerait que des indications complètement fausses dans une dissolution de carbonate de potasse ou de tout autre sel.

On construit sur le même principe des *pèse-lait*, des *pèse-vin*, destinés à mesurer la quantité d'eau que la fraude peut avoir introduite dans ces liquides; mais ces instruments ne présentent pas une utilité réelle, parce que les densités du lait et du vin étant très-variables, même lorsque ces liquides sont parfaitement naturels, on pourrait attribuer à la fraude ce qui serait dû uniquement à la mauvaise qualité naturelle du lait ou du vin. Plusieurs médecins font aussi usage de *pèse-urine*, fondés sur le même principe.

113. Densimètres. — Les *densimètres* sont des aréomètres gradués de manière à faire connaître la densité relative d'un liquide d'après le degré dont ils s'y enfoncent. Nous ne décrirons ici que celui de Gay-Lussac.

Le *densimètre* ou *volumètre* de Gay-Lussac est entièrement semblable à l'aréomètre de Baumé : il n'en diffère que par la graduation, qui varie selon que l'appareil est destiné aux liquides plus denses ou moins denses que l'eau. Dans le premier cas, on le leste de manière que dans l'eau pure il plonge jusqu'en un point A (fig. 81) situé à l'extrémité supérieure de la tige. Choissant ensuite un liquide dont la densité soit connue et plus grande que celle de l'eau dans le rapport de 4 à 3, par exemple, on y plonge l'instrument, qui n'entre plus qu'à un certain point B de la tige. Or si l'on représente par V et v les volumes immergés respectivement dans l'eau et dans le second liquide, ces volumes étant en raison inverse des densités de ces liquides

(99), on a $\frac{V}{v} = \frac{4}{3}$; d'où $v = \frac{3}{4} V$.

Si donc on représente par 100 le volume V, le volume v sera par 75. En conséquence on inscrit respectivement aux points A et B les nombres 100 et 75; le volume AB étant, d'après la valeur de v, le quart de V, on partage la distance AB en 25 parties égales, et chacune de ces parties est $\frac{1}{25}$ de AB, ou $\frac{1}{100}$ de V, c'est-à-dire du volume immergé dans l'eau pure. Enfin, on continue les divisions jusqu'à la partie inférieure de la tige, celle-ci devant être exactement de même diamètre dans toute sa longueur.

Cela posé, pour connaître la densité d'un liquide, de l'acide sulfurique par exemple, il suffit d'y plonger le densimètre, et s'il affleure à la 54^e division, cela indique que le volume du liquide déplacé est représenté par 54, celui du volume d'eau V l'étant par 100. Or, tout corps flottant déplaçant un poids de liquide égal au sien (99), le volume d'eau V ou 100, et le volume d'acide sulfurique 54, ont le même poids, celui de l'instrument; mais, à poids égal, les volumes de deux corps sont en raison inverse de leurs densités; donc, si l'on représente par x la densité de l'acide sulfurique, celle de l'eau étant 1, on a

$$\frac{x}{1} = \frac{100}{54}, \text{ d'où } x = \frac{100}{54} = 1,85.$$

Si le densimètre est destiné à des liquides moins denses que l'eau, il faut le lester de manière que le point 100, correspondant à l'eau distillée, se trouve à la partie inférieure de la tige. On fixe ensuite à l'extrémité supérieure de celle-ci un poids qui soit le quart de celui de l'instrument. Or le poids de l'instrument, lorsqu'il était seul, ayant été représenté par 100, son poids total actuel est 125. On inscrit donc ce dernier nombre en regard du nouveau point d'affleurement, puis on divise l'intervalle des points 100 et 125 en 25 parties égales, que l'on continue jusqu'au sommet de la tige.

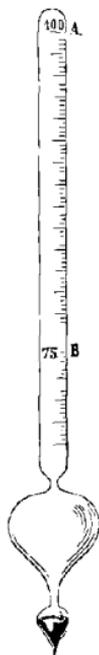


Fig. 81.

* CHAPITRE II

CAPILLARITÉ

114. Phénomènes capillaires. — Il se produit, au contact des solides et des liquides, une série de phénomènes auxquels on a donné le nom de *phénomènes capillaires*, parce qu'ils s'observent surtout dans les tubes d'un diamètre assez petit pour être comparable à celui d'un cheveu. La partie de la physique qui a

pour objet l'étude des phénomènes capillaires se désigne sous le nom de *capillarité*, expression qui s'applique aussi à la force qui produit ces phénomènes.

Les effets de la capillarité sont très-variés; mais, dans tous les cas, ils sont dus à l'attraction mutuelle des molécules liquides entre elles, et à celle qui s'exerce entre ces molécules et les corps solides. Tels sont les phénomènes suivants :

Lorsqu'on plonge un corps dans un liquide qui soit de nature à le mouiller, le liquide, comme s'il n'était plus soumis aux lois de l'hydrostatique, est soulevé autour du corps solide, et sa surface, cessant d'être horizontale, prend une forme concave (fig. 82).

Si, au contraire, le corps plongé n'est pas mouillé par le liquide, ce qui a

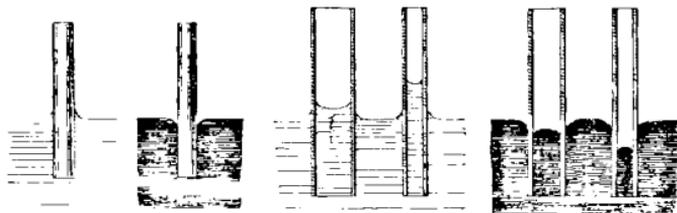


Fig. 82.

Fig. 83.

Fig. 84.

Fig. 85.

lieu pour le verre en contact avec le mercure, le liquide, au lieu de s'élever, se déprime, et sa surface prend une forme convexe autour du corps plongé, comme le montre la fig. 83. La surface du liquide affecte la même concavité ou convexité sur les bords du vase qui le contient, suivant qu'il en mouille ou n'en mouille pas les parois.

Ces phénomènes deviennent plus apparents lorsque, au lieu d'une masse pleine, on plonge dans le liquide des tubes de verre creux d'un petit diamètre. Selon que ces tubes sont ou ne sont pas mouillés par le liquide, il se produit une ascension ou une dépression d'autant plus grandes, que le diamètre est plus petit (fig. 84 et 85).

Lorsque les tubes sont mouillés par le liquide, la surface de celui-ci prend la forme d'un segment hémisphérique concave qu'on nomme *ménisque concave* (fig. 84); s'ils ne sont pas mouillés, on a un *ménisque convexe* (fig. 85).

115. Lois de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires. — Lorsque les parois des tubes sont d'avance mouillées par un liquide, Gay-Lussac a vérifié par l'expérience les deux lois suivantes :

1^o *L'ascension varie avec la nature du liquide et avec la température, mais elle est indépendante de la substance des tubes et de l'épaisseur de leurs parois.*

2^o *Pour un même liquide, l'ascension est en raison inverse du diamètre du tube, tant que ce diamètre ne dépasse pas 2 millimètres.*

Cette seconde loi est connue sous le nom de *loi de Jurin*, du nom de celui qui, le premier, l'a fait connaître.

Toutes ces lois se vérifient dans le vide comme dans l'air; mais Wolf a fait voir que, lorsque la température augmente, l'ascension de l'eau dans les tubes diminue, et peut même devenir nulle ou se changer en dépression.

116. Lois de la dépression dans les tubes capillaires. — Pour les liquides qui ne mouillent pas les tubes, comme le mercure dans le verre, la dépression est encore en raison inverse du diamètre des tubes, mais pour des tubes de même diamètre, cette dépression varie avec la nature des tubes. Par exemple, tandis que, dans un tube de fer de 1 millimètre de diamètre, la dépression est 1^{mm},226, dans un tube de platine de même diamètre elle n'est que de 0^{mm},635. La dépression dépend encore de la hauteur du ménisque convexe du mercure, hauteur qui varie, à diamètre égal, avec la pureté du mercure, et suivant que

le ménisque s'est formé pendant le mouvement ascendant ou descendant de la colonne mercurielle. Il est plus haut dans le premier cas que dans le second.

117. Lois de l'ascension et de la dépression entre deux lames parallèles ou inclinées. — Des phénomènes analogues à ceux que présentent les tubes capillaires se produisent entre deux corps de forme quelconque plongés dans un liquide, lorsqu'ils sont suffisamment rapprochés. Par exemple, si l'on plonge dans l'eau deux lames de verre parallèles, assez peu distantes pour que les deux courbures formées à leur contact par le liquide viennent se joindre, on

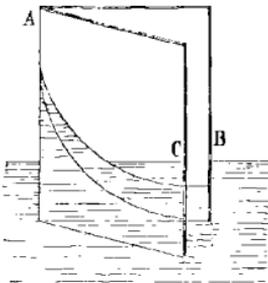


Fig. 86.



Fig. 87.



Fig. 88.

observe : 1^o que l'eau s'élève régulièrement entre les deux lames, en raison inverse de l'intervalle qui les sépare ; 2^o que la hauteur de l'ascension, pour un intervalle donné, est la moitié de celle qui aurait lieu dans un tube dont le diamètre serait égal à cet intervalle.

Si les lames parallèles plongent dans le mercure, il y a dépression, mais suivant les mêmes lois.

Deux lames de verre AB et AC étant inclinées entre elles (fig. 86), si on les plonge dans un liquide qui les mouille, de manière que leur ligne de contact soit verticale, le liquide s'élève au sommet de l'angle des deux lames, et sa surface, du point le plus haut au point le plus bas, affecte la forme de la courbe connue en géométrie sous le nom d'*hyperbole équilatère*.

Lorsque la ligne de contact des deux lames est horizontale, comme cela aurait lieu dans les lames des figures 87 et 88, si on les prolongeait, et lorsqu'en même temps l'angle qu'elles forment est très-petit, une goutte d'eau placée entre elles s'arrondit à ses deux extrémités en ménisque concave (fig. 87), et se précipite vers le sommet de l'angle. Si, au contraire, le liquide ne mouille pas les lames, comme avec le mercure, la goutte s'arrondit en se terminant en ménisque convexe (fig. 88) et elle s'éloigne du sommet de l'angle.

118. Attractions et répulsions qui résultent de la capillarité. — C'est à la capillarité que sont dues les attractions et les répulsions qu'on observe entre les corps qui flottent à la surface des liquides ; attractions et répulsions qui sont soumises aux lois suivantes :

Lorsque deux corps flottants sont mouillés tous les deux par le liquide, par exemple deux balles de liège dans l'eau, il se produit une forte attraction, aussitôt que les deux balles sont assez rapprochées pour qu'il n'existe plus entre elles de surface plane.

Si les corps ne sont mouillés ni l'un ni l'autre, comme deux balles de cire sur l'eau, on observe encore une vive attraction aussitôt que celles-ci sont placées dans la même condition que ci-dessus.

Enfin si, des deux corps flottants, l'un est mouillé par le liquide et que l'autre ne le soit pas, comme une balle de liège et une balle de cire dans l'eau, on voit les deux balles se repousser au moment où elles sont suffisamment rapprochées pour que les deux courbures contraires du liquide se trouvent en contact.

Tous les phénomènes qui viennent d'être décrits dépendant de la courbure concave ou convexe que prend la surface du liquide au contact des corps, il nous reste à faire connaître la cause qui détermine la forme de cette courbure.

119. **Cause de la courbure des surfaces liquides au contact des solides.** — La forme de la surface d'un liquide au contact d'un corps solide provient du rapport qui existe entre l'attraction du solide sur le liquide, et l'attraction du liquide sur lui-même.

En effet, soit une molécule liquide m (fig. 89) en contact avec un corps solide.

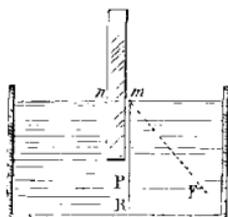


Fig. 89.

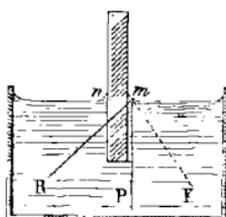


Fig. 90.

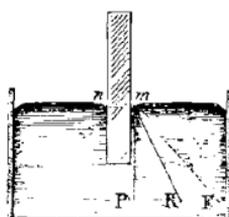


Fig. 91.

Cette molécule est soumise à trois forces : la pesanteur, qui la sollicite suivant la verticale mP ; l'attraction du liquide, qui agit dans une direction mF ; et l'attraction du corps, qui s'exerce dans la direction mn . Or, selon les intensités respectives de ces forces, leur résultante peut prendre les trois positions suivantes :

1^o Cette résultante est dirigée suivant la verticale mR (fig. 89) ; alors la surface en m est plane et horizontale, car, d'après les conditions d'équilibre des liquides (88), leur surface doit être perpendiculaire à la force qui les sollicite.

2^o La force n augmentant, ou F diminuant, la résultante R est dirigée dans l'angle nmP (fig. 90) ; dans ce cas, la surface prend une direction inclinée perpendiculaire à mR , et elle est concave.

3^o La force F augmentant ou n diminuant, la résultante R prend la direction mR (fig. 91), dans l'angle PmF , et la surface, se disposant perpendiculairement à cette direction, devient convexe.

Le calcul montre que, dans le premier cas, l'attraction du liquide sur lui-même est double de celle du solide sur le liquide ; dans le second cas, l'attraction du liquide est plus petite que le double de celle du solide ; dans le troisième, elle est plus grande.

120. **Influence de la courbure du ménisque sur les phénomènes capillaires.** — C'est de la forme concave ou convexe du ménisque que dépend l'ascension ou la dépression d'un liquide dans un tube capillaire. En effet, si l'on considère un ménisque concave $abcd$ (fig. 92), les molécules liquides de ce ménisque étant soutenues en équilibre par les forces qui les sollicitent (119), elles n'exercent aucune pression sur les couches inférieures ; de plus, elles agissent, en vertu de l'attraction moléculaire, sur les couches inférieures les plus voisines ; d'où il résulte que, sur une couche quelconque mn , considérée dans l'intérieur du tube, la pression est moindre que s'il n'y avait point de ménisque. Par conséquent, d'après les conditions d'équilibre des liquides (89), le liquide doit s'élever dans le tube jusqu'à ce que la pression intérieure sur la couche mn soit égale à la pression op , qui s'exerce extérieurement sur un point quelconque p de la même couche.

Dans le cas où le ménisque est convexe (fig. 93), l'équilibre existe encore, en vertu des forces moléculaires qui sollicitent le liquide ; mais les molécules qui occuperaient l'espace $ghik$, s'il n'y avait pas d'action capillaire, étant supprimées, n'agissent plus par attraction sur les molécules inférieures. Il résulte de là que la pression sur une tranche quelconque mn , est plus grande, dans

l'intérieur du tube, que si l'espace $ghik$ était rempli; car les forces moléculaires dont il s'agit sont beaucoup plus intenses que la pesanteur. Le liquide doit donc s'abaisser dans le tube jusqu'à ce que la pression intérieure sur la tranche mn soit la même qu'en un point quelconqué p de cette tranche.

La théorie de la capillarité, de plus difficiles de la physique, ne peut être traitée d'une manière complète que par l'analyse mathématique; aussi a-t-elle été étudiée surtout par les mathématiciens, et particulièrement, en France,

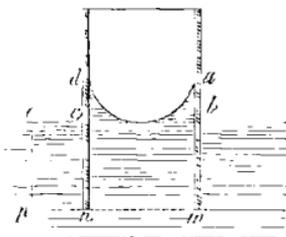


Fig. 92.

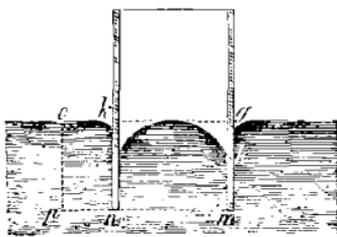


Fig. 93.

par Cléaut, Laplace, Poisson et M. Quet. Telle que nous venons de la faire connaître, cette théorie rend compte de l'ascension et de la dépression des liquides non-seulement dans les tubes, mais encore entre les lames parallèles ou inclinées (117). Elle explique également les attractions et les répulsions qu'on observe entre les corps flottants (118).

121. Faits divers dépendant de la capillarité. — Au nombre des phénomènes qui ont pour cause la capillarité, nous citerons les suivants :

Lorsqu'un tube capillaire est plongé dans un liquide qui le mouille, si on l'en retire avec précaution, on observe que la colonne liquide qui reste suspendue dans le tube est plus grande que l'ascension qui avait lieu lorsque ce tube plongeait. Ceci résulte de ce que le tube entraîne avec lui une goutte liquide qui adhère à sa partie inférieure, et y forme un ménisque convexe dont l'action concourt avec celle du ménisque concave supérieur pour soutenir une colonne plus grande (120).

C'est par la même raison qu'un tube capillaire plongé dans un liquide n'y donne lieu à aucun écoulement, quoique plus court que la colonne liquide qui tend à s'élever dans ce tube. Cela provient de ce qu'à l'instant où le liquide atteint le haut du tube, sa surface supérieure, de concave qu'elle était, devient convexe, et, par conséquent, la pression devenant plus grande que si sa surface était plane, le mouvement ascensionnel s'arrête.

On voit souvent des insectes se maintenir à la surface de l'eau sans s'y enfoncer. C'est là un phénomène capillaire qui résulte de ce que leurs pattes étant recouvertes d'une matière onctueuse qui les empêche de se mouiller, il se produit autour d'elles une dépression qui soutient ces insectes malgré leur poids, de même que l'eau est soutenue dans les tubes. C'est par une dépression semblable qu'une aiguille fine à coudre, posée doucement sur l'eau, reste à la surface quand elle est enduite d'une matière grasse, parce qu'alors elle n'est pas mouillée; mais si elle a été lavée dans l'alcool ou la potasse, elle va au fond.

C'est encore par un effet capillaire que l'huile s'élève dans les mèches des lampes, et qu'il y a pénétration des liquides dans les bois, dans les éponges, et dans tous les corps qui possèdent des pores sensibles (16). Enfin, sous les noms d'endosmose, d'absorption et d'imbibition, nous allons faire connaître de nouveaux phénomènes qui ont une grande analogie avec la capillarité.

* CHAPITRE III

DIFFUSION, OSMOSE, ABSORPTION ET DIALYSE DES LIQUIDES

122. Diffusion des liquides. — On nomme *diffusion* le mélange spontané de deux liquides, de nature ou de concentration différentes, et sans action chimique l'un sur l'autre. La diffusion des liquides a été observée, dès le siècle dernier, par Priestley et autres physiciens; mais ce n'est qu'en 1854 que Graham, à Londres, a étudié avec soin ce genre de phénomènes.

L'appareil dont a fait usage ce savant consiste en un petit bocal A (fig. 94), à large goulot, de 0^m,11 de capacité. Ce bocal étant rempli de la dissolution qu'on veut faire diffuser, par exemple, une dissolution saline, on le recouvre d'un obturateur de verre, puis on le plonge dans un récipient de 1 litre de capacité environ, qu'on remplit d'eau distillée jusqu'à ce qu'elle s'élève de 2 à 3 centimètres

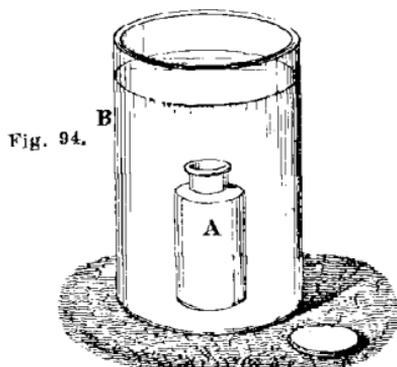


Fig. 94.

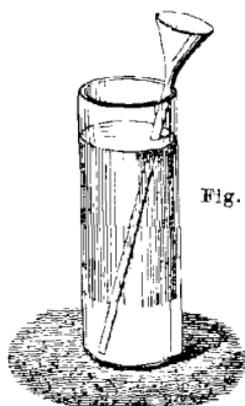


Fig. 95.

au-dessus du bocal A. On enlève ensuite avec précaution l'obturateur, et on laisse le tout au repos, à une température constante, pendant plusieurs jours. Or, remettant l'obturateur et retirant le bocal A, on trouve, en évaporant l'eau du récipient, qu'elle laisse pour résidu une grande partie du sel qui était en dissolution dans le bocal; ce qui fait voir qu'il y a eu diffusion de celui-ci vers l'eau du récipient B.

On fait encore l'expérience suivante : on remplit aux trois quarts une haute éprouvette de verre de teinture de tournesol étendue (fig. 95) ; puis, avec un entonnoir à long col, on fait arriver lentement de l'acide sulfurique à la partie inférieure. On voit alors la teinture de tournesol passer graduellement au rouge de bas en haut, et au bout de 48 heures toute la liqueur est rouge. Il y a donc diffusion de l'acide vers le liquide supérieur.

123. Lois de la diffusibilité des liquides. — Graham a constaté par l'expérience les lois suivantes sur la diffusibilité des liquides :

1^o *En temps égal, la diffusibilité varie d'un liquide à l'autre.* Le liquide le plus diffusible est l'acide chlorhydrique. L'albumine, qui est un des liquides les moins diffusibles, se diffuse 49 fois plus lentement que l'acide chlorhydrique. La faible diffusibilité de l'albumine joue nécessairement un rôle important dans l'économie animale.

2 Avec des dissolutions d'un même sel, la diffusibilité est proportionnelle à la quantité de sel en dissolution; elle augmente avec la température.

3° Deux liquides, ne réagissant pas chimiquement l'un sur l'autre et inégalement diffusibles, se séparent en partie lorsqu'on les mélange dans un bocal à diffusion (fig. 94), le plus diffusible se dégageant le premier.

124. **Osmose, endosmose et exosmose.** — On donne le nom d'*osmose* (impulsion) à la diffusion entre deux liquides séparés par une membrane organique, ou par un diaphragme inorganique percé. C'est Dutrochet, en France, qui le premier, en 1826, fit connaître avec détail ce phénomène jusqu'alors fort peu étudié.

L'appareil qui a servi à Dutrochet dans ses recherches a été nommé par lui *endosmomètre*; il consiste en une poche membraneuse surmontée d'un tube de verre un peu long, autour duquel elle adhère hermétiquement au moyen d'une ligature (fig. 96). Cette poche étant remplie d'une dissolution fortement gommée, ou d'un autre liquide plus dense que l'eau, comme le lait, l'albumine, une dissolution de sucre, on la plonge dans un vase rempli d'eau. Bientôt on remarque que le niveau s'élève peu à peu dans le tube, à une hauteur qui peut atteindre plusieurs décimètres, et qu'il s'abaisse dans le vase où plonge l'endosmomètre; d'où il faut conclure qu'une partie de l'eau pure a passé à travers la membrane pour aller se mélanger au liquide intérieur. On constate, de plus, qu'au bout d'un certain temps, l'eau dans laquelle plonge l'endosmomètre contient de la gomme. Il s'est donc produit un courant dans les deux sens. On lit alors qu'il y a *endosmose* pour le li-

quide dont le volume augmente, et *exosmose* pour celui dont le volume diminue. Si l'on met l'eau pure dans la poche membraneuse, et si l'on plonge celle-ci dans l'eau gommée, l'endosmose se produit encore de l'eau pure vers l'eau gommée, c'est-à-dire que c'est à l'extérieur que le niveau s'élève.

La hauteur d'ascension dans l'endosmomètre varie avec les différents liquides. De toutes les substances végétales, le sucre dissous est celle qui, à densité égale, présente le plus grand pouvoir d'endosmose; de toutes les substances animales c'est l'albumine. La gélatine, au contraire, ne possède qu'une force d'endosmose très-faible. C'est en général vers le liquide le plus dense que se dirige le courant d'endosmose. Toutefois l'alcool et l'éther font exception, ces liquides se comportant, par rapport à l'eau, comme des liquides plus denses. Avec les acides, suivant qu'ils sont plus ou moins étendus, il y a *endosmose* de l'eau vers l'acide ou de l'acide vers l'eau.

Dutrochet a constaté que, pour que les phénomènes d'endosmose se produisent, il faut 1° que les liquides soient hétérogènes et susceptibles de se mélanger, comme l'eau et l'alcool, par exemple, tandis qu'avec l'eau et l'huile il n'y a rien; 2° que les deux liquides soient de densités différentes; 3° que la cloison qui sépare les liquides soit perméable au moins à l'un d'eux.

Toutes les substances végétales et animales sont perméables; quant aux sub-

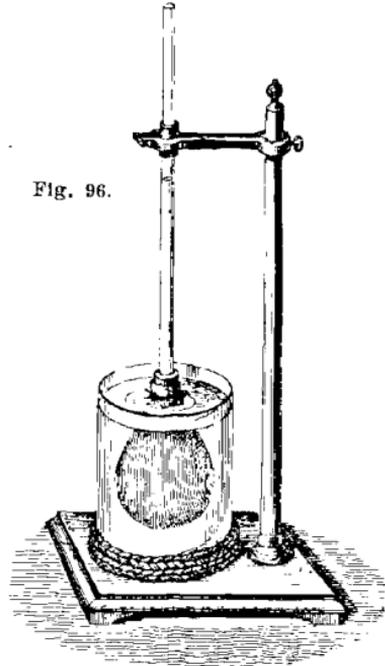


Fig. 96.

stances inorganiques, comme les ardoises, les gres, la porcelaine degourdie, la terre de pipe peu cuite, elles sont d'autant moins perméables qu'elles contiennent plus de silice. La terre de pipe, qui est plus aluminieuse que la porcelaine, est plus perméable ; c'est ce qui fait qu'elle happe à la langue.

A travers les lames minces inorganiques, le courant est faible, mais peut se continuer indéfiniment. Les membranes organiques, au contraire, se desorganisent promptement, et l'endosmose cesse.

On a proposé plusieurs théories de l'endosmose. Les uns l'ont attribuée à un courant électrique de même sens que l'endosmose. D'autres ont admis que la cause du phénomène était une action capillaire jointe à l'affinité des deux liquides. On a admis encore que l'endosmose était due à une inégale viscosité des liquides. Enfin on a attribué ce phénomène à la plus ou moins grande perméabilité des membranes pour tel ou tel liquide. Graham a expliqué les phénomènes d'endosmose et d'exosmose par l'inégale adhésion des deux liquides avec la membrane qui les sépare : celui qui la mouille plus facilement pénètre le premier dans ses pores, la traverse et se diffuse ensuite plus ou moins rapidement de l'autre côté (122).

125. Absorption et imbibition. — Les mots *absorption* et *imbibition*, en physique, sont à peu près synonymes : tous les deux indiquent également une pénétration d'une substance étrangère dans un corps poreux. Toutefois l'absorption se dit indistinctement en parlant des substances liquides ou gazeuses, tandis que l'imbibition s'entend spécialement des liquides.

En physiologie, on distingue l'absorption de l'imbibition. Dans le premier phénomène, il y a pénétration d'une substance étrangère dans les tissus d'un être vivant, tandis que l'imbibition ne se dit que d'une pénétration dans les corps poreux privés de vie, soit organiques, soit inorganiques. En un mot, dans l'absorption, les forces vitales sont mises en jeu ; elles ne le sont pas dans l'imbibition.

126. Phénomènes d'absorption dans les plantes. — Dans le règne végétal, l'absorption se fait par toutes les parties des plantes, mais surtout par les chevelus qui terminent les racines, et par les feuilles. C'est par ces organes que sont absorbés, à l'état d'eau, d'acide carbonique et d'ammoniaque, l'oxygène, l'hydrogène, le carbone et l'azote nécessaires à la nutrition des végétaux.

Les liquides et les sels qu'ils tiennent en dissolution sont d'abord absorbés par les radicelles, par un double phénomène d'endosmose et de capillarité ; puis la sève, élaborée par le végétal, augmentant de densité vers les parties supérieures, c'est encore un phénomène d'endosmose qui lui donne une direction ascendante. Enfin, l'ascension de la sève est, en outre, favorisée par le vide qui tend à se produire dans les parties élevées de la plante par l'effet de l'exhalation par les feuilles. Quant à l'action capillaire, elle ne peut élever les liquides que dans les cellules inférieures, et ne peut produire de courant.

Le docteur Boucherie, à Bordeaux, a fait une heureuse application de la propriété absorbante des végétaux à l'introduction, dans le tissu des bois, de sels dont les uns leur donnent des couleurs plus ou moins vives, et dont les autres augmentent leur souplesse et leur ténacité, ou les rendent moins combustibles.

127. Phénomènes d'absorption chez les animaux. — Chez les animaux inférieurs, dont les tissus ne sont formés que de cellules, tout se passe, comme dans les végétaux, par imbibition et par endosmose. L'imbibition par laquelle quelques-uns de ces animaux se nourrissent est une véritable endosmose.

Chez les animaux supérieurs il y a absorption. Par exemple, la garance, prise intérieurement, pénètre les os et les colore en rouge. De même, si un liquide est en contact avec une surface cutanée, dénudée de son épiderme, ou avec une membrane muqueuse, ces surfaces étant très-vasculaires, le liquide passe dans les vaisseaux par un effet d'endosmose, ce qui constitue l'absorption.

Plus une substance est liquide, plus elle est facilement absorbée. Toutefois, pour qu'il y ait absorption des liquides, il est nécessaire qu'ils mouillent les

membranes. En effet, les graisses, qui ne les mouillent pas, ne sont pas absorbées; mais M. Cl. Bernard a reconnu qu'elles le sont facilement, étant émulsionnées par le suc pancréatique. Le docteur Loze a observé qu'en émulsionnant de la même manière l'huile de foie de morue, ce médicament acquiert plus d'énergie, ce qui provient de ce qu'il est plus absorbé. L'absorption est favorisée, ainsi que l'endosmose, par la chaleur; elle l'est encore par la déplétion. Après une transpiration abondante ou une saignée, elle augmente.

128. **Dialyse.** — La *dialyse* (séparation à travers) est une application à l'analyse chimique de l'inégale diffusion des liquides à travers les membranes. Graham, qui a fait connaître la dialyse en 1861, divise à ce sujet les différentes substances en deux grands groupes : les *crystalloïdes*, corps doués de la propriété de cristalliser (les sels), et les *colloïdes*, corps non cristallisables (la gomme, l'amidon, la dextrine, la gélatine, l'albumine, etc.). Les solutions des crystalloïdes sont exemptes de viscosité, toujours sapides, et se diffusent facilement à travers les membranes et les cloisons poreuses; les colloïdes, au contraire, sont visqueux, insipides et ont peu de tendance à la diffusion.

L'appareil de Graham pour la dialyse est un endosmomètre modifié auquel

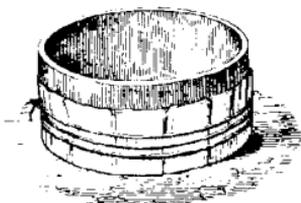


Fig. 97.

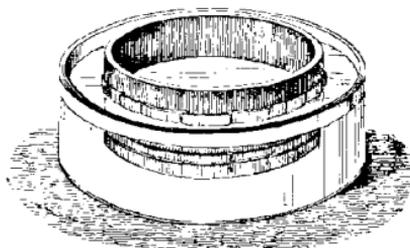


Fig. 98.

il a donné le nom de *dialyseur*. Il se compose d'une lame de gutta-percha enroulée en un cylindre de 25 centimètres de diamètre, de 5 de hauteur, et fermé à sa base par une membrane, de manière à former une sorte de tamis.

La substance que Graham préfère comme membrane dialytique est le *papier-parchemin*; on sait qu'on nomme ainsi du papier non collé qu'on a soumis à une courte immersion dans l'acide sulfurique. Ce papier s'hydrate, s'allonge et devient translucide. Comme il est encore très-poreux, il est bon de l'enduire d'une légère couche d'albumine qu'on fait coaguler par la chaleur. Ce papier étant mouillé, on l'applique sur le cylindre de gutta dont nous avons parlé ci-dessus et on le fixe par une ligature (fig. 97).

Le dialyseur ainsi préparé, on y verse le liquide qu'on veut analyser sur une épaisseur de 12 millimètres au plus, puis on le met flotter dans un vase plus grand contenant une quantité d'eau distillée suffisante pour que la diffusion puisse se produire complètement à travers le papier-parchemin, environ de 4 à 10 fois le volume du mélange qui est dans le dialyseur (fig. 98). Le crystalloïde contenu dans celui-ci se sépare alors à peu près complètement, au bout de 24 à 48 heures, des matières auxquelles il est mélangé. Par exemple, l'acide arsénieux, qui est très-diffusible, étant mélangé avec des matières organiques, s'en sépare très-facilement, et, en réduisant le liquide extérieur par évaporation, on obtient l'acide arsénieux presque exempt de matières étrangères, et assez concentré pour donner un précipité jaune avec l'acide sulfhydrique. Règle générale, les crystalloïdes se séparent très-facilement des colloïdes.

La dialyse a reçu d'importantes applications en pharmacie et en chimie industrielle; M. Dubrunfaut l'a appliquée à l'épuration des mélasses un an avant que les travaux de Graham fussent publiés.

LIVRE IV

DES GAZ

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES GAZ, ATMOSPHÈRE, BAROMÈTRES

129. **Caractères physiques des gaz.** — Les *gaz*, ou *fluides aëri-formes*, sont des corps dont les molécules possèdent une mobilité parfaite, et sont dans un état constant de répulsion qu'on désigne sous les noms d'*expansibilité*, de *tension* ou de *force élastique*; d'où les gaz prennent eux-mêmes le nom de *fluides élastiques*.

On divise les fluides élastiques en *gaz permanents*, ou *gaz* proprement dits, et en *gaz non permanents*, ou *vapeurs*. Les premiers persistent à l'état aëri-forme, à quelque pression et à quelque abaissement de température qu'on les soumette; ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone et le gaz des marais. Les gaz non permanents, au contraire, passent plus ou moins facilement à l'état liquide, soit par un excès de pression, soit par le refroidissement. Toutefois cette distinction n'est pas rigoureuse; car un grand nombre de gaz qu'on regardait comme permanents ont été liquéfiés par Faraday et autres physiciens, et l'on doit admettre que ceux qui jusqu'ici n'ont pu être liquéfiés, le seraient si on les soumettait à une pression et à un froid suffisants. C'est pourquoi l'on donne, en général, le nom de *gaz* aux corps qui, dans les conditions habituelles de température et de pression, ne se présentent qu'à l'état aëri-forme, tandis qu'on entend par *vapeur* l'état aëri-forme que prennent, sous l'influence de la chaleur, les corps qui, comme l'eau, l'alcool, l'éther, sont liquides aux pressions et aux températures ordinaires.

Les gaz connus en chimie sont au nombre de trente-quatre, dont quatre sont simples : ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le chlore; sept seulement se rencontrent libres dans la nature, savoir : l'oxygène, l'azote, l'acide carbonique, le protocarbure et le bicarbure d'hydrogène, l'ammoniaque et l'acide sulfureux. Les autres ne s'obtiennent que par des réactions chimiques.

130. **Théorie dynamique des gaz.** — Dans la théorie dynamique

(8), on admet que les molécules des gaz sont parfaitement élastiques et douées, dans toutes les directions, d'un mouvement primordial extrêmement rapide, en vertu duquel elles tendent à se disperser indéfiniment dans l'espace. La vitesse de ce mouvement a été évaluée, pour l'hydrogène, à 1800 mètres par seconde. Toutefois, en vase clos et même dans l'air, ce nombre ne représente pas la vitesse de translation des molécules dans l'espace. En effet, par leurs chocs mutuels, elles sont successivement réfléchies dans une foule de directions, ce qui retarde la diffusion (163); mais, à cause de leur élasticité parfaite, leur quantité de mouvement reste la même. De là, sous un volume donné, une force élastique, ou tension, proportionnelle à la force vive, c'est-à-dire au produit de la masse totale des molécules par le carré de leur vitesse (37).

131. **Force expansive des gaz.** — La force expansive des gaz, c'est-à-dire leur tendance à prendre toujours un volume plus grand, se démontre par l'expérience suivante. On place, sous le récipient de la machine pneumatique, une vessie à robinet qui contient une petite quantité d'air, et qu'on a eu soin de mouiller pour la rendre plus flexible. Il y a d'abord équilibre entre la force élastique de l'air qui est sous le récipient et celle de l'air renfermé dans la vessie; mais aussitôt que l'on commence à faire le vide, la pression qui s'exerce sur la vessie s'affaiblit, et celle-ci se gonfle de plus en plus, comme si l'on soufflait dedans (fig. 99); ce qui prouve la force élastique du gaz

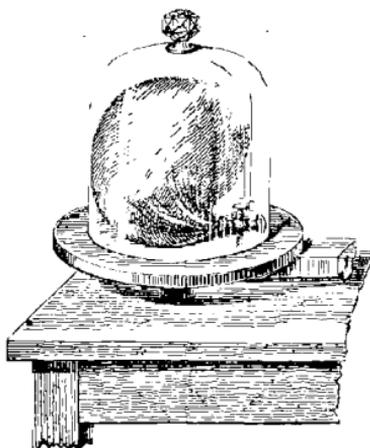


Fig. 99.

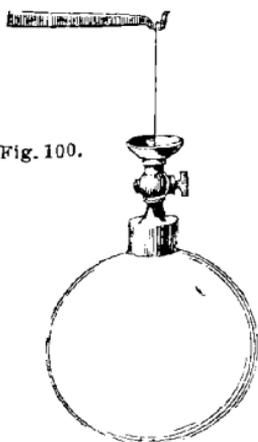
qu'elle contient. Lorsqu'on fait ensuite rentrer l'air extérieur au moyen d'un robinet destiné à cet usage, on voit la vessie, comprimée par le gaz rentrant, reprendre son volume primitif. On constate de la même manière la force expansive de tous les gaz.

Il sera démontré plus tard que la force élastique des gaz est toujours égale et contraire à la pression qu'ils supportent, et qu'à volume égal elle croît avec la température.

132. **Poids des gaz.** — Par leur extrême fluidité, par leur expansibilité surtout, les gaz semblent devoir échapper aux lois de la pesanteur; mais ces fluides si subtils obéissent à cette force,

de même que les solides et les liquides. Pour le constater, on suspend au fléau d'une balance très-sensible un ballon de verre de 3 à 4 litres, dont le col est garni d'un robinet fermant hermétiquement (fig. 100). On pèse d'abord ce ballon plein d'air; puis, après y avoir fait le vide au moyen de la machine pneumatique, on le pèse de nouveau et l'on trouve que la seconde pesée est de plusieurs grammes plus faible que la première, ce qui fait connaître le poids de l'air retiré du ballon.

Fig. 100.



On trouve par ce procédé, en jaugeant d'avance la capacité du ballon en litres, qu'un litre d'air pur, à la température de zéro et sous la pression atmosphérique $0^m,76$ (142), pèse $1^sr,293$, ou approximativement $1^sr,3$. Un litre d'hydrogène, qui est le plus léger des gaz, pèse $0^sr,09$, c'est-à-dire environ 14 fois et demie moins que l'air; un litre de gaz iodhydrique, qui est le plus dense des gaz, pèse $5^sr,745$.

133. Densité de l'air par rapport à l'eau. — Un litre d'air pesant $1^sr,293$, et un litre d'eau 1000^sr , si l'on divise le premier poids par le second, on a pour quotient le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau (103, quotient qui est $0,001293$. Ce nombre étant 773 fois plus petit que l'unité, qui est le poids spécifique de l'eau, on en conclut que, à volume égal, l'eau pèse 773 fois plus que l'air, celui-ci étant à la température de zéro et à la pression atmosphérique $0^m,76$, et l'eau à la température de 4 degrés.

Le nombre $0,001293$, qui représente le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, trouve son application dans de nombreux problèmes; il est facile à retenir, puisqu'il se déduit du nombre $1^sr,293$, en reculant la virgule de trois rangs vers la gauche.

134. Pressions exercées par les gaz. — Les gaz exercent sur les molécules de leur masse et sur les parois des vases qui les contiennent des pressions qu'on peut considérer sous deux points de vue : 1° en faisant abstraction de la pesanteur; 2° en tenant compte de l'action de cette force.

En effet, étant donnée une masse gazeuse en équilibre dans un vase, si l'on fait abstraction de son poids pour n'avoir égard qu'à sa force expansive, les pressions dues à cette force se transmettent avec la même intensité sur tous les points des parois et de la masse fluide; car la force répulsive qui s'exerce entre les molécules est la même dans tous les points et agit également dans toutes les

directions, ce qui est une conséquence de l'élasticité et de la fluidité parfaites des gaz. Mais si l'on a égard à l'action de la pesanteur, cette force fait naître des pressions soumises entièrement aux mêmes lois que celles des liquides (82); c'est-à-dire qu'elles croissent proportionnellement à la profondeur et à la densité des gaz; qu'elles sont les mêmes sur une même tranche horizontale, et indépendantes de la forme qu'affecte la masse gazeuse. Donc la force élastique du gaz, qui est, en chaque point, égale et contraire à la pression qu'il supporte, croît avec la profondeur. Pour une petite masse gazeuse, les pressions qui résultent de son poids sont très-faibles et peuvent être négligées; mais pour les grandes masses de gaz, comme l'atmosphère, ces pressions peuvent être considérables, et il importe d'en tenir compte.

135. Principe de Pascal et principe d'Archimède applicables aux gaz. — Puisque les gaz transmettent les pressions suivant les mêmes lois que les liquides, on prévoit qu'ils doivent, comme ceux-ci, être soumis au principe de Pascal, c'est-à-dire transmettre les pressions en tous sens, avec la même intensité, sur les parois des vases qui les contiennent (81). En effet, lorsqu'on comprime un gaz en vase clos, des manomètres fixés en différents points des parois du vase accusent partout la même pression.

Par un raisonnement identique avec celui qui a déjà été fait pour les liquides (96), on reconnaît que le principe d'Archimède est aussi applicable aux gaz; c'est-à-dire que tout corps plongé dans une masse gazeuse y supporte, de bas en haut, une poussée égale au poids du gaz qu'il déplace, principe qui sera bientôt démontré expérimentalement à l'aide du baroscope (173).

136. Transvasement des gaz. —

De même que les liquides, les gaz peuvent être transvasés d'un vase dans un autre. L'expérience réussit très-bien avec l'acide carbonique, qui est beaucoup plus dense que l'air. On commence par remplir une cloche de ce gaz,

en le recueillant sur une cuve à eau; puis, prenant une seconde cloche de même capacité et pleine d'air, on renverse la première cloche au-dessus (fig. 101), et on les tient quelque temps immobiles. En vertu de son excès de densité, l'acide carbonique des-

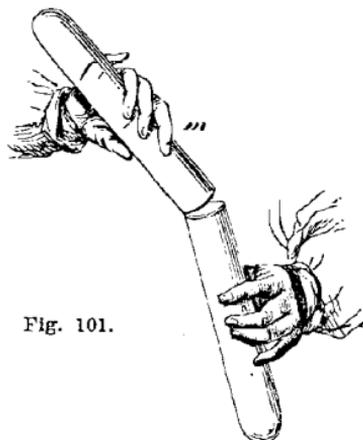


Fig. 101.

cepend lentement de la cloche *m* dans la cloche *n*, dont il chasse l'air; en sorte que bientôt la cloche *n* est pleine d'acide carbonique et la cloche *m* l'est d'air. On le constate en s'appuyant sur la propriété de l'acide carbonique d'éteindre les corps en combustion. En effet, avant l'expérience, une bougie allumée brûle dans la cloche *n* et s'éteint dans l'autre, tandis qu'après l'expérience c'est le contraire qui a lieu.

137. Atmosphère, sa composition. — On donne le nom d'*atmosphère* à la couche d'air qui enveloppe notre globe et est emportée avec lui dans l'espace.

L'air était regardé par les anciens comme un des quatre éléments qu'ils admettaient. La chimie moderne a fait voir qu'il est un mélange d'azote et d'oxygène, dans le rapport, en volume, de 20,80 d'oxygène à 79,20 d'azote. En poids, sa composition est de 23,01 d'oxygène pour 76,99 d'azote.

On trouve aussi, dans l'atmosphère, de la vapeur d'eau, en quantité variable suivant la température, les saisons, les climats et la direction des vents. Enfin, l'air contient de 3 à 6 dix-millièmes de gaz acide carbonique en volume, et des traces d'ammoniaque et d'acide azotique, lequel on observe surtout dans les pluies d'orage.

L'acide carbonique de l'air provient de la respiration des animaux, des combustions et de la décomposition des substances organiques. Malgré cette production permanente d'acide carbonique à la surface du globe, la composition de l'atmosphère ne paraît pas se modifier; cela provient de ce que, dans l'acte de la végétation, les parties vertes des végétaux décomposent l'acide carbonique sous l'influence de la lumière solaire, s'assimilent son carbone, et restituent ainsi à l'atmosphère l'oxygène qui lui est enlevé par la respiration des animaux et par les combustions.

En dosant l'acide carbonique à différentes hauteurs dans l'atmosphère, M. Truchot a constaté récemment, sur le Puy-de-Dôme, que la proportion de ce gaz décroît assez rapidement à mesure qu'on s'élève; ce qui provient de ce que le dégagement du gaz s'opère à la surface du sol.

138. Pression et hauteur de l'atmosphère. — L'air étant pesant, si l'on conçoit l'atmosphère partagée en tranches horizontales, les couches supérieures pressent les couches inférieures, et les compriment. Cette pression décroissant avec le nombre des tranches, l'air est d'autant moins comprimé, et par suite plus raréfié, qu'on s'élève davantage dans l'atmosphère.

En vertu de la force expansive de l'air, il semble que les molécules de l'atmosphère devraient se répandre indéfiniment dans

les espaces planétaires. Mais, par l'effet même de la dilatation, la force expansive de l'air décroît de plus en plus; elle est, en outre, affaiblie par la basse température des hautes régions de l'atmosphère; en sorte qu'il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force expansive des molécules de l'air et l'action de la pesanteur qui les sollicite vers le centre de la terre; d'où l'on conclut que l'atmosphère doit être limitée.

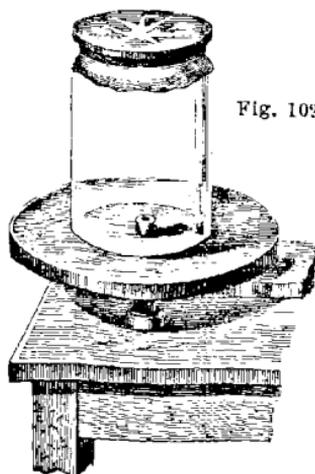
D'après le poids de l'atmosphère, son décroissement de densité et l'observation des phénomènes crépusculaires, on a évalué sa hauteur de 70 à 80 kilomètres. Au delà serait un air extrêmement raréfié, et à 100 kilomètres environ un vide absolu.

D'après les observations faites dans la zone intertropicale sur les arcs crépusculaires et sur la limite de la polarisation atmosphérique, M. Liais trouve que la hauteur de l'atmosphère est de 320 à 340 kilomètres, hauteur qui diffère considérablement de celle admise jusqu'ici. L'observation des hauteurs auxquelles apparaissent les *bolides*, corps errants qui s'enflamment en pénétrant dans l'atmosphère, conduit pour cette dernière à une hauteur voisine de celle assignée par M. Liais.

Puisqu'on a reconnu ci-dessus (132) qu'un litre d'air pèse 1^{er},293, on conçoit que l'ensemble de l'atmosphère doit exercer, à la surface du globe, une pression considérable. On démontre l'existence de cette pression par les expériences suivantes.

139. **Crève-vessie, hémisphères de Magdebourg.** — Le *crève-vessie* consiste en un manchon de verre fermé hermétiquement, à sa partie supérieure, par une membrane de baudruche. L'autre extrémité, dont les bords sont bien dressés et graissés de suif, s'applique sur la platine de la machine pneumatique (fig. 102). Aussitôt qu'on commence à faire le vide dans ce manchon, la membrane se déprime sous la pression atmosphérique qu'elle supporte; et bientôt elle crève avec une vive détonation due à la rentrée subite de l'air.

Les *hémisphères de Magdebourg*, dus à Otto de Guericke, et ainsi nommés de la ville où ils furent inventés, consistent en deux hémisphères creux, de cuivre, de 10 à 12 centimètres de diamètre (fig. 103). Leurs bords sont garnis d'une rondelle annulaire de cuir, enduite de suif, afin de tenir le



vide lorsque ces bords sont en contact. L'un des hémisphères porte un robinet qui se visse sur la machine pneumatique, et l'autre un anneau qui sert de poignée pour le saisir et le tirer. Tant que les hémisphères comprennent entre eux de l'air, on les sépare sans difficulté, car il y a équilibre entre la force expansive de l'air

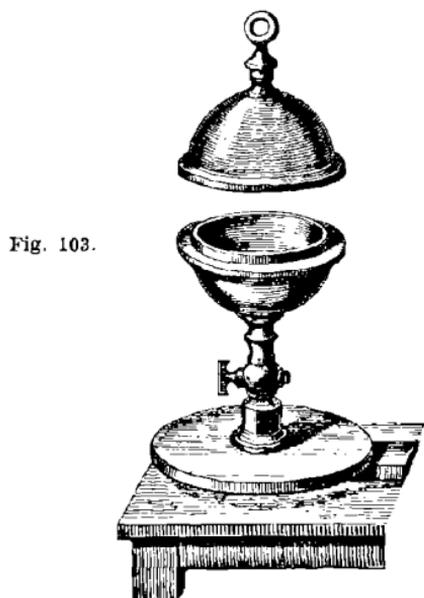


Fig. 103.



Fig. 104.

intérieur et la pression de l'atmosphère ; mais une fois que le vide est fait, on ne peut plus les séparer sans un puissant effort, dans quelque position qu'on tienne l'appareil (fig. 104), ce qui fait voir que la pression atmosphérique s'exerce en tous sens.

MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE ; BAROMÈTRES

140. Expérience de Torricelli. — Les deux expériences précédentes démontrent l'existence de la pression atmosphérique, mais n'en font pas connaître la valeur. La suivante, faite, pour la première fois, en 1643, par Torricelli, disciple de Galilée, donne la mesure exacte du poids de l'atmosphère.

On prend un tube de verre long de 80 centimètres au moins, d'un diamètre intérieur de 6 à 7 millimètres, et fermé à l'une de ses extrémités. Ayant posé ce tube dans une position verticale CD (fig. 105), on le remplit entièrement de mercure ; puis, fermant l'ouverture C avec le pouce, on retourne le tube et on

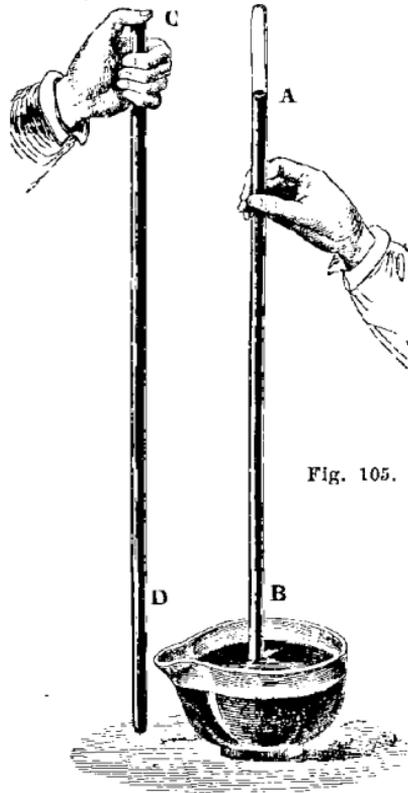
plonge l'extrémité ouverte dans une cuvette pleine de mercure. Retirant alors le doigt, la colonne mercurielle s'abaisse aussitôt de plusieurs centimètres, et conserve une hauteur AB qui, au niveau des mers, est, en moyenne, de 76 centimètres.

C'est alors la pression atmosphérique qui soutient le mercure dans le tube. En effet, le tube et la cuvette représentant deux vases communicants, on sait que l'équilibre ne s'établit qu'autant que la pression est la même sur tous les points d'une même tranche horizontale (89). Or, sur la surface libre du mercure dans la cuvette, c'est la pression atmosphérique qui s'exerce; tandis qu'au même niveau, à l'intérieur du tube, c'est la pression due à la colonne de mercure qui y reste en suspension, et c'est bien uniquement cette pression, puisque le vide s'est formé en A au-dessus du mercure. Mais, puisqu'il y a équilibre, les pressions intérieure et extérieure sont égales; d'où l'on conclut que la pression atmosphérique

équivaut, à surface égale, à celle exercée par une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur.

Si le poids de l'atmosphère augmente ou diminue, il en est de même de la hauteur AB de la colonne de mercure.

141. **Expériences de Pascal.** — Pascal, voulant constater que la force qui soutient le mercure dans le tube de Torricelli est bien la pression de l'atmosphère et non une propriété du mercure, eut recours aux deux expériences suivantes. 1^o Prévoyant que la colonne de mercure devait baisser dans le tube à mesure qu'on s'élève, parce qu'alors la pression diminue, il pria Perrier, habitant l'Auvergne, de répéter sur le Puy-de-Dôme l'expérience de Torricelli. Or la colonne de mercure diminua d'environ 8 centimètres, ce qui démontre que c'est bien le poids de l'atmosphère



qui soutient le mercure dans le tube, puisque, quand ce poids diminue, il en est de même de la colonne de mercure. 2^o Pascal répéta l'expérience de Torricelli, à Rouen, en 1646, avec un autre liquide que le mercure. Il prit un tube de 13 mètres de long, fermé à un bout; il le remplit de vin rouge et le dressa verticalement dans un réservoir plein du même liquide; alors il observa que le liquide s'arrêtait, dans le tube, à une hauteur d'environ 10^m,40, c'est-à-dire 13,6 fois plus grande que celle du mercure; or, le vin rouge étant 13,6 fois moins dense que ce liquide, le poids de la colonne de vin était égal à celui de la colonne de mercure dans l'expérience de Torricelli; donc, dans les deux cas, la pression intérieure était la même et égale à celle de l'atmosphère.

142. Valeur de la pression atmosphérique en kilogrammes. —

La hauteur à laquelle le mercure demeure en équilibre dans le tube de Torricelli fournit le moyen d'évaluer en kilogrammes la pression de l'atmosphère sur une surface donnée. Pour cela, admettons que la section intérieure du tube soit d'un centimètre carré : la colonne de mercure qui est dans le tube ayant alors la forme d'un cylindre d'un centimètre carré de base et de 76 centimètres de hauteur, son volume est de 76 centimètres cubes. Or, 1 centimètre cube d'eau pesant 1 gramme, 1 centimètre cube de mercure doit peser 13^{gr},6, puisque ce liquide est 13,6 fois plus dense que l'eau; d'où l'on conclut que le poids de la colonne de mercure, dans le tube, équivaut à 13^{gr},6 multipliés par 76, c'est-à-dire 1 033 grammes, ou 1 kilogramme et 33 grammes; telle est donc la pression sur un centimètre carré. Par suite, sur un décimètre carré, qui contient 100 centimètres carrés, la pression atmosphérique est de 103^{kg},300^{gr}, et sur un mètre carré, qui renferme 100 décimètres carrés, de 10 330 kilogrammes.

La surface totale du corps humain, chez un sujet de taille et de grosseur ordinaires, étant d'un mètre carré et demi, la pression moyenne que supporte un homme, à la surface de la terre, est de 15 500 kilogrammes. Il semble qu'une pression aussi considérable devrait nous écraser; mais notre corps y résiste par la réaction des fluides élastiques qu'il renferme. Nos membres n'en éprouvent même aucune gêne dans leurs mouvements, parce que, la pression atmosphérique s'exerçant dans toutes les directions, nous supportons en tous sens des pressions égales et contraires qui se font équilibre et sont plus propres à nous soutenir qu'à nous gêner. En effet, les jours où la pression atmosphérique est plus faible, nous éprouvons un malaise qui nous fait dire que *le temps est lourd*; c'est le contraire qu'il faudrait dire.

143. **Différentes espèces de baromètres.** — On nomme *baromètres* des instruments propres à mesurer la pression atmosphérique. Dans les baromètres ordinaires, cette pression est mesurée par la hauteur d'une colonne de mercure dans un tube de verre, comme dans l'expérience de Torricelli : tels sont les baromètres que nous allons décrire, et qui se divisent en *baromètre à cuvette*, *baromètre à siphon* et *baromètre à cadran*. Mais on construit aussi des baromètres sans mercure.

144. **Baromètre à cuvette.** — Le *baromètre à cuvette* se compose d'un tube de verre fermé à son sommet, ayant 85 centimètres environ de longueur, rempli de mercure, et plongeant dans une cuvette pleine de ce métal. Tel est l'appareil déjà décrit sous le nom de *tube de Torricelli* (fig. 105). Le long du

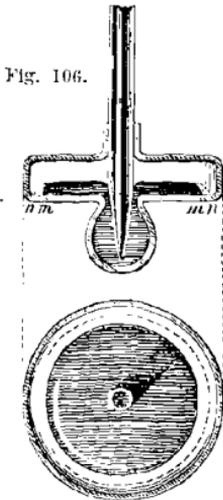


Fig. 106.

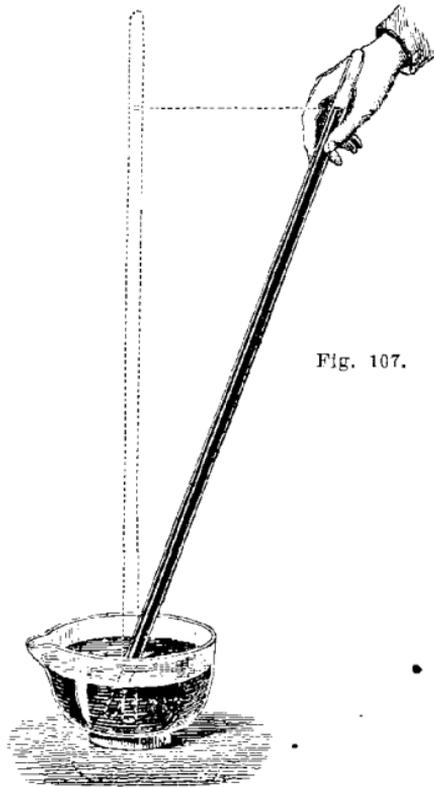


Fig. 107.

tube on adapte une échelle graduée en millimètres, en ayant soin que le zéro de la graduation corresponde au niveau du mercure dans la cuvette. Toutefois ce niveau varie lorsque la pression atmosphérique augmente ou diminue, du mercure passant alors de la cuvette dans le tube ou réciproquement. On atténue cette cause d'erreur en prenant une cuvette qui, tout en contenant peu de mercure, offre une grande surface. La figure 106 représente, en coupe

et en projection, une cuvette de ce genre. Elle est divisée en deux compartiments : l'un, sphérique, est rempli de mercure dans lequel plonge l'extrémité du tube barométrique ; l'autre, cylindrique et à grand diamètre, permet à la surface libre du mercure de s'étaler plus ou moins sur la paroi nn ; si la pression diminue, du mercure passant du tube dans la cuvette, le liquide ne fait alors que s'étaler davantage, par exemple de m en n , mais conserve sensiblement le même niveau. Il en est encore de même lorsqu'une petite quantité de mercure passe de la cuvette dans le tube. Néanmoins on n'obtient pas ainsi un niveau rigoureusement invariable, et ce n'est qu'avec le baromètre à cuvette de Fortin, décrit ci-après, qu'on arrive à des mesures précises.

Quel que soit le baromètre dont on fasse usage, on nomme *hauteur barométrique* la distance *verticale* du niveau du mercure dans la cuvette au niveau dans le tube. C'est pourquoi le baromètre doit toujours être parfaitement vertical ; sinon, le tube étant incliné, la colonne de mercure s'allonge (fig. 107), et le nombre qu'on lit sur l'échelle est trop grand.

Comme on a vu que la pression que le mercure exerce à la base du tube est indépendante de la forme de celui-ci et de son diamètre (84), pourvu qu'il ne soit pas capillaire, la hauteur du baromètre est elle-même indépendante du diamètre du tube et de sa forme droite ou courbe ; mais cette hauteur est en raison inverse de la densité du liquide. Avec le mercure, la hauteur moyenne, au niveau des mers, est de $0^m,76$; dans un baromètre à eau, elle serait de $10^m,33$.

145. Baromètre de Fortin. — Le *baromètre de Fortin*, ainsi appelé du nom de son inventeur, est un baromètre à cuvette ; mais celle-ci diffère de la cuvette du baromètre déjà décrit (144). Le fond en est de peau de chamois, et peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une vis de rappel placée au-dessous, ce qui offre deux avantages : celui de pouvoir obtenir un niveau constant dans la cuvette, et celui de rendre l'instrument plus portatif. En effet, pour le transporter en voyage, il suffit de soulever la peau de chamois jusqu'à ce que, le mercure remontant avec elle, le tube et la cuvette soient complètement remplis ; le baromètre peut alors être incliné et même renversé sans qu'on ait à craindre qu'il y entre de l'air ou que le choc du mercure vienne briser le tube.

La figure 109 représente l'ensemble de ce baromètre, dont le tube est renfermé dans un étui de cuivre destiné à le protéger. Cet étui, fendu à sa partie supérieure, y présente deux fenêtres longitudinales, opposées l'une à l'autre, afin de laisser voir le niveau du mercure en B. Sur l'étui est une échelle en millimètres. Un

curseur A, qu'on fait marcher à la main, donne, au moyen d'un vernier, la hauteur du baromètre à $\frac{1}{10}$ de millimètre. A la partie inférieure de l'étui est la cuvette *b* contenant le mercure O.

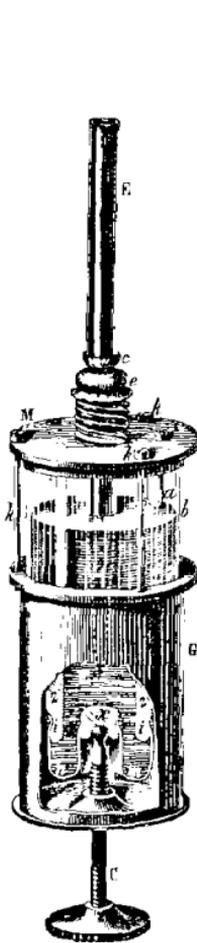


Fig. 108.



Fig. 109.

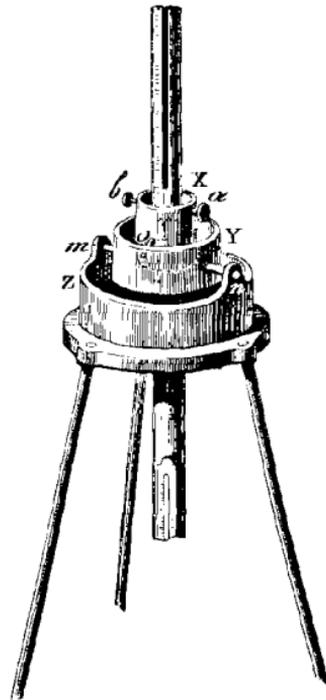


Fig. 110.

La figure 108 montre, sur une plus grande échelle, les détails de la cuvette. Celle-ci est formée d'un cylindre de verre *b* de 4 centimètres de diamètre environ sur 3 de hauteur. Ce cylindre est fermé, à sa partie supérieure, par un disque de bois fixé en dessous d'un couvercle de cuivre M. Au centre du disque et du couvercle passe le tube barométrique E, lequel se termine par

une pointe effilée qui va plonger dans le mercure de la cuvette. Celle-ci et le tube sont reliés ensemble au moyen d'une peau de chamois *ce* que deux fortes ligatures fixent, l'une en *c*, à un étranglement pratiqué sur le tube; l'autre en *e*, à une tubulure de cuivre fixée au centre du couvercle. Cette fermeture suffit pour empêcher la sortie du mercure lorsqu'on renverse le baromètre; mais elle ne s'oppose pas à l'action de la pression atmosphérique, laquelle se transmet très-bien, à travers les pores de la peau de chamois, sur le mercure de la cuvette.

A sa partie inférieure, le cylindre de verre *b* est mastiqué sur un cylindre de buis *zx*, et c'est sur le pourtour de celui-ci, en *zi*, qu'est fortement fixée, à l'aide d'une ligature, la peau de chamois *mn* qui forme le fond de la cuvette. A son centre, cette peau vient s'attacher à un bouton de buis *x*, lequel repose sur l'extrémité d'une vis C. Lorsqu'on tourne celle-ci dans un sens ou dans l'autre, le bouton monte ou descend, et avec lui la peau *mn*. Or le mercure s'élevant ou s'abaissant en même temps, lorsqu'on veut faire une observation, on tourne la vis jusqu'à ce que la surface du liquide atteigne une pointe d'ivoire *a* fixée au couvercle M, et visible à travers le verre. Comme la surface du mercure fait miroir, on y voit l'image renversée de la pointe *a*, et c'est lorsque celle-ci et son image sont tangentes, comme le montre le dessin, qu'on atteint le niveau convenable; car c'est à partir de la pointe *a* qu'est comptée la graduation de l'échelle barométrique. Enfin, un étui de cuivre G enveloppe toute la partie inférieure de la cuvette. Trois boulons à vis *k, k, k*, le relie au couvercle M.

On a vu (144) combien il importe que le tube barométrique soit, pendant les observations, parfaitement vertical. C'est pour obtenir ce résultat qu'on a appliqué au baromètre de Fortin la suspension suivante, connue sous le nom de *suspension de Cardan*, du nom de son inventeur.

L'étui métallique qui renferme le tube est fixé par deux vis de pression *a* et *b* (fig. 110) à un manchon de cuivre X. Celui-ci porte deux tourillons *o*, dont un seul est visible dans la figure, lesquels tournent librement dans deux trous pratiqués dans un anneau Y. Enfin, ce dernier porte lui-même, dans une direction perpendiculaire à celle des tourillons *o, o*, deux tourillons semblables, *m* et *n*, portés par un support Z. Par cette double suspension, le baromètre peut osciller librement dans deux directions rectangulaires autour des axes *oo* et *mn*. Or comme on a soin que le point de croisement de ces deux axes corresponde au tube barométrique même, le centre de gravité du système mobile, toujours plus bas que les axes de suspension, vient se

placer de lui-même au-dessous de leur point de croisement, et le baromètre est alors parfaitement vertical.

146. **Baromètre fixe.** — Pour les observations qui se font au laboratoire, et qui demandent une grande précision, M. Regnault, dans ses travaux sur les gaz et les vapeurs, a fait usage d'un baromètre fixe, dont il mesurait la hauteur avec le cathétomètre (14). Pour cela, la cuvette étant une caisse rectangulaire de fonte, on adapte à sa paroi une pièce portant un écrou *e* (fig. 111). Dans celui-ci passe une vis terminée en pointe à ses deux extrémités, et dont la longueur a été déterminée une fois pour toutes à l'aide du cathétomètre. Cela posé, pour mesurer la hauteur barométrique, on commence par tourner la vis dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que sa pointe affleure avec la surface du mercure dans la cuvette; ce qui a lieu, comme dans le baromètre de Fortin, lorsque la pointe et son image sont en contact. Si l'on mesure alors, avec le cathétomètre, la distance verticale de la pointe *a* de la vis au niveau *b* du mercure dans le tube, et qu'on ajoute à cette distance la longueur de la vis, on a la hauteur barométrique avec une grande précision. Ce baromètre présente en outre l'avantage qu'on peut donner au tube un diamètre intérieur de 2,5 à 3 centimètres, diamètre pour lequel la dépression capillaire n'est plus sensible. Enfin, il ne présente aucune cause d'erreur quant à la position de son échelle, puisque celle-ci est transportée sur le cathétomètre.

147. **Baromètre à siphon de Gay-Lussac.** — Le baromètre à siphon consiste en un tube de verre recourbé en deux branches inégales; la plus grande, qui est fermée à son sommet, est remplie de mercure de même que dans le baromètre à cuvette; la plus petite, qui est ouverte, tient lieu de cuvette. La différence de niveau dans les deux branches est la hauteur du baromètre.

La figure 112 représente le baromètre à siphon tel qu'il a été modifié par Gay-Lussac. Ce physicien, afin de rendre l'instrument plus facile à transporter en voyage, sans que l'air puisse y pénétrer, a réuni les deux branches par un tube capillaire (fig. 113). Lorsqu'on retourne l'instrument, ce tube, en vertu de la capilla-



Fig. 111.

rité, reste toujours plein, et l'air ne peut pénétrer dans la grande branche (fig. 114). Cependant, par un choc trop brusque, la colonne de mercure qui est dans le tube capillaire peut se diviser et laisser passer l'air. Pour obvier à cet inconvénient, Buntén a adopté la modification suivante (fig. 115). Le tube capillaire, au lieu d'être soudé à la grande branche, l'est à un tube B, d'un fort diamètre, dans lequel pénètre cette branche en forme de pointe

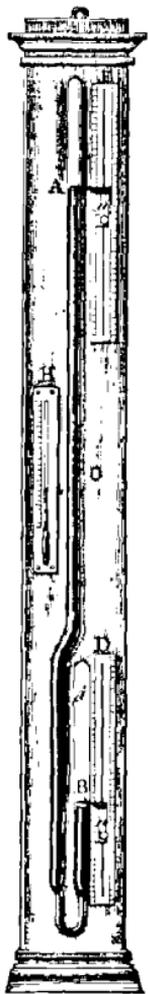


Fig. 112.



Fig. 113.



Fig. 114.



Fig. 115.

effilée. Par cette disposition, s'il passe des bulles d'air dans le tube capillaire, elles ne peuvent s'engager dans la pointe effilée du tube, et viennent se loger à la partie la plus élevée du renflement, comme le montre la figure; là elles ne nuisent en rien à l'instrument, puisque le vide existe toujours au sommet.

Dans le baromètre de Gay-Lussac, la courte branche est fermée

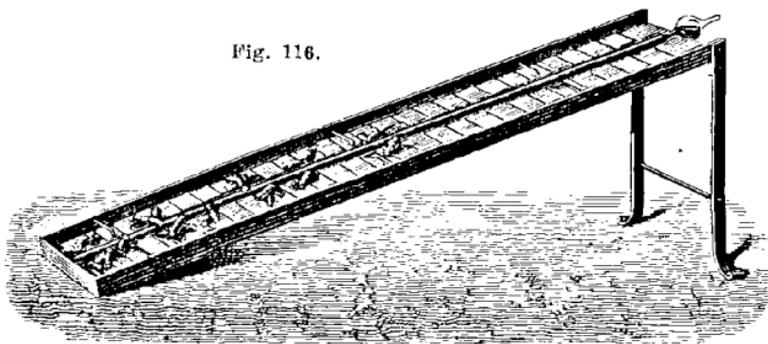
à son extrémité supérieure, et ne présente qu'une petite ouverture latérale *i*, par laquelle s'exerce la pression atmosphérique.

La hauteur du mercure se prend au moyen de deux échelles, ayant leur zéro commun en O (fig. 112), vers le milieu de la grande branche, et graduées en sens contraires, l'une de O vers A, l'autre de O vers B, sur deux règles de cuivre parallèles au tube barométrique. Deux curseurs à vernier *m* et *n* peuvent glisser sur les échelles, de manière à y indiquer les nombres de millimètres et de dixièmes de millimètre contenus de O à A et de O à B. Faisant la somme des deux nombres ainsi obtenus, on a la hauteur totale AB.

La figure 112 représente le baromètre de Gay-Lussac fixé sur une planchette, ce qui le rend plus propre à la démonstration. Pour voyager, on l'enferme dans un étui de cuivre entièrement semblable à celui du baromètre de Fortin, moins la cuvette.

148. **Conditions auxquelles doit satisfaire un baromètre.** — Dans

Fig. 116.



la construction d'un baromètre, on doit faire choix du mercure, de préférence à tout autre liquide, parce que, étant le plus dense des liquides, c'est celui qui prend la moindre hauteur; mais il mérite encore cette préférence à cause de sa faible volatilité et parce qu'il ne mouille pas le verre. Le mercure doit être parfaitement pur et exempt d'oxyde : autrement il adhère au verre et le ternit. De plus, s'il est impur, sa densité est changée, et la hauteur du baromètre est trop grande ou trop petite.

Dans tout baromètre, l'espace vide qui se trouve au sommet du tube, et qu'on nomme *chambre barométrique*, ou *vide de Torricelli*, doit être complètement purgé d'air et de vapeur d'eau, sinon ces fluides, en vertu de leur force élastique, déprimeront la colonne de mercure. Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire de faire bouillir le mercure dans le tube même, ce qui se pra-

tique de la manière suivante. On soude à l'extrémité ouverte du tube une ampoule de verre, puis on emplît le tube, jusqu'au col de l'ampoule, de mercure parfaitement pur. Posant le tube ainsi rempli sur une grille de tôle inclinée (fig. 116), on l'entoure de charbons incandescents, de manière à le porter à une température voisine de celle de l'ébullition du mercure. On ajoute alors de nouveaux charbons vers la partie inférieure de la grille, afin de faire naître l'ébullition, et quand elle a été prolongée 4 à 5 minutes, on porte les charbons un peu plus haut; et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on ait fait bouillir le mercure successivement dans toute la longueur du tube. Pendant l'ébullition, les vapeurs mercurielles qui se dégagent occasionnent des soubresauts dans le tube, et tendent à rejeter le mercure au dehors; c'est à recevoir le mercure ainsi projeté qu'est destinée l'ampoule.

Lorsqu'on a fait bouillir le mercure dans le tube, les bulles d'air et l'humidité qui adhéraient au verre ont disparu, et le tube présente l'éclat métallique d'un miroir bien étamé. C'est le signe que le tube est bien purgé. On le reconnaît encore lorsque, en l'inclinant doucement, il rend un son sec et métallique produit par le choc du mercure contre le sommet du tube. S'il y a de l'air ou de l'humidité dans l'instrument, le son est amorti.

Une fois le tube rempli comme il vient d'être dit, on enlève l'ampoule en donnant un trait de lime sur le col, on achève de remplir complètement avec du mercure sec et bouilli, puis, fermant le tube avec le doigt comme dans l'expérience de Torricelli (fig. 105), on le renverse dans sa cuvette.

Le tube à siphon de Gay-Lussac se remplit de la même manière, et c'est après le remplissage qu'on le courbe dans sa partie capillaire, en le chauffant sur des charbons ou à la lampe.

149. **Correction relative à la capillarité.** — Dans les baromètres

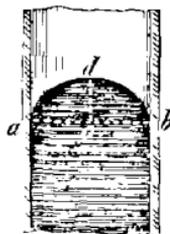


Fig. 117.

à cuvette, il y a toujours, dans la hauteur du mercure, une certaine dépression due à la capillarité (114), à moins que le diamètre intérieur du tube ne soit au moins de 2,5 à 3 centimètres. Pour faire la correction que nécessite cette dépression, il ne suffit pas de connaître le diamètre. En effet, on a vu (116) que cette dépression dépend en outre de la *flèche* du ménisque, c'est-à-dire de la hauteur *od* (fig. 117) de la surface convexe du mercure au-dessus de la section horizontale *ab*

qui sert de base au ménisque. Or, pour un même tube, la longueur de la flèche n'est pas constante; elle varie selon que le ménisque s'est formé pendant un mouvement ascendant ou des-

endant. Pour déterminer cette longueur, on fait affleurer le bord supérieur du curseur avec la base du ménisque, puis on le remonte jusqu'à ce qu'il affleure avec le sommet. En lisant sur l'échelle le déplacement du curseur, on a la hauteur de la flèche. Celle-ci connue, ainsi que le diamètre intérieur du tube, on trouve la dépression dans la table suivante, calculée par M. Delcros, table dont nous ne donnons qu'une partie.

DIAMÈTRE intérieur en millimètres	HAUTEUR DE LA FLÈCHE DU MÉNISQUE											
	mill. 0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6
4	0,60	0,89	1,16	1,41	1,65	1,86	2,05	2,21	2,35	»	»	»
6	0,24	0,36	0,48	0,59	0,70	0,80	0,99	0,99	1,07	1,21	1,32	»
8	0,12	0,18	0,24	0,30	0,35	0,40	0,46	0,50	0,55	0,64	0,71	0,77
10	0,07	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,40	0,44
12	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,21	0,23	0,25
14	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15

La première colonne verticale à gauche contient les diamètres intérieurs des tubes ; la première ligne horizontale, les hauteurs des flèches ; et les autres colonnes, les dépressions. Pour tous ces nombres, l'unité est le millimètre.

On se sert de cette table comme de la table de multiplication ordinaire. Par exemple, si le diamètre intérieur du tube barométrique est 10 millimètres, et la flèche 0^{mm},6, on trouve, au point de croisement des rangées horizontales et verticales commençant par 10 et par 0,6, le nombre 0^{mm},19 pour la dépression cherchée.

Le diamètre intérieur des tubes se détermine en les pesant successivement vides et pleins de mercure. La différence des poids donne le poids du cylindre de mercure contenu dans les tubes. La hauteur de ce cylindre étant facile à mesurer, le volume, et par suite la section, se déduit de la formule $P = VD$.

Dans le baromètre de Gay-Lussac, pour éviter la correction relative à la capillarité, on a soin que les deux branches A et B (fig. 112) soient de même diamètre ; car alors les dépressions tendent à se compenser. Mais on n'obtient ainsi qu'une correction approchée. En effet, d'après ce qu'on a vu ci-dessus, les flèches des deux ménisques ne sont jamais rigoureusement égales ; car lorsque le mouvement du mercure est ascendant dans l'une des branches, il est descendant dans l'autre.

150. **Correction de température.** — Dans toutes les observations barométriques il faut avoir égard à la température. En effet, le

mercure se dilatant ou se contractant par les variations de température, sa densité change, et, par suite, sa hauteur, puisque cette hauteur est en raison inverse de la densité du liquide renfermé dans le tube; en sorte que, pour des pressions atmosphériques différentes, on pourrait avoir des hauteurs égales dans le baromètre. Il importe donc, à chaque observation, de ramener toujours la hauteur à ce qu'elle serait à une température déterminée et invariable. Celle-ci étant arbitraire, on a choisi la température de la glace fondante. On verra, dans l'étude de la chaleur (317), comment se fait cette correction par le calcul. C'est pour connaître la température du mercure dans le baromètre qu'on place un thermomètre près du tube (fig. 109, 111 et 112).

On peut aussi ramener à zéro la hauteur du baromètre, au moyen de tables de correction construites pour cet usage, et données dans les *Annaires du Bureau des Longitudes*.

151. Variations de la hauteur barométrique. — Lorsqu'on observe le baromètre pendant plusieurs jours, on remarque que sa hauteur varie, en chaque lieu, non-seulement d'un jour à l'autre, mais encore dans une même journée.

L'amplitude des variations, c'est-à-dire la différence moyenne entre la plus grande et la plus petite hauteur, n'est pas partout la même. Elle croît de l'équateur vers les pôles. Les plus grandes variations, sauf les cas extraordinaires, sont de 6 millimètres sous l'équateur, de 30 sous le tropique du Cancer, de 40 en France, à la latitude moyenne, et de 60, à 25 degrés du pôle. Enfin, les plus fortes variations ont lieu en hiver.

On nomme *hauteur moyenne diurne* le nombre qu'on obtient en faisant la somme de vingt-quatre observations successives du baromètre, prises d'heure en heure, et en divisant cette somme par 24. Ramond a constaté qu'à notre latitude, la hauteur du baromètre, à midi, est sensiblement la moyenne du jour.

La *hauteur moyenne mensuelle* s'obtient en additionnant les hauteurs moyennes diurnes pendant un mois, et en divisant par 30.

Enfin, la *hauteur moyenne de l'année* se détermine en ajoutant les hauteurs moyennes de chaque jour pendant un an, et en divisant la somme par 365.

Sous l'équateur, la moyenne annuelle, au niveau des mers, est 0^m,758. Elle croît à partir de l'équateur, et atteint, entre les latitudes de 30 à 40 degrés, un maximum de 0^m,763. Elle décroît dans les latitudes plus élevées, et, à Paris, n'est que de 0^m,7568.

La moyenne générale, au niveau des mers, est de 0^m,761.

La moyenne mensuelle est plus forte en hiver qu'en été; ce qui est une conséquence du refroidissement de l'atmosphère.

On distingue, dans le baromètre, deux sortes de variations : 1^o les *variations accidentelles*, qui n'offrent aucune régularité dans leur marche, et qui dépendent des saisons, de la direction des vents et de la position géographique : ce sont celles qu'on observe surtout dans nos climats ; 2^o les *variations diurnes*, qui se produisent périodiquement à certaines heures de la journée.

À l'équateur et dans les régions intertropicales, on n'observe pas de *variations accidentelles* ; mais les *variations diurnes* s'y produisent avec une telle régularité, qu'un baromètre y peut servir d'horloge. Depuis midi, le baromètre baisse jusque vers quatre heures. A cette heure il atteint un minimum, puis remonte et atteint un maximum vers dix heures du soir. Enfin, il baisse de nouveau, atteint un second minimum vers quatre heures du matin, et un second maximum vers dix heures.

Dans les zones tempérées, il y a aussi des *variations diurnes* ; mais elles sont plus difficiles à constater qu'à l'équateur, parce qu'elles se confondent avec les *variations accidentelles*.

Les heures des maxima et des minima des *variations diurnes* paraissent être les mêmes dans tous les pays, quelle que soit la latitude ; seulement elles varient un peu avec les saisons.

152. Causes des variations barométriques. — La marche du baromètre est, en général, en sens contraire de celle du thermomètre ; c'est-à-dire que, la température s'élevant, le baromètre baisse, et *vice versa* ; ce qui indique que les variations barométriques, en un lieu, y résultent des dilatations ou des contractions de l'air, et, par conséquent, de ses changements de densité. Si la température de l'air était constante et uniforme dans toute l'étendue de l'atmosphère, il ne se produirait, dans le sein de celle-ci, aucun courant, et la pression atmosphérique, à hauteur égale, serait partout la même. Mais lorsqu'une région de l'atmosphère s'échauffe plus que les régions voisines, l'air dilaté s'élève en vertu de sa légèreté spécifique, et s'écoule par les hautes régions de l'atmosphère ; d'où il résulte que la pression décroît et que le baromètre baisse, tandis que la pression augmente et que le baromètre monte là où s'est portée la masse d'air déplacée. Aussi arrive-t-il, en général, qu'une baisse extraordinaire, sur un point du globe, est compensée par une hausse semblable sur un autre point.

Toutefois les changements de température n'influent pas seuls sur la hauteur du baromètre. En météorologie, on verra qu'au nombre des causes des variations barométriques doivent être comptées la direction et l'intensité du vent, et la plus ou moins grande quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

Quant aux *variations diurnes*, elles résultent des dilatations

qui se produisent périodiquement dans l'atmosphère par l'effet de l'action calorifique du soleil pendant la rotation de la terre.

453. **Relation entre les variations barométriques et l'état du ciel.** — On remarque, dans nos climats, que le baromètre se tient communément, par le beau temps, au-dessus de 0^m,758; au-dessous de ce point, dans les temps de pluie, de neige, de vent ou d'orage; et enfin que, sur un certain nombre de jours où le baromètre marque 0^m,758, il y a, en moyenne, autant de jours de beau temps que de jours de pluie. C'est d'après cette coïncidence entre la hauteur du baromètre et l'état du ciel, qu'on a marqué les indications suivantes sur le baromètre, en comptant de 9 en 9 millimètres au-dessus et au-dessous de 0^m,758.

Hauteur.	État de l'atmosphère.
785 millimètres.	Très-sec.
776 —	Beau fixe.
767 —	Beau temps.
758 —	Variable.
749 —	Pluie ou vent.
740 —	Grande pluie.
731 —	Tempête.

En consultant le baromètre comme instrument propre à annoncer les changements de *temps*, il ne faut pas perdre de vue qu'il n'est réellement destiné qu'à mesurer le poids de l'air, et qu'il ne monte ou ne descend qu'autant que ce poids augmente ou diminue. Or, de ce que les changements de temps coïncident le plus souvent avec les variations de pression, cela ne veut pas dire qu'ils y soient invariablement liés. Cette coïncidence tient à des conditions météorologiques particulières à notre climat, et elle n'est pas sans offrir d'exceptions. Si l'abaissement du baromètre précède ordinairement la pluie dans nos contrées, cela tient à la position de l'Europe. En effet, les vents du sud-ouest, qui sont les plus chauds, et par conséquent les moins lourds, font baisser le baromètre; mais en même temps, comme ils se sont chargés de vapeurs d'eau en traversant l'Océan, ces vapeurs, rencontrant un air plus froid, se condensent et se résolvent en pluie. Au contraire, les vents du nord et du nord-est étant froids et plus denses, font monter le baromètre; mais comme ils rencontrent une atmosphère plus chaude, les vapeurs qu'ils contiennent ne peuvent se condenser et donner de la pluie.

Lorsque le baromètre monte ou descend lentement, c'est-à-dire pendant deux ou trois jours, vers le beau temps ou vers la pluie, il résulte d'un grand nombre d'observations que les indications fournies par cet instrument sont alors extrêmement probables.

Quant aux variations brusques, dans l'un ou l'autre sens, elles présagent la pluie ou le vent.

Si l'on a égard aux remarques précédentes, en même temps qu'à la direction des vents et à la température de l'air, on peut tirer du baromètre d'utiles indications, particulièrement pour l'agriculture et la navigation. (Nous reviendrons sur ce sujet en *Météorologie*, en traitant de la *prévision du temps*.)

154. **Baromètre à cadran.** — Le baromètre à cadran, dû à Hooke, est un baromètre à siphon destiné à indiquer le beau et le mauvais temps. Il est ainsi nommé parce qu'il est muni d'un cadran sur lequel se meut une longue aiguille (fig. 118), qui est mise en mouvement par le mercure même de l'instrument, au moyen du mécanisme représenté dans la figure 119. A l'axe de l'aiguille est fixée une poulie O, sur laquelle s'enroule un fil qui porte à l'une de ses extrémités un poids P, et à l'autre un flotteur un peu plus pesant que ce poids, et soutenu par le mercure de la petite branche du tube barométrique. Si la pression atmosphérique vient à augmenter, le niveau baisse dans la petite branche, le flotteur descend, et entraîne la poulie et l'aiguille de gauche à droite. Le mouvement contraire a lieu quand la pression diminue, parce que le mercure s'élève dans la petite branche et remonte en même temps le flotteur. Il résulte de là que l'aiguille s'arrête aux mots *variable, pluie, beau temps, beau fixe*, etc., lorsque le baromètre prend les hauteurs correspondantes, pourvu, toutefois, que l'instrument soit bien réglé; or ceux qu'on trouve dans le commerce satisfont rarement à cette condition.

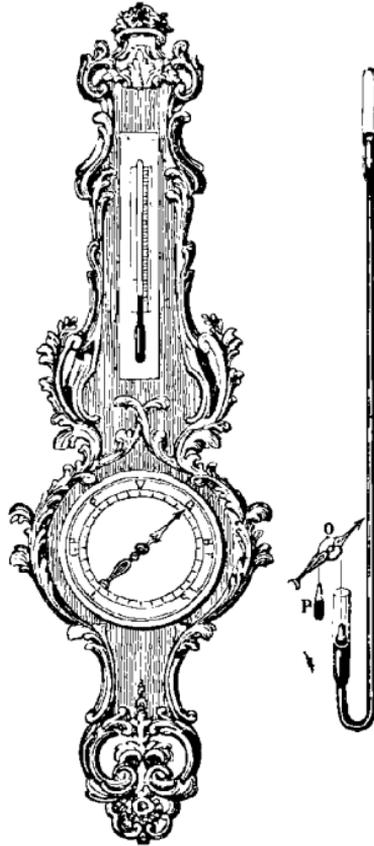


Fig. 118.

Fig. 119.

155. **Mesure des hauteurs par le baromètre.** — La pression de

l'atmosphère décroissant à mesure qu'on atteint des lieux plus élevés, il en résulte que le baromètre baisse d'autant plus, qu'il est porté à une plus grande hauteur, ce qui permet d'utiliser cet instrument pour mesurer la hauteur des montagnes.

Si la densité de l'air restait la même à toutes les hauteurs, on déduirait, par un calcul simple, la hauteur dont on s'est élevé de la quantité dont le baromètre se serait abaissé. En effet, la densité du mercure étant 10 466 fois plus grande que celle de l'air, si le baromètre s'abaissait de 1 millimètre, cela indiquerait qu'on s'est élevé de 10 466 fois 0^m,001, c'est-à-dire de 10^m,466. Si la dépression dans le baromètre était de 2, 3... millimètres, on en conclurait de même que l'ascension aurait été de deux fois, trois fois... 10^m,466. Mais comme la densité de l'air décroît lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, le calcul ci-dessus ne peut s'appliquer qu'à de très-petites hauteurs.

Pour mesurer la hauteur des montagnes à l'aide du baromètre, Laplace a donné la formule

$$D = 18393 (1 + 0,002837 \cos 2 \varphi) \left[1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \log \frac{H}{h},$$

dans laquelle D désignant la distance verticale entre les deux lieux dont on cherche la différence de niveau, H représente la hauteur du baromètre à la station inférieure, et h la hauteur à la station supérieure; T et t sont les températures de l'air correspondantes à chaque observation; φ est la latitude.

Pour la latitude de 45°, $\cos 2 \varphi = 0$, et la formule devient

$$D = 18393 \left[1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \log \frac{H}{h}.$$

Pour les hauteurs moindres que 1000 mètres, Babinet a donné la formule

$$D = 36000^m \left(\frac{H-h}{H+h} \right) \left[1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right],$$

qui dispense de l'usage des logarithmes.

Si la hauteur à mesurer n'est pas très-grande, on peut opérer seul; mais si elle est un peu considérable et exige un temps d'ascension un peu long, pendant lequel la pression atmosphérique peut varier, il faut être deux, et avoir deux baromètres bien d'accord. L'un des observateurs reste au pied de la montagne, l'autre se transporte au sommet; puis, à une heure donnée, ils observent simultanément la hauteur du baromètre et la température.

CHAPITRE II

MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ

156. **Loi de Mariotte.** — Mariotte, physicien français, mort en 1684, posa, le premier, la loi suivante sur la compressibilité des

gaz : *La température restant la même, le volume d'une masse donnée de gaz est en raison inverse de la pression.*

Cette loi se vérifie, pour l'air, au moyen de l'appareil suivant, connu sous le nom de *tube de Mariotte*. Sur une planchette de

Fig. 120 (h=1m).

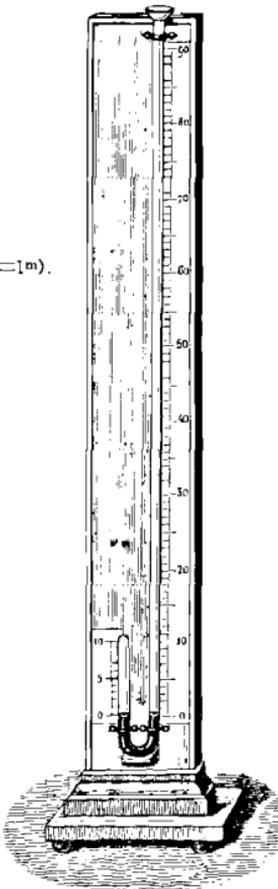
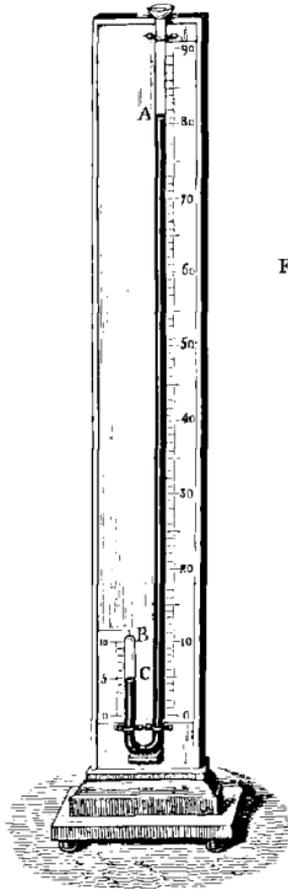


Fig. 121.



bois, maintenue verticalement, est fixé un tube de verre recourbé, dont les deux branches sont inégales (fig. 120). Le long de la petite branche, qui est fermée, est une échelle indiquant des capacités égales, tandis que l'échelle placée le long de la grande branche donne les hauteurs en centimètres. Les zéros des deux échelles sont sur une même ligne horizontale.

Pour faire l'expérience, on verse d'abord du mercure dans l'appareil par le sommet de la grande branche, de manière que

le niveau du liquide correspond au zéro dans les deux branches (fig. 120), ce qu'on obtient après quelques tâtonnements. L'air renfermé dans la courte branche est alors soumis à la pression atmosphérique qui s'exerce, dans la grande, sur la surface du

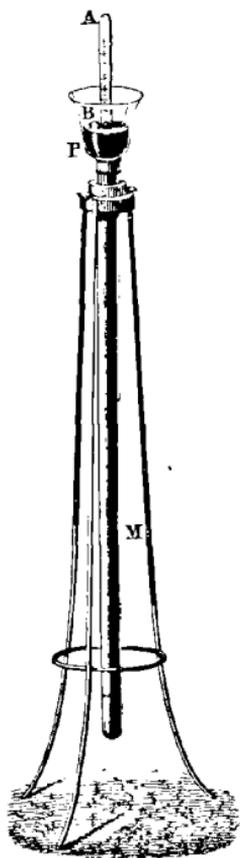


Fig. 122.

mercure, sinon le niveau ne serait pas le même. On verse enfin du mercure dans le grand tube jusqu'à ce que la pression qui en résulte réduise de moitié le volume d'air renfermé dans la petite branche; c'est-à-dire jusqu'à ce que le volume, qui était 10 d'abord, ne soit plus que 5, ainsi que le montre la figure 121. Mesurant alors la différence de niveau CA du mercure dans les deux tubes, on trouve qu'elle est précisément égale à la hauteur du baromètre au moment où l'on expérimente. La pression de la colonne CA équivaut donc à une atmosphère. En y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce en A, au sommet de la colonne, on voit qu'au moment où le volume d'air s'est réduit de moitié, la pression est double de ce qu'elle était d'abord; ce qui démontre la loi.



Fig. 123.

Si la grande branche est assez longue pour qu'on puisse y verser du mercure jusqu'à ce que le volume d'air de la courte branche se réduise au tiers de ce qu'il était d'abord, on trouve que la différence de niveau, dans les deux tubes, est

égale à deux fois la hauteur du baromètre; c'est-à-dire qu'elle équivaut à deux pressions atmosphériques, qui, s'ajoutant à celle qui s'exerce directement sur la surface du mercure dans le grand tube, donnent une pression de 3 atmosphères. C'est donc sous une pression triple que le volume d'air est devenu trois fois moindre. La loi de Mariotte a été vérifiée ainsi, pour l'air, jusqu'à 27 atmosphères, par Dulong et Arago, au moyen d'un appareil décrit ci-après (fig. 124).

Cette loi se vérifie aussi pour des pressions moindres qu'une

atmosphère. A cet effet, on remplit de mercure, jusqu'aux deux tiers environ, un tube de verre gradué, le reste contenant de l'air; puis on le retourne et on le plonge dans une éprouvette profonde, pleine de mercure (fig. 122). Enfonçant ensuite le tube jusqu'à ce que le niveau du mercure soit le même à l'intérieur et à l'extérieur, on lit sur le tube quel est le volume d'air qu'il contient. Cela posé, on soulève le tube, comme le représente la figure 123, jusqu'à ce que, par la diminution de pression, le volume d'air AC soit double de AB (fig. 122). Or on trouve alors que le mercure s'élève dans le tube, et que la hauteur CD qu'il atteint est la moitié de celle du mercure dans le baromètre au moment de l'expérience. L'air, dont le volume a doublé, n'est donc plus qu'à une demi-pression atmosphérique; car c'est la force élastique de cet air qui, jointe au poids de la colonne CD, fait équilibre à la pression atmosphérique extérieure. Le volume est donc bien encore en raison inverse de la pression.

157. Expérience de Dulong et Arago sur la loi de Mariotte. — On avait d'abord admis la loi de Mariotte d'une manière absolue pour tous les gaz et à toutes les pressions. Despretz fit voir, le premier, que l'acide carbonique, l'hydrogène sulfuré, l'ammoniac et le cyanogène sont plus compressibles que l'air, et que l'hydrogène, se comportant d'abord comme l'air jusqu'à une pression de 15 atmosphères, est ensuite moins compressible; ce qui montra que la loi de Mariotte n'était pas générale.

Cette loi venait d'être trouvée en défaut, quand Dulong et Arago entreprirent sur la force élastique de la vapeur d'eau des recherches dans lesquelles ils devaient faire usage d'un manomètre à air comprimé (162) pour mesurer la tension. Voulant à ce sujet s'assurer de l'exactitude de leur manomètre, ils le graduèrent, non pas d'après la loi de Mariotte, mais en soumettant directement l'air renfermé dans le manomètre à des pressions de plus en plus grandes. Pour cela, ils disposèrent leur appareil comme le montre la figure 124. Un réservoir P, de fonte, porte latéralement deux tubulures Q, R. Dans la première est scellé le tube manométrique A, de près de deux mètres de long; ce tube est rempli d'air sec, et entouré d'un manchon de verre dans lequel tombe un courant d'eau froide pour maintenir la température constante, malgré l'échauffement que tend à prendre l'air dans le tube en se comprimant. Sur la seconde tubulure est fixée une série de treize tubes de cristal B, B', B''..., chacun de deux mètres de longueur, et reliés entre eux au moyen de garnitures de fer.

Ces tubes étaient appliqués le long de forts madriers de sapin, et pour qu'ils n'exercassent pas de pression les uns sur les autres,

à chaque garniture, comme on le voit en C, étaient attachés deux cordeaux s'enroulant sur des poulies, lesquelles étaient portées par les madriers mêmes qui soutenaient tous les tubes. A ces cor-

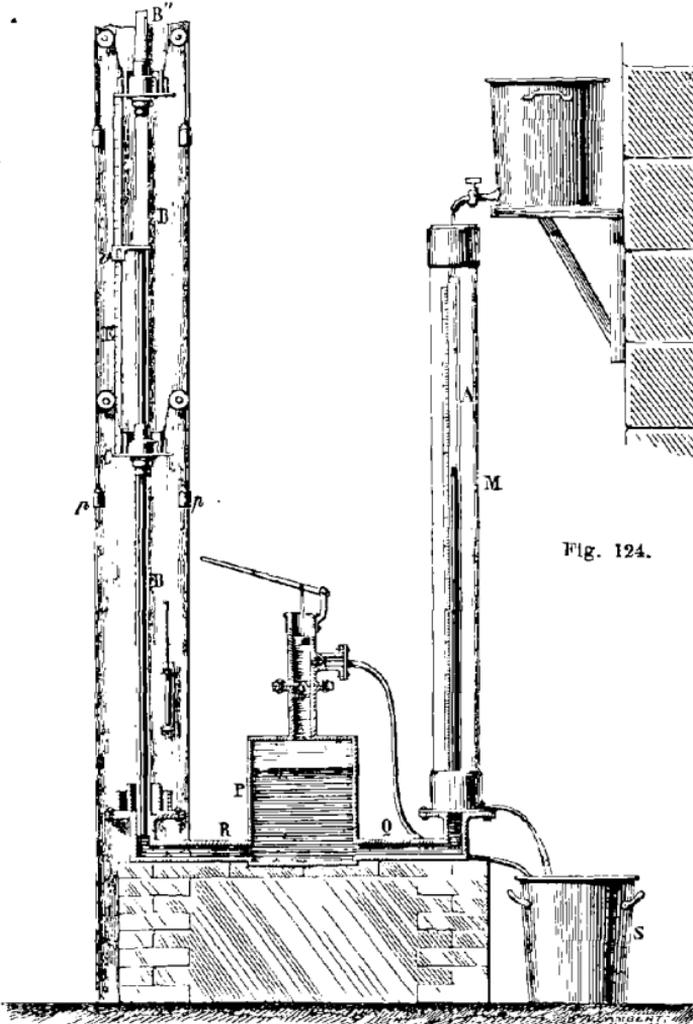


Fig. 124.

deaux étaient suspendus de petits seaux, *p, p*, chargés de grenaille de plomb, et faisant équilibre, deux par deux, à un tube et à sa garniture. Enfin, sur le réservoir *P* était adaptée une pompe aspirante et foulante, qui aspirait de l'eau d'un vase *S* et la refoulait dans le réservoir *P*. Or, celui-ci ayant été d'avance rempli de

mercure jusqu'aux deux tiers environ, lorsqu'on faisait marcher la pompe, la pression transmise par l'eau au mercure refoulait ce dernier dans les tubulures Q et R; en sorte qu'il s'élevait en même temps dans les tubes B, B', B''..., et dans le manomètre A, absolument comme dans l'expérience du tube de Mariotte, dont les tubes B, B', B''..., figuraient la grande branche, et le tube manométrique la petite. A mesure que le volume d'air se réduisait ainsi dans le tube A, la hauteur du mercure dans les tubes B, B', B''..., faisait connaître la pression correspondante. Cette hauteur se mesurait au moyen de règles divisées en millimètres et munies de verniers, qu'on portait le long des tubes, en les appliquant sur des points de repère tracés sur les garnitures de jonction.

Dulong et Arago, ayant expérimenté jusqu'à 27 atmosphères, observèrent que le volume de l'air diminuait toujours un peu plus dans le tube A que ne l'indiquait la loi de Mariotte; mais les différences étant très-petites, ils les attribuèrent à des erreurs d'observation, et admirèrent que cette loi était rigoureuse pour l'air, du moins jusqu'à 27 atmosphères, limite de leur expérience.

Enfin, M. Regnault, en 1847, publia des expériences sur la compressibilité des gaz faites avec un appareil qui avait beaucoup de rapport avec celui de Dulong et Arago, mais dans lequel on avait tenu compte de toutes les causes d'erreur et fait les observations avec une précision extrême. Or, ayant expérimenté sur l'air, l'azote, l'acide carbonique et l'hydrogène, M. Regnault constata d'abord que l'air ne suit pas rigoureusement la loi de Mariotte, mais se comprime plus qu'elle ne l'indique, et que, de plus, sa compressibilité augmente avec la pression; c'est-à-dire que les résultats obtenus par l'observation et ceux déduits de la loi de Mariotte diffèrent d'autant plus, que la pression est plus forte.

M. Regnault a trouvé que l'azote se comporte comme l'air; seulement il est moins compressible. L'acide carbonique s'éloigne beaucoup de la loi de Mariotte, lorsque les pressions sont un peu considérables. L'hydrogène s'en écarte aussi; mais sa compressibilité, au lieu d'augmenter avec la pression, diminue.

M. Regnault a encore observé sur l'acide carbonique que ce gaz s'éloigne d'autant moins de la loi de Mariotte, que la température est plus élevée, et l'on admet, en général, qu'il en est ainsi pour les autres gaz. En effet, l'expérience montre que les gaz s'écartent d'autant plus de cette loi, qu'ils sont plus près de leur point de liquéfaction, et qu'au contraire, en s'éloignant de ce point, la compressibilité tend de plus en plus à devenir proportionnelle à la pression. Du reste, pour les gaz qui n'ont pu être liquéfiés, les écarts entre la loi de Mariotte et l'observation sont extrêmement

faibles et négligeables dans les expériences de physique et de chimie, lorsqu'on n'y considère que des variations de pression peu considérables, comme c'est le cas ordinaire.

158. **Conséquences de la loi de Mariotte.** — Dans l'expérience du tube de Mariotte, la masse d'air renfermée dans le tube restant la même, sa densité devient nécessairement d'autant plus grande, que son volume est réduit davantage; d'où l'on déduit, comme conséquence de la loi de Mariotte, le principe suivant, qui n'en est qu'un autre énoncé: *Pour une même température, la densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte.* Par exemple, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, la densité de l'air étant 773 fois moindre que celle de l'eau (153), sous une pression de 773 atmosphères, l'air aurait la même densité que l'eau, si, à une telle pression, il était encore gazeux; ce qu'on ignore.

On peut encore énoncer la loi de Mariotte, en disant que, pour une masse de gaz donnée, prise à la même température, *le produit du volume par la pression est constant.*

En effet, soient V le volume à la pression P , et V' le volume à la pression P' , d'après la loi de Mariotte on a $\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P}$, d'où $VP = V'P'$.

159. **Problèmes sur la loi de Mariotte.** — I. Un vase à parois compressibles contient $4^{\text{lit}},3$ d'air, la pression étant $0^{\text{m}},74$; quel serait le volume d'air à la pression $0^{\text{m}},76$, la température restant la même?

Le volume d'air étant $4^{\text{lit}},3$ à la pression $0^{\text{m}},74$, il est, d'après la loi de Mariotte, 74 fois plus grand à la pression $0^{\text{m}},1$, ou $4^{\text{lit}},3 \times 74$, et, d'après la même loi, 76 fois plus petit à la pression $0^{\text{m}},76$, c'est-à-dire $\frac{4,3 \times 74}{76} = 4^{\text{lit}},186$.

II. On a 20 litres de gaz sous la pression d'une atmosphère; à quelle pression, en atmosphères, doit être soumis ce volume pour se réduire à huit litres?

Pour réduire le volume de 20 litres à un seul, il faudrait, d'après la loi de Mariotte, une pression 20 fois plus grande, ou 20 atmosphères; pour l'amener ensuite d'un seul litre à 8, il faut une pression 8 fois plus petite, c'est-à-dire, $20 = 2$ atmosphères $\frac{1}{2}$.

III. Un litre d'air pèse $1^{\text{gr}},293$ à zéro et sous la pression 76^{c} de mercure; quel serait le poids, à température égale, de V litres d'air à la pression H ?

Un litre d'air, pesant $1^{\text{gr}},293$ à la pression 76^{c} , pèse $\frac{1^{\text{gr}},293}{76}$ à la pression 1^{c} , et $\frac{1^{\text{gr}},293 \times H}{76}$ à la pression H ; donc le poids P de V litres, à zéro et à la pression H , est $P = \frac{1^{\text{gr}},293 \times H \times V}{76}$.

IV. La densité d'un gaz est d à la pression barométrique H ; quelle sera sa densité d' à la pression $0^{\text{m}},76$?

Les densités des gaz, comme leurs poids, étant directement proportionnelles aux pressions, on a $\frac{d'}{d} = \frac{0^{\text{m}},76}{H}$, d'où $d' = \frac{d \times 0,76}{H}$.

160. **Manomètres.** — On donne le nom de *manomètres* à des instruments destinés à mesurer la tension des gaz et des vapeurs. On distingue le *manomètre à air libre*, le *manomètre à air comprimé* et le *manomètre métallique*.

Dans tous, l'unité de mesure est la pression atmosphérique, lorsque la hauteur du baromètre est $0^m,76$. On a vu (142) que cette pression, sur un centimètre carré, est de $1^{kil},033^{gr}$; par conséquent, si l'on dit d'un gaz qu'il a une tension de 2, de 3 atmosphères, cela signifie que sa tension ferait équilibre au poids d'une colonne de mercure de deux fois, trois fois 76 centimètres de hauteur; ou, en d'autres termes, qu'il exerce, sur chaque centimètre carré des parois qui le contiennent, une pression égale à deux fois ou trois fois $1^{kil},033^{gr}$.

161. **Manomètre à air libre.** — Le *manomètre à air libre* consiste en un tube de cristal BD (fig. 125) recourbé et soudé à la partie inférieure d'un réservoir A, de même matière. A la partie supérieure de celui-ci est soudé un tube C, qui se rend au récipient fermé qui contient le gaz ou la vapeur dont on veut mesurer la tension. Le réservoir A est rempli de mercure, et le tout est fixé sur une longue planchette qu'on établit verticalement.

Pour graduer le manomètre, on laisse l'orifice C communiquer avec l'atmosphère, et, au niveau où le mercure s'arrête alors dans le tube de cristal, on marque le chiffre 1, c'est-à-dire une atmosphère; puis, à partir de ce point, de 76 en 76 centimètres, on marque les chiffres 2, 3, 4, 5, 6, qui indiquent le même nombre d'atmosphères, puisqu'une colonne de mercure de 76 centimètres représente une pression atmosphérique. On partage enfin les intervalles de 1 à 2, de 2 à 3.... en 10 parties égales, qui donnent les dixièmes d'atmosphère. Les nombres à gauche du tube donnent les pressions en centimètres du mercure.

Le tube C étant ensuite mis en communication, par exemple, avec une chaudière à vapeur, le mercure s'élève dans le tube BD à une hauteur qui mesure la tension de la vapeur. Dans le dessin, le manomètre marque 2 atmosphères, qui sont représentées par une fois la hauteur 76 centimètres, plus la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet de la colonne par l'orifice D.

Le manomètre à air libre n'est en usage que pour des pressions qui ne dépassent pas 5 à 6 atmosphères. Au delà, il faudrait donner au tube BD une longueur qui le rendrait embarrassant; on fait alors usage du manomètre suivant.

162. **Manomètre à air comprimé.** — Avec le manomètre à air libre, la tension se mesure par la hauteur de la colonne de mercure à laquelle elle fait équilibre. Dans le *manomètre à air com-*

primé, elle se mesure par la réduction de volume qu'elle imprime à une masse donnée d'air. Pour cela, le tube manométrique, qui n'a ici que 60 à 80 centimètres de longueur, est fermé à sa partie supérieure et rempli d'air. A sa partie inférieure, il plonge dans un bain de mercure, contenu dans un réservoir qui, à cause des grandes pressions que l'instrument peut avoir à supporter, est de fer. A sa partie supérieure est un orifice dans lequel est solidement mastiqué le tube manométrique (fig. 126). Une tubulure latérale A met le manomètre en communication avec le récipient dans lequel est le gaz dont on doit déterminer la tension.

On gradue expérimentalement ce manomètre en comparant sa marche à celle d'un manomètre

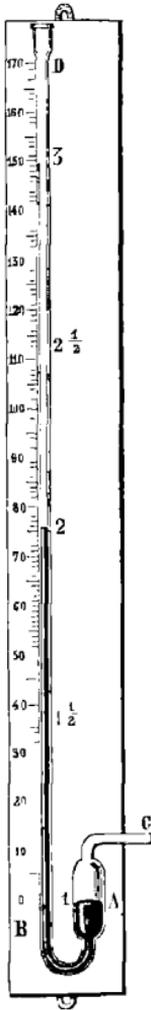


Fig. 125.

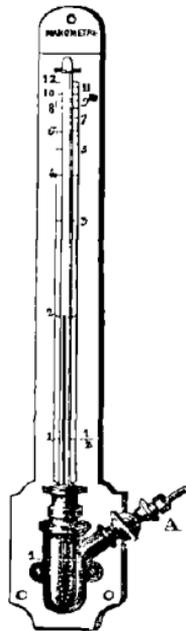


Fig. 126.

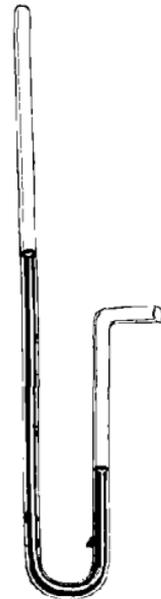


Fig. 127.

tre à air libre d'une hauteur suffisante. Pour cela, ayant réglé la quantité d'air dans le tube, de manière qu'à la pression d'une atmosphère, le niveau du mercure y soit le même que dans le réservoir, on fait communiquer l'instrument, en même temps que le manomètre à air libre auquel on veut le comparer, avec un réci-

vient dans lequel on comprime de l'air au moyen d'une pompe foulante. Le mercure s'élevant alors dans les deux instruments, à mesure que le manomètre à air libre marque 1, 2, 3... atmosphères, on inscrit les mêmes nombres, au niveau du mercure, sur une échelle le long du tube manométrique. L'instrument se trouve ainsi gradué avec exactitude, que le tube en soit ou non de même diamètre dans toute sa longueur.

On peut aussi graduer le manomètre à air comprimé par le calcul suivant, qui suppose que le tube est partout de même diamètre, et qui présente les trois cas suivants : celui où l'on tient compte de l'abaissement du mercure dans le réservoir quand ce liquide s'élève dans le tube manométrique; celui où l'on suppose le niveau constant dans le réservoir; et celui où le manomètre consiste en un simple tube recourbé.

1^o Le diamètre du réservoir n'étant pas assez grand pour que la dépression du mercure puisse être négligée, soient F la pression transmise par le tube A (fig. 128) au mercure du réservoir, x' la dépression dans celui-ci, R son rayon intérieur, r celui du tube manométrique, h la hauteur de ce dernier à partir du point où le niveau est le même dans le réservoir et dans le tube, et enfin x la hauteur à laquelle le mercure s'élève dans le manomètre par l'effet de la pression F .

La pression extérieure étant d'abord d'une atmosphère, ou 76 centimètres, le volume d'air dans le tube manométrique peut être représenté par h ; mais la pression extérieure devenant F , le volume d'air se réduit à $h-x$; il est donc alors plus comprimé, et acquiert une tension f qu'on calcule d'après la loi de Mariotte, en posant $\frac{f}{76} = \frac{h}{h-x}$; d'où $f = \frac{76h}{h-x}$. De plus, l'ascension x et la dépression x' étant en raison inverse des sections du tube et du réservoir, on, ce qui est la même chose, en raison inverse des carrés des rayons de ces mêmes sections, on a $\frac{x'}{x} = \frac{r^2}{R^2}$, d'où $x' = \frac{r^2 x}{R^2}$.

Cela posé, la différence de niveau dans le tube et dans le réservoir étant actuellement $x+x'$, la tension F fait équilibre à une colonne de mercure $x+x'$, plus à la force élastique de l'air comprimé dans le tube, laquelle on a trouvée ci-dessus égale à $\frac{76h}{h-x}$. On a donc $F = x + x' + \frac{76h}{h-x}$. En remplaçant x' par sa valeur et réduisant, $F = \frac{(R^2 + r^2)x}{R^2} + \frac{76h}{h-x}$ [A].

Faisant successivement $F = 76, 2.76, 3.76...$ dans cette équation, et la résolvant par rapport à x , on trouve les hauteurs auxquelles il faut inscrire sur le tube manométrique les nombres 1, 2, 3... atmosphères.

L'équation [A], étant du second degré, fournit deux valeurs pour x ; or il est à remarquer que la première, celle dont le radical est positif, ne satisfait pas à la question; ce qu'on vérifie en y faisant $F = 76$, valeur qui devrait donner $x = 0$, ce qui n'a pas lieu. On ne doit donc faire usage que de la racine dont le radical est négatif; même remarque pour les équations [B] et [C] ci-après.

2^o Dans le cas où R est assez grand par rapport à r pour qu'on puisse négliger la fraction $\frac{r^2}{R^2}$, si l'on met dans l'équation [A] le terme $\left(\frac{R^2 + r^2}{R^2}\right)x$ sous

la forme $\frac{R^2 \left(\frac{r^2}{R^2} \right)}{R^2} x$, en négligeant $\frac{r^2}{R^2}$, le terme se réduit à x , et l'équation [A] prend la forme $F = x + \frac{76 h}{h - x}$ [B]. Résolue par rapport à x , elle fournit les deux valeurs

$$x' = \frac{(F + h) + \sqrt{(F + h)^2 - 4h(F - 76)}}{2},$$

$$x'' = \frac{(F + h) - \sqrt{(F + h)^2 - 4h(F - 76)}}{2}.$$

La seconde donne, comme ci-dessus, les hauteurs auxquelles doivent être inscrits les nombres 1, 2, 3..., lorsque F égale 76, 2.76, 3.76...

3° Enfin, si le manomètre consiste simplement en un tube recourbé, fermé à son extrémité supérieure et contenant du mercure (fig. 127), on a $R = r$, et l'équation [A] devient $F = 2x + \frac{76 h}{h - x}$ [C].

163. **Manomètre barométrique de M. Regnault.** — Pour mesurer les faibles tensions, M. Regnault a adopté un manomètre qui est une modification de son baromètre fixe déjà décrit (146). A côté du tube barométrique est un second tube a d'égal diamètre, plongeant dans la même cuvette (fig. 128). Ce tube, ouvert à ses deux bouts, est en communication à sa partie supérieure avec une tubulure à trois branches m , laquelle communique d'une part avec une machine pneumatique, de l'autre avec l'appareil où l'on veut faire le vide. Plus la raréfaction est poussée loin dans celui-ci, plus le mercure s'élève dans le tube a ; en sorte que c'est la différence de niveau dans les tubes b et a qui fait connaître la tension. Il n'y a donc qu'à mesurer la hauteur ab à l'aide du cathétomètre, pour avoir avec précision la force élastique dans l'appareil où l'on fait le vide. Cet appareil se désigne aussi sous le nom de *baromètre différentiel*.

164. **Manomètre de Bourdon.** — Cet instrument, qui est entièrement métallique et sans mercure, est construit d'après le principe suivant, fondé sur la déformation qu'éprouvent les tubes par la pression : lorsqu'un tube à parois flexibles et légèrement aplaties sur elles-mêmes est enroulé en spirale, dans le sens de son plus petit diamètre, toute pression intérieure sur les parois a pour effet de dérouler le tube, et, au contraire, toute pression extérieure a pour effet de l'enrouler davantage.

D'après ce principe, le manomètre de Bourdon se compose d'un tube de laiton, long de 0^m,70, recourbé en hélice suivant un tour et demi, et à parois minces et flexibles (fig. 129). Sa section, qui est représentée en S sur la gauche de la figure, est une ellipse dont le grand axe est de 11 millimètres et le petit de 4. L'extré-

mité *a*, qui est ouverte, est fixée à une tubulure à robinet *m*, destinée à mettre l'appareil en communication avec une chaudière à vapeur. L'extrémité *b* est fermée et libre, ainsi que tout le reste du tube.

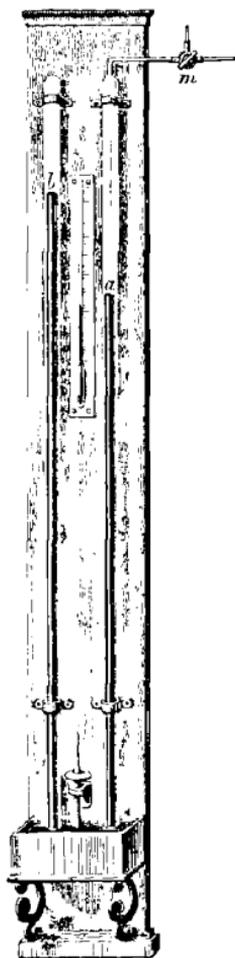


Fig. 128.

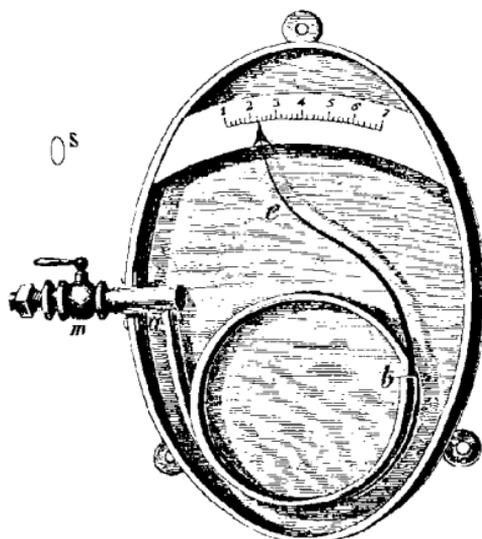


Fig. 129 (h = 26).

marcher simultanément les deux instruments avec de l'air comprimé.

CHAPITRE III

DIFFUSION, OSMOSE ET ABSORPTION DES GAZ

165. **Diffusion ou mélange des gaz.** — Par suite de la force expansive des gaz, leur *diffusion*, ou mélange spontané, est beaucoup plus rapide que pour les liquides (122).

La diffusion des gaz a été démontrée pour la première fois par le chimiste français Berthollet, à l'aide de deux ballons de verre munis chacun d'un robinet et vissés l'un sur l'autre (fig. 130). Les deux ballons étant remplis de gaz bien desséchés, le ballon

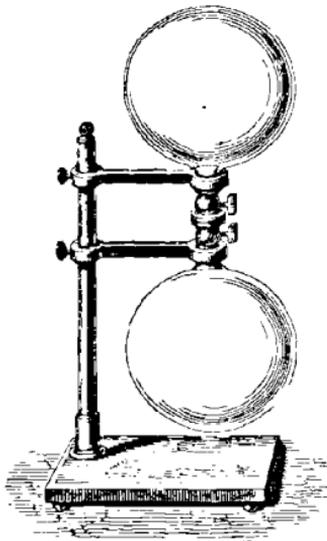


Fig. 130.

supérieur d'hydrogène dont la densité est 0,0692, et l'inférieur de gaz acide carbonique dont la densité est 1,529, c'est-à-dire 22 fois plus grande, on les plaça dans les caves de l'Observatoire, pour les préserver de toute agitation et des variations de température. Les robinets ayant été ouverts, l'acide carbonique, malgré son excès de poids, passa en partie dans le ballon supérieur, et, au bout de quelques heures, on constata que les deux ballons contenaient des proportions égales d'hydrogène et d'acide carbonique. Soumis à la même expérience, tous les gaz qui n'ont pas entre eux d'action chimique donnent le même résultat.

L'expérience fait voir qu'une fois mélangés les gaz persistent indéfiniment dans leur état de mélange, et que la diffusion entre deux gaz est d'autant plus prompte, qu'ils diffèrent davantage de densité; c'est le gaz le plus pesant qui est le moins diffusible. L'hydrogène, par exemple, se diffuse dans une direction descendante environ cinq fois plus vite que l'acide carbonique dans une direction ascendante. Les molécules d'hydrogène, dans un gaz sans mouvement apparent, se diffusent, en 1 minute, à une distance de 0^m,33.

De ce qui précède découlent les lois suivantes :

1^o Les gaz entre lesquels il n'y a pas action chimique se mélangent rapidement aussitôt qu'ils sont en contact, et leur mélange est uniforme et persistant.

2^o Le mélange de deux gaz est d'autant plus rapide, que la différence de leurs densités est plus grande.

A ces lois il faut ajouter la suivante, connue sous le nom de *loi de Dalton*, physicien anglais qui, le premier, l'a fait connaître.

3^o La température restant constante, la force élastique du mélange de plusieurs gaz égale la somme des forces élastiques

de chacun d'eux, ramenés du volume qu'ils occupaient d'abord au volume total, d'après la loi de Mariotte.

Cette loi peut encore s'énoncer en disant que, dans un mélange de plusieurs gaz, la pression exercée par chacun d'eux est la même que s'il était seul.

La troisième loi est une conséquence de la loi de Mariotte. Pour la vérifier, soient v, v', v'' , les volumes de trois gaz sans action chimique les uns sur les autres, f, f', f'' , leurs tensions respectives, et V le volume du vase dans lequel on les mélange. Le premier gaz, passant du volume v au volume V , acquiert une élasticité x telle, que, d'après la loi de Mariotte, on a $\frac{x}{f} = \frac{v}{V}$; d'où $x = \frac{fv}{V}$.

De même la tension du second gaz devient $\frac{f'v'}{V}$, et celle du troisième $\frac{f''v''}{V}$. En représentant par F la somme de ces trois forces élastiques on a

$$F = \frac{fv + f'v' + f''v''}{V}; [1]$$

telle doit donc être aussi la force élastique du mélange. En effet, supposons que le vase dans lequel on fait passer les trois gaz soit une cloche graduée pleine de mercure, assez grande pour qu'ils ne la remplissent pas tout à fait; en représentant par h la hauteur du mercure qui reste encore dans la cloche après qu'on y a fait passer les gaz, et par H la hauteur barométrique au moment de l'expérience, $H - h$ sera la tension du mélange dans la cloche. Or, la température restant constante, on observe toujours que la valeur de $H - h$ est la même que celle de F obtenue par la formule [1] ci-dessus, ce qui vérifie la loi.

Dans le cas où $f = f' = f''$, et où $V = v + v' + v''$, on a

$$F = \frac{f(v + v' + v'')}{v + v' + v''} = f.$$

C'est-à-dire que la pression du mélange est la même que celle des gaz avant d'être mélangés; c'est ce qui avait lieu dans l'expérience de Berthollet.

La diffusion des gaz contribue puissamment à entretenir la pureté de l'air dans l'atmosphère et dans nos habitations, en dispersant au loin les gaz nuisibles à l'économie animale.

* 166. **Effusion, transpiration et osmose des gaz.** — Outre la diffusion, on distingue encore dans les mouvements des gaz :

L'*effusion*, ou passage des gaz dans le vide par une très-petite ouverture en mince paroi;

La *transpiration*, ou passage des gaz, par un tube capillaire très-fin, dans le vide ou dans une atmosphère raréfiée;

Enfin l'*osmose*, ou diffusion à travers les diaphragmes.

Les vitesses de diffusion et d'effusion sont sensiblement les mêmes, et les changements de densité d'un gaz ont peu d'influence sur sa vitesse d'effusion. La vitesse de transpiration est proportionnelle à la pression et en raison inverse de la longueur des tubes, à diamètre égal, mais indépendante de la vitesse de diffusion et de la nature des tubes.

Quant à la diffusion des gaz à travers les membranes et les diaphragmes poreux, c'est un véritable phénomène d'endosmose et d'exosmose (124), qui a été étudié surtout par Graham, à l'aide d'un appareil qu'il a nommé *diffusiomètre*. Celui-ci consiste en un tube de verre de 25 centimètres de longueur et de 22 millimètres de diamètre. Une extrémité est fermée par une plaque d'un

demi-millimètre d'épaisseur de graphite comprimé, tel qu'on le prépare pour les crayons, et non de graphite naturel, qui n'est pas assez poreux.

Pour s'opposer d'abord à la diffusion, on fixe sur la plombagine de la gutta-percha; puis, ayant rempli le tube de mercure, on le renverse sur la cuve à mercure, et on fait arriver de l'hydrogène jusqu'à ce que le niveau soit le même à l'intérieur et à l'extérieur. Enlevant alors la gutta-percha, après 50 minutes environ, tout l'hydrogène a passé à travers le graphite et est remplacé par de l'air, mais dont le volume est moindre, un quart seulement, l'hydrogène traversant la plombagine et se diffusant dans l'air extérieur beaucoup plus vite que l'air ne se diffuse dans l'hydrogène à travers la plombagine. Le reste du tube est rempli de mercure dont la hauteur fait connaître la force de transmission réciproque de l'air et de l'hydrogène. Si les deux gaz intérieur et extérieur sont de même densité, il y a pénétration égale dans les deux sens; mais s'ils diffèrent de densité, la pénétration n'est plus la même, et, suivant Graham, *les temps que des volumes égaux de gaz différents mettent à passer à travers le graphite sont proportionnels à la racine carrée des densités*. Toutefois cette loi n'est pas d'accord avec les résultats obtenus par Bunsen avec un diffusiomètre différent de celui de Graham.

Lorsqu'on introduit dans le diffusiomètre un mélange de gaz différents, d'hydrogène et d'acide carbonique, par exemple, chacun passe à travers le septum dans la proportion qui lui est propre; de là un moyen de séparer, au moins partiellement, des gaz de densités différentes. Graham a donné à cette méthode d'analyse le nom d'*atmolyse*.

Ce savant admet que dans le passage d'un gaz à travers un septum, comme la plombagine, la terre cuite non vernissée, la force motrice réside dans le mouvement propre des molécules gazeuses (130), celles-ci étant projetées à travers les pores du septum.

Le caoutchouc se laisse aussi pénétrer par les gaz. Graham a observé que l'air séparé par une membrane de caoutchouc d'un espace dans lequel on entretient le vide, passe à travers la membrane, et renferme, après son passage, 40 d'oxygène et 60 d'azote sur 100.

Ce n'est pas seulement vers un espace vide que les gaz passent à travers le caoutchouc, mais aussi vers un espace contenant d'autres gaz. En effet, si l'on remplit un ballon de caoutchouc à minces parois d'acide carbonique, l'oxygène et l'azote de l'air y pénètrent respectivement avec leurs vitesses relatives, tandis que l'acide carbonique s'en dégage graduellement. Toutefois l'oxygène finissant par atteindre à l'intérieur une proportion plus grande qu'à l'extérieur, ce gaz traverse de nouveau le caoutchouc et sort du ballon. Lorsqu'on prend pour diaphragme une vessie mouillée, l'osmose des gaz est modifiée. Dans ce cas, Graham a admis que le gaz qui passe à travers la membrane se dissout d'abord dans l'eau qui la mouille, s'y liquéfie, s'y diffuse ensuite à la manière des liquides (122), puis, s'évaporant sur l'autre face de la membrane, se diffuse enfin à la manière des gaz. La solubilité du gaz dans l'eau est alors l'action prépondérante, qui domine tellement les autres, qu'on peut poser cette loi : *La transmission d'un gaz à travers un septum mouillé d'eau est proportionnelle à la solubilité du gaz dans ce liquide*.

* 167. **Absorption des gaz par les solides.** — Les gaz sont absorbés plus ou moins par tous les corps solides avec lesquels ils sont en contact, mais en proportion très-variable suivant la nature du gaz et celle du solide. Les gaz se condensent surtout à la surface; car, plus on multiplie celle-ci, plus est grand le volume du gaz absorbé.

Éteint sous une cloche remplie d'un gaz donné, le charbon de chêne absorbe, à la pression ordinaire, 90 fois son volume de gaz ammoniac, 35 fois son volume de gaz acide carbonique et 9 fois son volume d'oxygène. Les charbons sont d'autant plus absorbants, qu'ils sont plus purs. Avec du charbon de bois

parfaitement pur, M. Melsens, à Bruxelles, a pu concentrer dans un fragment de cette substance un poids de gaz égal à celui du charbon.

Un fragment de charbon, saturé d'un gaz et placé dans un autre gaz, perd une partie du premier qui est remplacé par le second.

Le grand pouvoir absorbant du charbon est utilisé dans l'industrie pour la purification des eaux et pour la décoloration des sirops.

L'absorption des gaz par le charbon est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur dû à la condensation du gaz; ce phénomène est surtout sensible avec le platine très-divisé, qui a un pouvoir absorbant considérable. En effet, Dobcœreiner a observé que lorsqu'on fait arriver un courant d'hydrogène sur de la *mousse* de platine, le dégagement de chaleur est si considérable que le métal est porté au rouge et enflamme l'hydrogène. Le platine en fils fins, ou en lames minces, produit le même effet lorsqu'on multiplie suffisamment la surface de contact avec le gaz.

* 168. **Perméabilité et pouvoir absorbant des métaux à une température élevée; occlusion.** Portés à une température élevée, plusieurs métaux, comme le fer, le cuivre, l'or, l'argent, le platine, le palladium, acquièrent un grand pouvoir absorbant pour les gaz, et deviennent perméables pour plusieurs d'entre eux, surtout pour l'hydrogène.

C'est M. Henry Sainte-Claire Deville qui, le premier, en 1864, a fait voir que le fer et le platine, à la température rouge, se laissent traverser par l'hydrogène. Depuis, Graham a trouvé que la même propriété se manifeste à un plus haut degré encore dans le palladium à une température inférieure au rouge. De 240 degrés à une température voisine du rouge, l'hydrogène passe abondamment à travers un tube de palladium dans lequel on entretient le vide.

Une feuille de palladium forgé, qu'on maintient d'abord pendant trois heures à une température de 90 à 97 degrés, puis qu'on laisse refroidir lentement dans un courant d'hydrogène, absorbe de ce gaz 643 fois son volume ramené à zéro; même à la température ordinaire, le palladium absorbe 376 fois son volume d'hydrogène, pourvu qu'il ait été porté, dans le vide, à la chaleur rouge.

En fil, le cuivre chauffé au rouge absorbe, en volume, 80 pour 100 d'hydrogène; à l'état d'éponge, 60 pour 100.

Le gaz le plus absorbable par l'argent est l'oxygène. Le fer absorbe surtout l'oxyde de carbone, de 4 à 7 fois son volume, qu'ensuite il conserve indéfiniment. Cette absorption de l'oxyde de carbone par le fer doit nécessairement jouer un rôle important dans l'aciération.

Occlusion. — L'absorption stable d'un gaz par un solide se désigne sous le nom d'*occlusion*. On vient de voir que, dans le fer, cette occlusion s'élève à 7 fois son volume pour l'oxyde de carbone. Avec le platine et l'hydrogène, l'occlusion s'élève à 379 fois le volume du métal; celui-ci conserve le gaz à froid, mais le laisse dégager lorsqu'on le porte à une très-haute température.

D'après la réduction de volume considérable que subissent l'hydrogène, l'oxygène et l'oxyde de carbone dans leur occlusion par les métaux, surtout si l'on tient compte de la portion de volume occupée par les molécules du métal, Graham admet que ces gaz, quoiqu'au nombre des gaz qui n'ont jamais été liquéfiés (129), existent à l'état liquide dans les métaux, ou à un état de combinaison solide. D'après M. Fabre, l'hydrogène, dans le palladium saturé, est à l'état de combinaison chimique.

Ne pouvant donner ici plus de développement à la diffusion et à l'occlusion des gaz, nous renvoyons le lecteur à la *Physique moléculaire* de l'abbé Moigno, ainsi qu'à une conférence de M. Ed. Becquerel, et à deux de M. Odling, dans la *Revue des cours scientifiques* (nos du 13 janvier 1866, et des 15 juin et 14 décembre 1867).

169. **Absorption des gaz par les liquides.** — L'eau et plusieurs liquides sont doués de la propriété de se laisser pénétrer par les gaz. Mais, dans les mêmes conditions de température et de pres-

sion, un même liquide n'absorbe pas des quantités égales de gaz différents. A la température moyenne de 10 degrés et à la pression 0^m,76, l'eau dissout 25 millièmes de son volume d'azote, 46 millièmes du même volume d'oxygène, un volume égal au sien d'acide carbonique, et 670 fois son volume de gaz ammoniac. Le mercure paraît se refuser entièrement à la pénétration des gaz.

L'expérience démontre que l'absorption des gaz par les liquides a lieu conformément aux lois suivantes :

1^o *Pour un même gaz, un même liquide et une même température, le poids de gaz absorbé est proportionnel à la pression; c'est-à-dire qu'à toutes les pressions, le volume dissous est le même, ou encore que la densité du gaz absorbé est dans un rapport constant avec celle du gaz extérieur non absorbé.*

2^o *La quantité de gaz absorbée est d'autant plus grande, que la température est plus basse, c'est-à-dire que la force élastique du gaz est moindre.*

3^o *La quantité de gaz qu'un liquide peut dissoudre est indépendante de la nature et de la quantité des autres gaz qu'il tient déjà en dissolution.*

En effet, si, au lieu d'un seul fluide élastique, l'atmosphère supérieure au liquide en contient plusieurs, on trouve que chacun de ces gaz, quel qu'en soit le nombre, se dissout dans la même proportion que s'il était seul, en tenant compte toutefois de la pression qui lui est propre. Par exemple, l'oxygène ne formant sensiblement que $\frac{1}{5}$ de l'air, l'eau, dans les conditions ordinaires, absorbe précisément la même quantité d'oxygène que si l'atmosphère était tout entière formée de ce gaz, sous une pression égale à $\frac{1}{5}$ de celle de l'atmosphère.

D'après la première loi, lorsque la pression diminue, la quantité de gaz dissoute doit décroître. En effet, en plaçant une dissolution gazeuse sous la cloche de la machine pneumatique et en faisant le vide, on voit le gaz obéir à sa force expansive et se dégager en bulles. On obtient le même effet par l'élévation de température, car la force élastique du gaz dissous augmente; ou encore, lorsque la dissolution gazeuse est placée dans une atmosphère indéfinie qui ne contient pas les gaz en dissolution, la présence des gaz extérieurs retardant seulement la diffusion des gaz dissous, mais ne l'empêchant pas.

170. **Coefficient d'absorption.** — On nomme *coefficient d'absorption* ou de *solubilité* d'un gaz par rapport à un liquide, le rapport du volume de gaz qui se dissout au volume du liquide, le gaz et le liquide étant à zéro, et le volume du gaz absorbé étant ramené à la pression qu'il exerce sur le liquide.

Le coefficient d'absorption varie avec les gaz et les liquides; mais, pour un même gaz et un même liquide, si la température est constante, il est invariable, quelle que soit la pression. Toutefois, si le volume du gaz absorbé est constant, il n'en est pas de même de son poids, qui est toujours proportionnel au coefficient d'absorption du gaz, à sa densité et à la pression.

171. **Problèmes sur les mélanges des gaz et des liquides.** — Comme application de la première loi des mélanges des gaz et des liquides, soit proposé de calculer quelle est la composition, en volume, de l'air en dissolution dans l'eau, à la température moyenne de 10 degrés, le coefficient d'absorption de l'oxygène à cette température étant 0,046, et celui de l'azote 0,025. Pour cela, soit H la pression atmosphérique; l'air contenant, sur 100 parties en volume, 21 parties d'oxygène et 79 d'azote, la pression de l'oxygène, considéré seul, est $\frac{21H}{100}$, et celle

de l'azote $\frac{79H}{100}$. Les volumes de ces deux gaz contenus dans l'eau sont donc

entre eux comme les produits $\frac{21H}{100} \times 0,046$ et $\frac{79H}{100} \times 0,025$; ou, en effectuant

les calculs et simplifiant, comme les nombres 966 et 1975. Or la somme de ces deux nombres étant 2941, si l'on représente par x le volume d'oxygène contenu dans 100 parties d'air dissous, on a $\frac{x}{100} = \frac{966}{2941}$, d'où $x = 32,84$. L'air dissous

dans l'eau est donc beaucoup plus riche en oxygène que l'air atmosphérique, puisqu'il en contient près de 33 pour 100.

172. **Équilibre des fluides dont les diverses parties n'ont pas la même densité.** — L'équilibre ne peut exister dans une masse fluide, soit liquide, soit gazeuse, qu'autant que la pression étant la même sur tous les points de chaque tranche horizontale (82), il en est de même de la densité; autrement, les parties les moins denses s'élèvent dans la masse fluide, à la manière des corps flottants (99), et les plus denses s'abaissent. Par conséquent, pour qu'une masse fluide demeure en équilibre, il faut : 1^o que la densité soit la même pour tous les points d'une couche horizontale; 2^o pour que l'équilibre soit stable, les couches fluides doivent être disposées par ordre de densités croissantes de haut en bas (90).

Les gaz et les liquides étant très-dilatables, leur densité décroît rapidement quand la température augmente; par suite, la deuxième condition ci-dessus ne peut être satisfaite, pour les liquides du moins, qu'autant que les couches inférieures sont plus froides que les couches supérieures. Mais pour les gaz, qui sont très-compressibles, il n'est pas nécessaire que les couches supérieures soient plus chaudes que les inférieures; car ces dernières, étant plus comprimées, tendent à être plus denses. Il suffit que la densité augmente plus par la pression dans les couches inférieures qu'elle ne décroît par l'élévation de la température: c'est ce qui a lieu, en général, dans l'atmosphère.

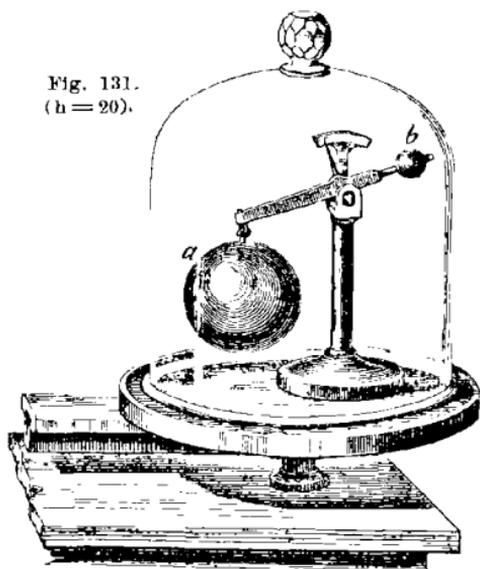
Les courants qui naissent dans une masse fluide, par l'effet des différences de densité dues aux différences de température d'une couche à l'autre, ont reçu leur application dans le tirage des cheminées et dans les appareils de chauffage par circulation d'eau chaude. Nous donnerons ces applications après avoir fait connaître la dilatation des liquides et des gaz (460 et 464).

CHAPITRE IV

PRESSIONS SUPPORTÉES PAR LES CORPS PLONGÉS DANS L'AIR, AÉROSTATS

173. Principe d'Archimède appliqué au gaz; baroscope. — On a vu (135) que les raisonnements qui ont conduit au principe d'Archimède pour les liquides

Fig. 131.
(h = 20).



s'appliquent mot à mot aux gaz; d'où l'on conclut que tout corps plongé dans l'atmosphère y perd une partie de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace.

Cette perte de poids dans l'air se démontre au moyen du *baroscope*, appareil qui consiste en un fléau de balance portant à l'une de ses extrémités une petite masse de plomb *b*, et à l'autre une sphère de cuivre creuse *a*, dont le volume est environ d'un demi-décimètre cube (fig. 131). Dans

l'air, les deux corps se font équilibre; mais si l'on place l'appareil sous le récipient de la machine pneumatique, et si l'on fait le vide, on voit le fléau incliner vers la grosse sphère, ainsi que le montre la figure, ce qui indique qu'en réalité elle pèse plus que la petite masse de plomb; car actuellement elles ne supportent l'une et l'autre aucune pression, et n'obéissent qu'à la pesanteur. Donc, dans l'air, la sphère perdait une certaine partie de son poids. Si l'on veut vérifier que cette perte est bien égale au poids

de l'air déplacé, on mesure le volume de la sphère, que nous supposons égal à un demi-litre. Le poids d'un pareil volume d'air étant $0^{\text{r}},65$ (132), on attache à la petite masse de plomb un poids égal : l'équilibre, qui avait lieu auparavant dans l'air, est alors rompu; mais dans le vide il se rétablit.

Le principe d'Archimède étant vrai pour les corps plongés dans l'air, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit des corps plongés dans les liquides (99); c'est-à-dire que lorsqu'un corps est plus pesant que l'air, il tombe, en vertu de l'excès de son poids sur la poussée du fluide. S'il est de même densité que l'air, son poids et la poussée de bas en haut se font équilibre, et le corps flotte dans l'atmosphère. Enfin, si le corps est moins dense que l'air, c'est la poussée qui l'emporte, et le corps s'élève dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'il rencontre des couches d'air de même densité que lui. La force d'ascension est alors égale à l'excès de la poussée sur le poids du corps. Telle est la cause qui fait que la fumée, les vapeurs, les nuages, les aérostats, s'élèvent dans l'atmosphère.

174. **Correction des pesées faites dans l'air.** — Les corps perdant dans l'air une partie de leur poids égale au poids de l'air qu'ils déplacent, lorsqu'on pèse un corps dans une balance, ce n'est pas son poids réel, c'est-à-dire dans le vide, qu'on obtient, mais seulement son poids apparent, à moins toutefois que le volume du corps ne soit précisément le même que celui des poids gradués qui lui font équilibre, car alors il y a perte égale des deux côtés.

Pour déduire du poids apparent d'un corps son poids réel, soient p son poids réel en kilogrammes, et d sa densité; $\frac{p}{d}$ sera le volume du corps en litres, d'après la formule connue $P = VD$, et le poids d'un litre d'air étant $0^{\text{r}},001293$, celui de l'air déplacé par le corps est $0^{\text{r}},001293 \times \frac{p}{d}$. Donc son poids apparent est

$$p - 0^{\text{r}},001293 \times \frac{p}{d} = p \left(1 - \frac{0^{\text{r}},001293}{d} \right).$$

En représentant par P les poids gradués qui font équilibre au corps, par D la densité de leur substance, on trouve de même que leur poids apparent est $P \left(1 - \frac{0^{\text{r}},001293}{D} \right)$. Mais ces deux poids apparents sont égaux, donc on a

$$p \left(1 - \frac{0^{\text{r}},001293}{d} \right) = P \left(1 - \frac{0^{\text{r}},001293}{D} \right).$$

équation qui donne la valeur de p .

Dans la solution de ce problème on a supposé la pesée faite à zéro et à la pression $0^{\text{m}},76$. Pour résoudre la question dans toute sa généralité, on doit tenir compte non-seulement des variations de température et de pression, mais même de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère; car elle modifie le poids de l'air déplacé. Cette rigueur dans les pesées n'est pas indispensable quand on pèse des corps très-lourds, comme des métaux; mais elle le devient quand on pèse des gaz ou des vapeurs; aussi cette question sera-t-elle reprise quand on aura vu la dilatation des gaz (319).

AÉROSTATS

175. Invention des aérostats. — Les *aérostats*, ou *ballons*, sont des globes d'étoffe légère et imperméable, qui, remplis d'air chaud ou de gaz hydrogène, s'élèvent dans l'atmosphère en vertu de leur légèreté relative.

L'invention des aérostats est due aux frères Étienne et Joseph Montgolfier, fabricants de papier dans la petite ville d'Annonay, où le premier essai eut lieu le 5 juin 1783. Ce premier ballon était un globe de toile doublé de papier, ayant 36 mètres de circonférence et pesant 250 kilogrammes. Ouvert à la partie inférieure, il fut gonflé d'air chaud, en brûlant au-dessous du papier, de la laine, de la paille mouillée.

« A cette nouvelle, écrivait l'académicien Lalande, nous dîmes tous : Cela doit être; comment n'y a-t-on pas pensé? » On y avait bien pensé; mais il y a loin de la conception d'une idée à sa réalisation. Black, professeur de physique à Édimbourg, avait annoncé dans ses cours, en 1767, qu'une vessie remplie d'hydrogène s'élèverait naturellement dans l'atmosphère; mais il ne fit jamais l'expérience, la regardant comme purement amusante. Enfin Cavallo, en 1782, avait communiqué à la Société royale de Londres des expériences qu'il avait faites, et qui consistaient à remplir d'hydrogène des bulles de savon qui s'élevaient d'elles-mêmes dans l'atmosphère, le gaz qui les remplissait étant plus léger que l'air.

Quoi qu'il en soit, les frères Montgolfier ne connaissaient pas l'expérience de Cavallo, ni celle de Black, lorsqu'ils firent leur découverte. Comme ils employèrent exclusivement l'air chaud pour remplir leur ballon, on a donné le nom de *montgolfières* aux ballons à air chaud, pour les distinguer des aérostats à hydrogène, les seuls usités aujourd'hui.

Charles, professeur de physique à Paris, mort en 1823, substitua le gaz hydrogène à l'air chaud. Le 27 août 1783, un ballon ainsi gonflé fut lancé au Champ-de-Mars. « Jamais, écrit Mercier, leçon de physique ne fut donnée devant un auditoire plus nombreux et plus attentif. »

Depuis, un nombre considérable d'ascensions ont été exécutées. Celle que fit Gay-Lussac, en 1804, fut la plus remarquable par les faits dont elle a enrichi la science, et par la hauteur qu'atteignit le célèbre physicien, hauteur qui fut de 7 016 mètres au-dessus du niveau des mers. A cette hauteur, le baromètre était descendu à 32 centimètres, et le thermomètre centigrade, qui marquait 31 degrés à la surface du sol, était à 9°,5 au-dessous de zéro.

Dans ces hautes régions, la sécheresse était telle, le jour de l'ascension de Gay-Lussac, en juillet, que les substances hygrométriques, telles que le papier, le parchemin, se desséchaient et se tordaient, comme si on les eût présentées au feu. La respiration et la circulation du sang s'accéléraient à cause de la grande raréfaction de l'air : Gay-Lussac a constaté que son pouls faisait alors 120 pulsations, au lieu de 66, qui était son état normal. A cette grande hauteur, le ciel prend une teinte bleue très-foncée, tirant sur le noir, et un silence absolu et solennel entoure l'aéronaute.

Parti de la cour du Conservatoire des arts et métiers, Gay-Lussac descendit auprès de Rouen, au bout de six heures, ayant fait environ 30 lieues.

Une ascension remarquable est celle que firent à Londres, en 1862, MM. Coxwell et Glaisher.

A la hauteur de 9 200 mètres, la raréfaction de l'air devint telle, et le froid si intense, que M. Glaisher tomba en faiblesse, ne pouvant soutenir ni ses bras ni sa tête, ne distinguant plus ses instruments et ayant perdu l'usage de la parole. M. Coxwell, qui avait conservé plus de force, put encore observer le baromètre et le thermomètre, et si, dans un pareil moment, ses observations ont pu être précises, le ballon avait atteint la hauteur de 10 460 mètres, et le thermomètre était descendu à -27 degrés. Voici les températures observées par les deux aéronautes :

m		m
▲ 3 000.	0°	▲ 8 000. — 19°
4 800. — 8		8 850. — 21
6 400. — 13		10 460. — 27

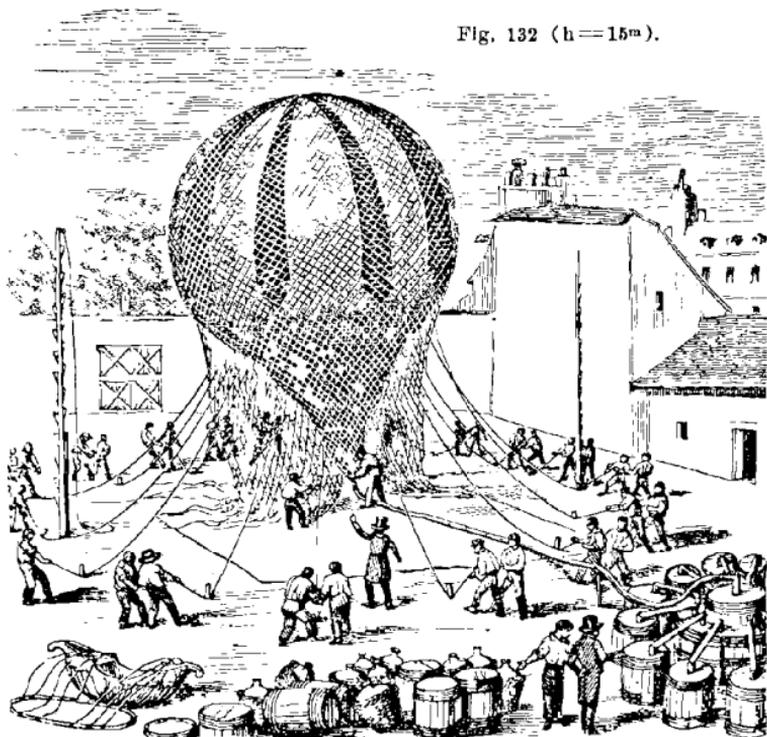
176. Construction, remplissage et ascension des aérostats. — L'enveloppe des aérostats est formée de longs fuseaux de taffetas cousus ensemble et enduits d'un vernis au caoutchouc qui rend le tissu imperméable au gaz. Au sommet du ballon est une soupape fermée par un ressort, et que l'aéronaute peut ouvrir à volonté à l'aide d'une corde. Une nacelle d'osier, dans laquelle peuvent se placer plusieurs personnes, pend au-dessous du ballon, soutenue par un filet de corde qui enveloppe celui-ci en entier.

Un ballon de dimension ordinaire, pouvant enlever facilement trois personnes, a environ 15 mètres de hauteur et 11 mètres de diamètre; son volume, quand il est gonflé complètement, est de près de 700 mètres cubes, et l'enveloppe pèse 100 kilogrammes. On gonfle les ballons, soit avec l'hydrogène pur, soit avec le gaz d'éclairage. Bien que ce dernier gaz soit plus dense que le premier, on l'emploie généralement aujourd'hui, parce qu'on l'obtient plus facilement et à meilleur compte que l'hydrogène pur.

Il suffit, en effet, de le faire arriver de l'usine à gaz la plus voisine jusqu'à l'aérostat, au moyen d'un conduit de toile gommée.

La figure 132 représente un ballon gonflé d'hydrogène pur. Sur la droite du dessin est une suite de tonneaux dans lesquels sont des copeaux de fer, de l'eau et de l'acide sulfurique, substances nécessaires pour la préparation de l'hydrogène. De chaque tonneau

Fig. 132 (h = 15^m).



le gaz se rend sous un tonneau central, défoncé à la partie inférieure et plongeant dans une cuve remplie d'eau. Le gaz, après s'être lavé dans cette eau, se rend dans l'aérostat par un long tube de toile, fixé par un bout au tonneau central, et par l'autre à l'aérostat. A mesure que le ballon se remplit, des hommes le retiennent au moyen de cordes fixées au filet. Il ne reste plus qu'à enlever le tube qui a servi à amener le gaz. L'aéronaute se place enfin dans la nacelle; au cri de *lâchez tout!* on lâche les cordes, et le ballon s'élève avec une vitesse d'autant plus grande, qu'il est plus léger par rapport à l'air déplacé (fig. 133).

Il importe de ne pas gonfler un ballon complètement; car la

pression atmosphérique diminuant à mesure qu'il s'élève, le gaz intérieur se dilate et tend à le faire crever.

Il suffit que la force d'ascension, c'est-à-dire l'excès du poids de l'air déplacé sur le poids total de l'appareil, soit de 4 à 5 kilogrammes. Il est à remarquer que cette force reste constante tout le temps que le ballon n'est pas complètement gonflé par la dilatation du gaz intérieur. En effet, si la pression atmosphérique est devenue, par exemple, deux fois plus petite, le gaz de l'aérostat, d'après la loi de Mariotte, a doublé de volume. Il en résulte que le volume d'air déplacé est lui-même devenu deux fois plus grand; d'ailleurs sa densité est deux fois moindre; donc son poids, et, par suite, la poussée de bas en haut, n'ont pas changé. Mais une fois que le ballon est complètement gonflé, s'il continue à s'élever, la force d'ascension décroît; car, le volume d'air déplacé restant le même, sa densité diminue. Il vient donc un moment où la poussée est égale au poids du ballon. Celui-ci ne fait alors que suivre une direction horizontale, emporté par les courants d'air qui régnent dans l'atmosphère.

Ce n'est que d'après les indications du baromètre que l'aéronaute sait s'il monte ou s'il descend. Dans le premier cas, la colonne de mercure s'abaisse; elle s'élève dans le second. C'est à l'aide du même instrument qu'il évalue la hauteur à laquelle il se trouve. Une longue banderole fixée à la nacelle (fig. 133) indique aussi, par la position qu'elle prend au-dessous ou au-dessus de celle-ci, si l'on monte ou si l'on descend.

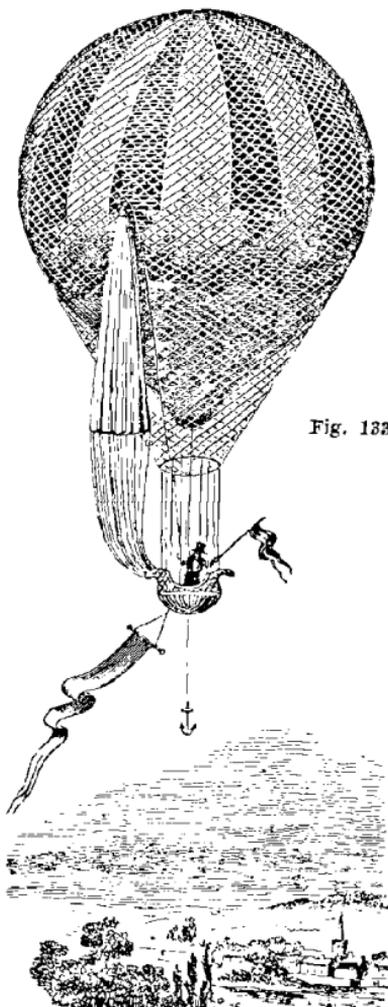


Fig. 133.

Lorsque l'aéronaute veut opérer sa descente, il tire la corde qui ouvre la soupape placée à la partie supérieure du ballon; l'hydrogène se mélange alors avec l'air extérieur, et le ballon baisse. Pour ralentir la descente, lorsqu'elle est trop rapide, ou

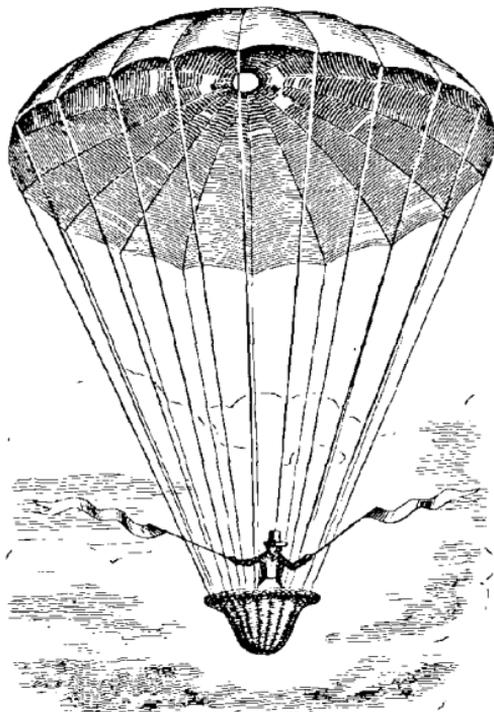


Fig. 134.

pour remonter, si elle s'effectue dans un endroit périlleux, l'aéronaute vide des sacs de toile pleins de sable, dont il a soin de se munir en quantité suffisante. Ainsi allégé, le ballon s'élève de nouveau pour descendre ensuite dans un lieu plus propice.

On a essayé de bonne heure à utiliser les aérostats. A la bataille de Fleurus, en 1794, on fit usage d'un ballon captif, c'est-à-dire retenu par une corde, dans lequel était placé un observateur qui faisait connaître par des signaux les mouvements de l'ennemi. Plusieurs ascensions ont aussi été entreprises dans le but de faire des observations météorologiques dans les hautes régions de l'atmosphère. Enfin, on connaît les applications des aérostats pendant le siège de Paris; mais ils ne pourront être d'une véritable utilité que le jour où l'on pourra les diriger. Les tentatives faites jusqu'ici dans ce but ont complètement échoué.

On n'a aujourd'hui d'autre ressource que de s'élever jusqu'à ce qu'on rencontre un courant d'air qui porte plus ou moins dans la direction qu'on veut suivre.

177. Parachute. — Le *parachute* a pour objet de permettre à l'aéronaute d'abandonner son ballon, en ralentissant la vitesse de chute. Cet appareil est formé d'une vaste toile circulaire (fig. 134) d'environ 5 mètres de diamètre, qui, par l'effet de la résistance de l'air, s'étend en forme d'un vaste parapluie, et ne tombe que lentement. Sur le contour sont fixées des cordes qui soutiennent une nacelle où se place l'aéronaute. Au centre du parachute est une ouverture par laquelle s'échappe l'air comprimé par l'effet de la descente; autrement il se produit des oscillations qui se communiquent à la nacelle et peuvent être dangereuses.

Dans la figure 133, on voit, sur le côté du ballon, un parachute plié et attaché au filet au moyen d'une corde passant sur une poulie pour venir se fixer à une petite nacelle placée dans la grande. Il suffit de lâcher cette corde pour que le parachute et sa nacelle abandonnent l'aérostat.

C'est J. Garnerin qui, le premier, descendit en parachute; mais c'est Blanchard qui paraît en être l'inventeur.

178. Calcul du poids que peut enlever un ballon. — Pour calculer le poids que peut enlever un ballon dont les dimensions sont données, supposons-le parfaitement sphérique, et rappelons que les formules qui donnent le volume

et la surface de la sphère en fonction du rayon sont $V = \frac{4\pi R^3}{3}$, et $S = 4\pi R^2$,

π étant le rapport de la circonférence au diamètre et égal à 3,1416. Le rayon R étant mesuré en décimètres, soient, en kilogrammes, p le poids du mètre carré du taffetas dont le ballon est formé, P le poids de la nacelle et de ses accessoires, a le poids d'un litre d'air à zéro et à la pression 0,76, et a' le poids d'un litre d'hydrogène dans les mêmes conditions. Le poids total de l'enveloppe, en kilogrammes, est représenté

par $\frac{4\pi R^2 p}{100}$; celui de l'hydrogène par $\frac{4\pi R^3 a'}{3}$; et celui de l'air déplacé par $\frac{4\pi R^3 a}{3}$:

c'est la poussée. En représentant par X le poids que le ballon peut porter, on a donc

$$X = \frac{4\pi R^3 a}{3} - \frac{4\pi R^3 a'}{3} - \frac{4\pi R^2 p}{100} - P,$$

$$\text{ou } X = \frac{4\pi R^3}{3} (a - a') - \frac{4\pi R^2 p}{100} - P.$$

Toutefois, comme on l'a vu ci-dessus, afin que le ballon s'élève, on doit prendre pour X une valeur plus petite de 5 kilogrammes environ que celle obtenue par cette équation. Il y a aussi, en général, des corrections de température et de pression à faire aux poids de l'air et de l'hydrogène; enfin on doit tenir compte de ce que le ballon n'est jamais complètement gonflé au départ, ce qui revient à

lui donner un volume moindre que celui calculé par la formule $\frac{4\pi R^3}{3}$.

CHAPITRE V

APPAREILS FONDÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'AIR

179. **Machine pneumatique.** — La *machine pneumatique* sert à faire le vide dans un espace donné, ou, plus rigoureusement, sert à raréfier l'air, car elle ne peut donner le vide absolu.

Cette machine a été inventée par Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg, en 1650, peu d'années après l'invention du baromètre. Ce physicien ne donna à sa machine qu'un seul corps de pompe. C'est Hawksbee, physicien anglais, qui, le premier, adopta deux corps de pompe, et rendit ainsi la manœuvre de la machine plus prompte et moins pénible; car les pressions exercées par l'atmosphère sur les deux pistons se faisant équilibre, on n'a à vaincre que la différence des pressions exercées en dessous des pistons par la tension de l'air qui se trouve dans les corps de pompe.

La figure 135 donne une vue perspective d'une machine pneumatique à deux corps de pompe. Les figures 136 à 142 en donnent des coupes et projections suivant différents plans; dans toutes, les mêmes pièces sont désignées par les mêmes lettres.

La machine se compose d'une épaisse plate-forme de laiton VGL (fig. 136), fixée horizontalement sur une table. A une de ses extrémités sont solidement mastiqués deux cylindres de cristal, dans lesquels sont deux pistons de cuir P, P'; ces cylindres sont les *corps de pompe*. A l'autre extrémité, la plate-forme se termine par une *platine* V, sur laquelle est mastiquée une glace de verre dépolie et bien dressée. C'est sur celle-ci que se place le *réceptif* R, dans lequel on fait le vide. Au centre de la platine est une tubulure *n*, à pas de vis, sur laquelle on adapte à volonté des ballons de verre à robinet, ou tous autres vases dans lesquels on veut faire le vide. La communication entre le réceptif et les corps de pompe est établie par un conduit *nc* pratiqué dans la plate-forme, comme le montre la figure 136, qui est une coupe longitudinale de la machine. En arrivant aux corps de pompe, le conduit se bifurque pour atteindre leurs bases en *c* et en *d* (fig. 139).

La figure 137, qui représente une coupe verticale de la machine suivant les axes des deux cylindres, montre le mécanisme à l'aide duquel on imprime un mouvement alternatif aux pistons. A ceux-ci sont fixées des crémaillères K et H, dans lesquelles engrène un pignon X. En faisant tourner ce pignon alternativement en sens

contraire, au moyen d'une manivelle MN, une crémaillère monte et l'autre descend, et avec elles les pistons.

La figure 138 donne, sur une plus grande échelle, la coupe verticale de l'un des pistons. Il se compose de deux disques de

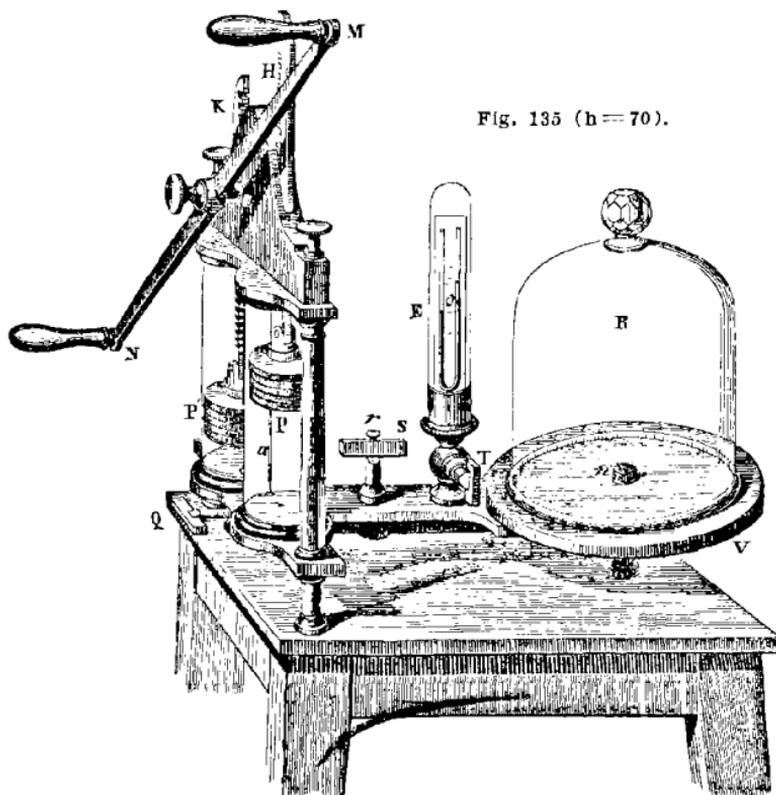


Fig. 135 (h=70).

laiton A et B, entre lesquels sont des rondelles de cuir ouvertes à leur centre et imbibées d'huile de pied de bœuf. Le disque B est surmonté d'une tubulure qui traverse toutes les rondelles, et sur cette tubulure est un pas de vis sur lequel se serre un écrou qui comprime fortement le disque A et les rondelles. Celles-ci, d'un diamètre un peu plus grand que les disques A et B, glissent à frottement doux contre les parois du corps de pompe, qu'elles ferment hermétiquement. Intérieurement à la tubulure centrale est vissée une pièce D, sur laquelle se fixe par un boulon la crémaillère qui fait mouvoir le piston. La pièce D est percée, dans toute sa hauteur, d'un conduit destiné à laisser passer l'air de la partie

inférieure du corps de pompe au-dessus du piston, et de là dans l'atmosphère, les corps de pompe n'étant pas fermés à leur partie supérieure. Enfin, au centre du disque B est un trou *i* fermé par une soupape métallique Z, qui ouvre de bas en haut. A cette soupape, représentée à gauche de la figure 138, est fixée une tige *e*

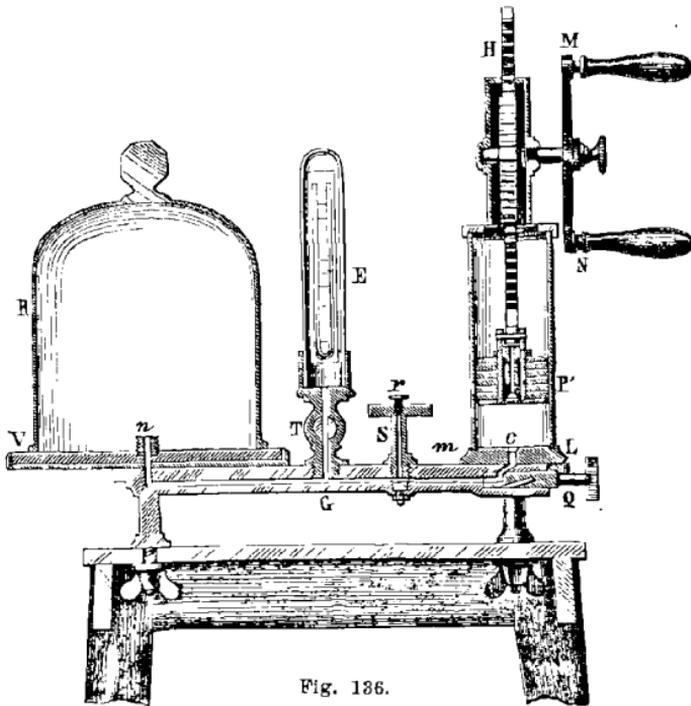


Fig. 136.

qui s'engage librement dans le conduit de la pièce D. Cette disposition a pour but d'empêcher la soupape de chavirer lorsqu'elle est soulevée. A la partie inférieure de la soupape est un disque de liège *x* qui s'applique sur l'orifice *i* et le ferme.

Outre la soupape Z placée à l'intérieur du piston, une soupape conique *s* sert à fermer, à la base du corps de pompe, l'orifice *c* du conduit *cn* qui se rend au récipient (fig. 136). Cette soupape est fixée à l'extrémité inférieure d'une tige de fer *a* (fig. 138), qui traverse tout le piston, et se prolonge jusqu'au sommet du corps de pompe. La tige *a* pouvant glisser à frottement dur dans les rondelles de cuir du piston, il en résulte que, lorsque celui-ci descend, il entraîne avec lui la tige de fer et fait fermer la soupape *s*; s'il monte, la tige et la soupape sont soulevées, mais d'une très-petite hauteur, parce que cette tige a une longueur telle, qu'elle vient

buter tout de suite contre le plateau supérieur du corps de pompe. Alors elle ne fait plus que glisser dans le piston, qui s'élève seul.

Pour compléter la description de la machine pneumatique, il nous reste à faire connaître l'usage de trois robinets T, S, Q, placés sur cette machine (fig. 135 et 136). Le robinet T sert à faire

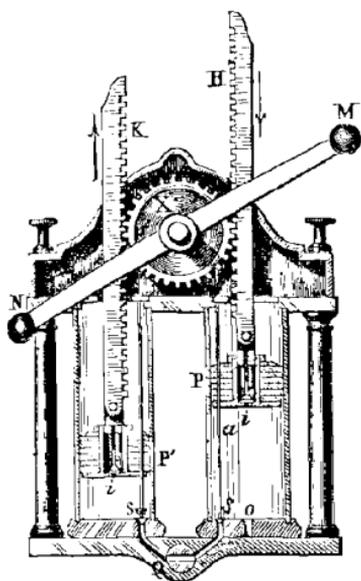


Fig. 137.

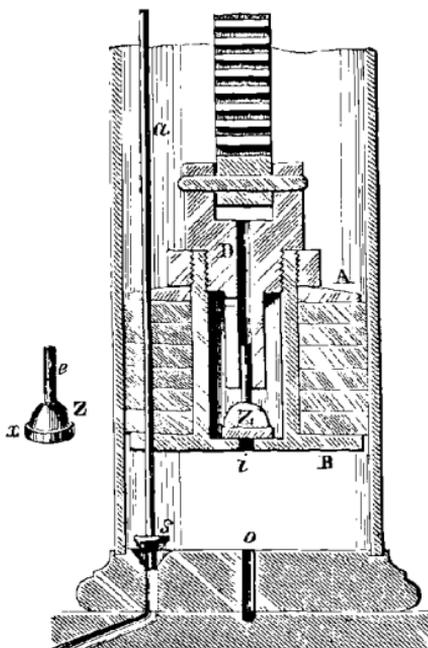


Fig. 138.

communiquer par le conduit *cn*, comme on le voit dans la figure 136, le récipient R avec une éprouvette E, qui sera décrite ci-après (180). Quant au robinet S, encore par le même conduit *cn*, il établit ou interrompt la communication entre le récipient et les corps de pompe. Lorsque ceux-ci fonctionnent, le robinet S doit être ouvert (fig. 136 et 139), et alors l'air est aspiré du récipient; mais une fois que le vide est fait dans ce dernier, comme l'air tend toujours à rentrer par les corps de pompe, on tourne le robinet S d'un quart de tour (fig. 141), et l'air ne peut plus pénétrer dans le récipient qu'en s'infiltrant entre ses bords et la platine. C'est pourquoi ces bords doivent être dressés avec soin pour obtenir le contact le plus parfait; mais cela serait insuffisant, il faut encore, avant de les appliquer sur la platine, les enduire de suif. Le récipient, ainsi disposé, *tient le vide* des mois entiers.

Le robinet S est percé, suivant son axe, d'un conduit dont on ferme hermétiquement l'orifice à l'aide d'un bouchon métallique *r*. Le vide étant fait dans le récipient, lorsqu'on veut y faire rentrer l'air, il suffit d'enlever le bouchon *r*. Le troisième robinet Q, placé entre les deux corps de pompe, est destiné à ce qu'on appelle le *double épuisement*, que nous décrivons ci-après.

Les différentes parties de la machine connues, voici comment elle fonctionne : soit d'abord le piston P' (fig. 137 et 138) au bas de sa course; à l'instant où l'on commence à faire marcher la manivelle, ce piston monte, entraînant avec lui la tige *a* et la soupape *s*, tandis que la soupape Z reste fermée par son propre poids et par celui de l'atmosphère. Si la soupape *s* restait fermée pendant l'ascension du piston, le vide se ferait au-dessous de celui-ci; mais la communication entre le corps de pompe et le récipient étant établie par cette soupape, une partie de l'air du récipient passe dans le corps de pompe et le remplit lorsque le piston est arrivé au haut de sa course. Si actuellement celui-ci s'abaisse, le jeu des soupapes est changé : la soupape *s* se fermant par la descente de sa tige, l'air qui est sous le piston ne peut retourner dans le récipient; mais se trouvant comprimé de plus en plus, à mesure que le piston descend, il acquiert bientôt une tension plus grande que la pression qui s'exerce sur la soupape Z. Celle-ci s'ouvre alors, et l'air qui est sous le piston s'échappe dans l'atmosphère par le conduit D. A un second coup de piston, la même série de phénomènes se renouvelle jusqu'à ce qu'on atteigne une limite où, quoiqu'il reste encore de l'air dans le récipient, la soupape du piston refuse de s'ouvrir, quand il arrive au bas de sa course. En effet, quelque bien exécutée que soit une machine, on ne peut éviter, au-dessous des soupapes et sur le contour du disque inférieur du piston, un *espace nuisible* où se loge une petite quantité d'air. Par suite, lorsque la raréfaction est poussée assez loin, il arrive un moment où, lors même que le piston vient s'appliquer sur la base du corps de pompe, l'air qui reste enfermé dans l'espace nuisible n'acquiert pas une tension suffisante pour soulever la soupape; à partir de cet instant la machine ne fonctionne plus. On verra ci-après (181), sous la dénomination de *double épuisement*, une disposition de robinet qui permet de pousser le vide plus loin, sans pouvoir toutefois donner le vide absolu.

Du reste, ce n'est pas seulement pratiquement, c'est aussi théoriquement que la machine pneumatique ne peut faire le vide absolu. En effet, le volume de chaque corps de pompe, diminué de celui du piston, étant, par exemple, de 1 litre, et celui du récipient de 20 litres, lorsque le piston est arrivé au haut de sa course,

le volume d'air, qui était 20, est 20 plus 1 ou 21 ; on extrait donc, à chaque coup de piston, seulement $\frac{1}{21}$ de la masse de l'air qui se trouve dans le récipient, et par conséquent on ne peut jamais enlever tout l'air qu'il contient.

180. Éprouvette. — Lorsque la machine a fonctionné un certain temps, on mesure la force élastique de l'air qui reste dans le récipient par la différence de niveau du mercure dans les deux branches d'un tube de verre recourbé en siphon, l'une d'elles étant fermée et l'autre ouverte, comme dans le baromètre. Ce petit instrument, qu'on nomme *éprouvette*, ou *baromètre tronqué*, parce que c'est un véritable baromètre à siphon qui a moins de 76 centimètres de hauteur, est fixé sur une échelle divisée en millimètres, et placé sous une cloche de cristal E (fig. 136), qui communique avec le récipient par le robinet T. Enfin, la branche fermée et la partie courbe du tube sont d'avance remplies de mercure.

Avant qu'on commence à aspirer l'air qui est sous le récipient, sa force élastique fait équilibre au poids de la colonne de mercure qui est dans la branche fermée, et celle-ci reste pleine; mais, à mesure que l'air est raréfié par le jeu des pistons, la force élastique diminue, et bientôt elle ne peut plus faire équilibre au poids de la colonne de mercure. Celle-ci baisse alors, et le mercure tend à se mettre de niveau dans les deux branches. Si l'on arrivait à faire le *vide absolu*, le niveau s'établirait exactement; car il n'y aurait de pression ni d'un côté ni de l'autre. Mais, avec les meilleures machines, le niveau reste toujours plus élevé d'un demi-millimètre au moins dans la branche fermée, ce qui indique que le *vide* n'est pas parfait, puisqu'il reste encore une quantité d'air dont la tension fait équilibre à une colonne de mercure d'un demi-millimètre. On dit alors qu'on a fait le *vide* à un demi-millimètre.

181. Robinet à double épuisement. — On nomme ainsi le robinet Q (fig. 135, 136 et 139 à 142), à cause de la modification qu'il apporte à la marche de la machine pour pousser la raréfaction de l'air beaucoup plus loin. Placé à la bifurcation du canal qui conduit l'air du récipient aux deux corps de pompe, il est percé, dans sa masse, de plusieurs conduits qu'on utilise successivement en le tournant dans deux positions rectangulaires.

Dans la figure 139, qui donne une coupe horizontale du robinet, il établit, par un conduit central et par deux conduits latéraux, la communication entre le récipient et les corps de pompe de *n* en *c* et en *d*, et la machine fonctionne alors comme il a été dit ci-dessus. Lorsqu'elle ne fonctionne plus, c'est-à-dire lorsque les soupapes Z refusent de s'ouvrir, on tourne le robinet Q de 90 degrés (fig. 141). A partir de ce moment, les communications sont chan-

gées, comme le montrent, en coupes horizontales, les figures 139 et 141, et, en coupes verticales, les figures 140 et 142. De nouveaux conduits du robinet correspondent maintenant à ceux de la plate-forme, et le corps de pompe de droite communique *seul* avec le récipient par le conduit *nmc* (fig. 141), tandis que celui de

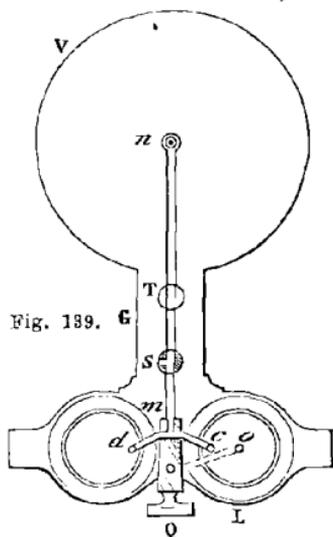


Fig. 139.

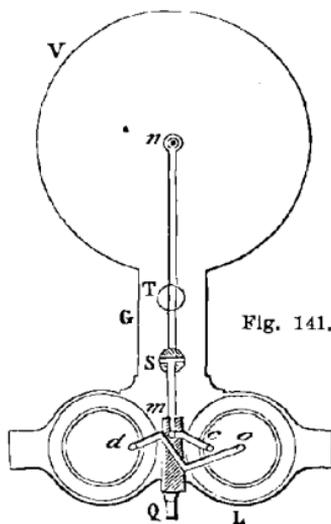


Fig. 141.

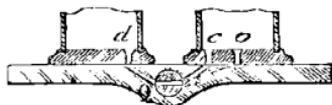


Fig. 140.



Fig. 142.

gauche se trouve mis en communication, par un conduit qui traverse obliquement le robinet, avec une ouverture centrale *o*, pratiquée à la base du corps de pompe de droite, et toujours ouverte.

Cela posé, le piston de droite, se soulevant, aspire l'air du récipient; mais, lorsqu'il descend, l'air qui vient d'être aspiré est refoulé dans le corps de pompe de gauche par les orifices *o* et *d*, ce dernier étant alors ouvert, puisque la soupape conique qui lui correspond est soulevée. Lorsque ensuite le piston de droite remonte, celui de gauche s'abaisse; mais l'air qui est au-dessous ne retourne pas dans le corps de pompe de droite, parce que l'orifice *d* est maintenant fermé par la soupape conique. Le piston de droite continuant ainsi à aspirer l'air du récipient et à le refouler dans le corps de pompe de gauche, l'air s'accumule dans celui-ci, et finit par y prendre la tension suffisante pour soulever la soupape *Z* du

piston, ce qui était impossible avant que le robinet Q fût tourné. Ce n'est qu'en faisant ainsi usage du robinet à double épaulement qu'on arrive à faire le vide à un demi-millimètre.

182. **Modification de la machine pneumatique.** — M. Ducrétel, constructeur à Paris, a modifié récemment la machine pneumatique en adoptant des pistons pleins, et en plaçant les soupapes

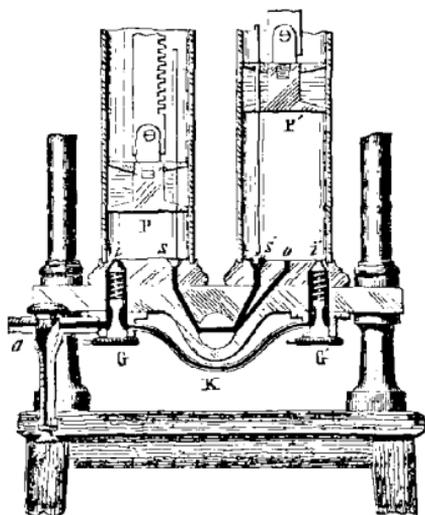


Fig. 143.

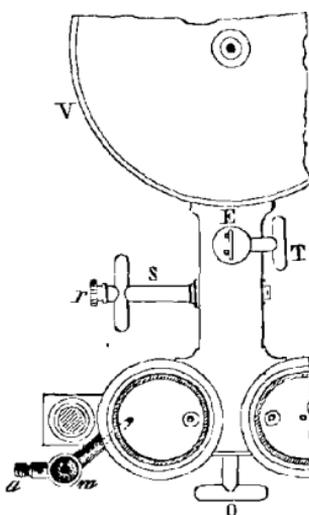


Fig. 144.

d'expulsion *ii'* dans les patins qui servent de base aux corps de pompe, rien n'étant changé aux soupapes d'aspiration et aux autres pièces de la machine (fig. 143 et 144).

Le premier avantage de cette disposition est de pouvoir retirer avec la plus grande facilité les soupapes *ii'* des cavités dans lesquelles elles sont placées : il suffit, en effet, de dévisser deux boutons *GG'* qui les maintiennent à l'aide de ressorts à boudin ; tandis que, dans la machine ordinaire, il faut démonter une partie des pièces et retirer les pistons des corps de pompe.

Un tube *K* met en communication les deux cavités qui contiennent les soupapes d'expulsion, et l'air refoulé s'échappe par un ajutage *a*. Une boîte *m* reçoit l'huile dont on recouvre les pistons, et qui s'infiltré toujours plus ou moins entre ceux-ci et les parois des corps de pompe. Avant de faire fonctionner la machine, on a soin de faire sortir l'huile de la boîte *m* en dévissant un bouton *n* placé à sa partie inférieure. Pour diminuer l'infiltration de l'huile entre les pistons et les parois des corps de pompe, il est utile, après que la machine a fonctionné, de faire rentrer

l'air sous les pistons, ce qui s'obtient à l'aide du robinet S (fig. 144).

Un second avantage de la machine nouvelle est qu'elle peut servir de machine de compression (187). Il suffit, pour cela, de relier par un raccord le récipient dans lequel on veut comprimer l'air à l'ajutage *a*. On peut ainsi aller jusqu'à 5 atmosphères.

183. Usages de la machine pneumatique; fontaine dans le vide.

— On a déjà fait connaître un grand nombre d'expériences faites

Fig. 145.

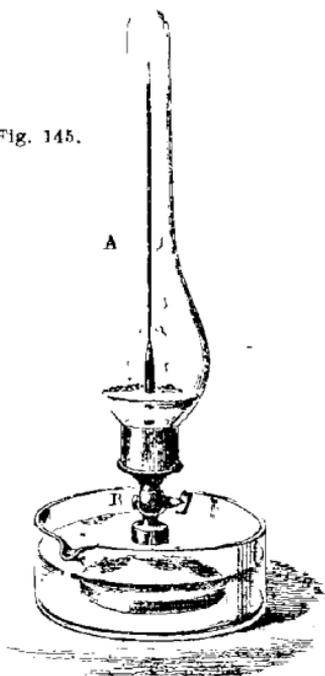
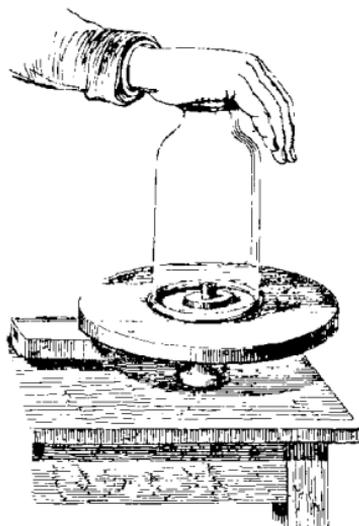


Fig. 146.



à l'aide de la machine pneumatique. Telles sont celles de la pluie de mercure (16), de la chute des corps dans le vide (56), de la vessie dans le vide (131), du crève-vessie (139), des hémisphères de Magdebourg (139) et du baroscope (173).

La machine pneumatique sert encore à démontrer que l'air, par l'oxygène qu'il contient, est nécessaire à l'entretien de la combustion et de la vie. En effet, si l'on place sous le récipient un corps enflammé, une bougie, par exemple, on voit la flamme pâlir à mesure qu'on fait le vide, puis s'éteindre. Les mammifères et les oiseaux périssent presque instantanément dans le vide. Les poissons et les reptiles supportent beaucoup plus longtemps la privation de l'air. Les insectes vivent plusieurs jours dans le vide.

Dans le vide, les substances fermentescibles se conservent sans

altération pendant un temps très-long, n'étant pas en contact avec l'oxygène, qui est nécessaire à la fermentation. Des aliments renfermés dans des boîtes hermétiquement closes, d'où l'on a chassé l'air, se conservent plusieurs années.

La *fontaine dans le vide* est un globe de verre A (fig. 145), très-allongé et muni à sa base d'une garniture à robinet, avec une tubulure qui s'élève à l'intérieur. Ayant vissé ce globe sur la machine pneumatique, et fait le vide, on ferme le robinet, puis on porte l'appareil dans un vase R contenant de l'eau. Ouvrant alors le robinet, la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau la fait jaillir par la tubulure, comme le montre le dessin.

Enfin, la figure 146 représente une expérience qui montre l'effet de la pression atmosphérique sur le corps humain. Un manchon de verre, ouvert à ses deux extrémités, étant posé sur la platine de la machine, on place la paume de la main sur ses bords, et une autre personne fait le vide. Alors la pression atmosphérique ne se faisant plus équilibre sur les deux faces de la main, celle-ci est fortement pressée sur les bords du manchon, et ce n'est qu'avec effort qu'on peut l'en retirer. De plus, l'élasticité des fluides que contiennent les organes n'étant plus contre-balancée par le poids de l'atmosphère, la paume de la main se gonfle, et le sang tend à sortir par les pores.

184. **Problèmes sur la machine pneumatique.** — I. Calculer la tension de l'air sous le récipient de la machine pneumatique après n coups de piston.

Solent V le volume du récipient, v celui du corps de pompe, déduction faite de l'espace occupé par le piston, et H la pression atmosphérique extérieure. La machine n'ayant pas encore fonctionné, et le piston étant au bas de sa course, on a sous le récipient un volume d'air V à la pression H . Or, lorsque le piston est arrivé au haut de sa course, ce volume devient $V+v$, et la tension H prend une valeur H' qu'on détermine en posant, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{H'}{H} = \frac{V}{V+v}, \text{ d'où } H' = H \frac{V}{V+v}.$$

Lorsque le piston s'abaisse, le volume d'air v est expulsé, et l'on a sous le récipient le même volume d'air V , mais à la tension H' . Puis à la deuxième ascension du piston, le volume d'air devient de nouveau $V+v$ à une tension H'' telle, que, comme ci-dessus, $H'' = H' \frac{V}{V+v} = H \left(\frac{V}{V+v} \right)^2$.

À la troisième ascension du piston, on trouve de même que la pression sous le récipient est $H \left(\frac{V}{V+v} \right)^3$, et ainsi de suite; d'où l'on conclut qu'après le $n^{\text{ième}}$ coup de piston elle est enfin $H \left(\frac{V}{V+v} \right)^n$ [1].

L'expression $\frac{V}{V+v}$ est nécessairement une fraction, et l'on sait que les puissances d'une fraction sont d'autant plus petites, que le degré en est plus élevé. Par suite, d'après la formule [1], plus n sera grand, plus la force élastique sous le récipient sera petite; mais ce n'est que lorsque n sera infini, que la fraction

$\left(\frac{V}{V+v}\right)^n$ sera nulle. D'où l'on conclut que théoriquement, comme pratiquement, il est impossible de faire le vide absolu avec la machine pneumatique.

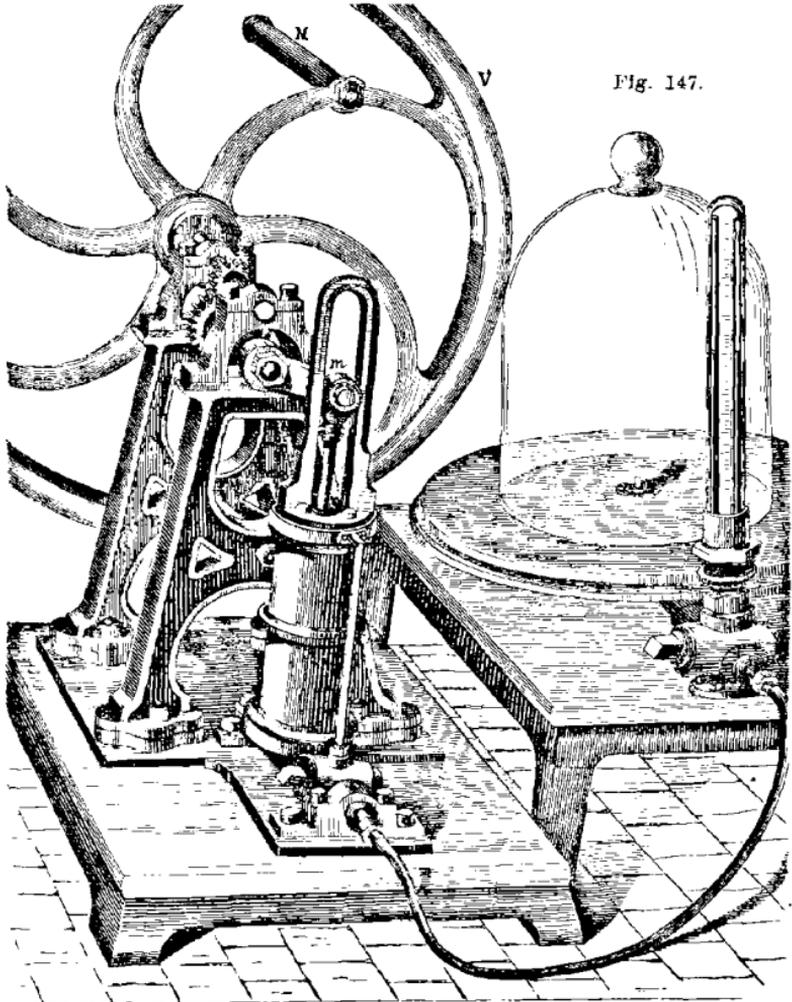


Fig. 147.

II. Calculer le poids de l'air qui reste sous le récipient après n coups de piston.

Cette question est facile à résoudre en s'appuyant sur la formule [1] ci-dessus. En effet, soient P le poids de l'air sous le récipient avant que la machine ait fonctionné, et p ce poids après n coups de piston. Les poids étant proportionnels aux pressions, on a

$$\frac{p}{P} = \frac{H \left(\frac{V}{V+v}\right)^n}{H}, \text{ ou } \frac{p}{P} = \left(\frac{V}{V+v}\right)^n, \text{ d'où } p = P \left(\frac{V}{V+v}\right)^n.$$

Quant à P, on sait déjà (159, prob. III) que sa valeur est donnée par la formule

$$P = \frac{187,293 \times H \times V}{76}$$

$$\text{Donc } p = \frac{187,293 \times H \times V}{76} \left(\frac{V}{V+v} \right)^n [2].$$

Dans la solution de cette question, on a supposé que la température était constamment zéro. Si elle variait, on verra, en traitant de la dilatation des gaz, la modification à apporter à la formule [2].

* 185. **Machine pneumatique à double effet de Bianchi.** M. Bianchi, constructeur à Paris, a adopté un système de machine pneumatique qui présente plusieurs avantages. Cette machine, qui est toute de fonte, n'a qu'un seul cylindre, oscillant sur un axe horizontal fixé à sa base (fig. 147). Sur un bâti de fonte est monté un arbre horizontal, avec un volant très-lourd V, qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle M. A ce même arbre est fixée une manivelle m qui s'articule à la tête de la tige du piston. Par suite, à chaque révolution complète du volant, le cylindre fait deux oscillations sur son axe.

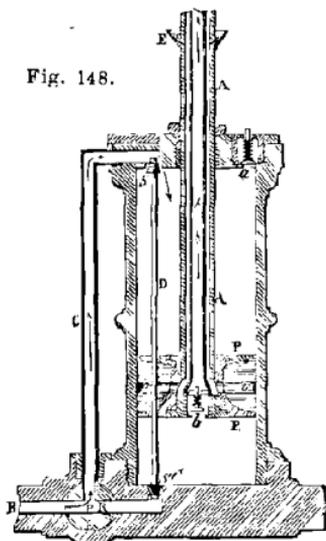
La machine est à double effet, c'est-à-dire que le piston fait le vide en montant et en descendant. Pour cela, il porte une soupape b (fig. 148), ouvrant de bas en haut, comme dans la machine ordinaire; mais la tige AA est creuse, et dans son intérieur est un tube X, de cuivre rouge, qui donne issue à l'air qui sort par la soupape b. Au haut du cylindre est une seconde soupape a, ouvrant aussi de bas en haut. Enfin, une tige de fer D traverse à frottement dur le piston, et se termine à ses extrémités par deux soupapes coniques s et s'. Celles-ci servent à l'aspiration ou le tube BC qui se rend au récipient où l'on fait le vide, tandis que les soupapes a et b servent à l'expulsion de l'air.

Ces détails connus, supposons que le piston descende. La soupape s' est alors fermée, et la soupape s étant ouverte, l'air du récipient se rend au-dessus du piston, tandis qu'en dessous l'air comprimé par celui-ci soulève la soupape b et se dégage par le tube X, qui communique avec l'atmosphère. Quand le piston remonte, l'aspiration se fait par s', et la soupape s étant fermée, l'air comprimé se dégage par la soupape a.

La machine possède un robinet à double époussement R, semblable à celui déjà décrit (181). Elle est en outre munie d'un système de graissage particulier. Pour cela, un godet E (fig. 148), fixé à la tige, est rempli d'huile qui tombe dans l'espace annulaire compris entre la tige AA et le tube X; de là elle se rend dans un conduit oo pratiqué dans la masse du piston, et, refoulée par la pression atmosphérique, elle se distribue d'une manière permanente sur le pourtour du piston. Étant toute de fonte, cette machine peut recevoir des dimensions beaucoup plus grandes que la machine ordinaire à deux pistons, et faire le vide en bien moins de temps, dans des appareils plus grands.

* 186. **Machine pneumatique à mercure.** — On nomme ainsi des machines dans lesquelles on utilise le vide barométrique pour obtenir un vide beaucoup

Fig. 148.



plus complet qu'avec les machines à piston. On a imaginé plusieurs sortes de machines à mercure, telles que la machine de Geissler, l'aspirateur de Sprengel, la machine de Ladd, etc. Celle que nous donnons ici est un perfectionnement

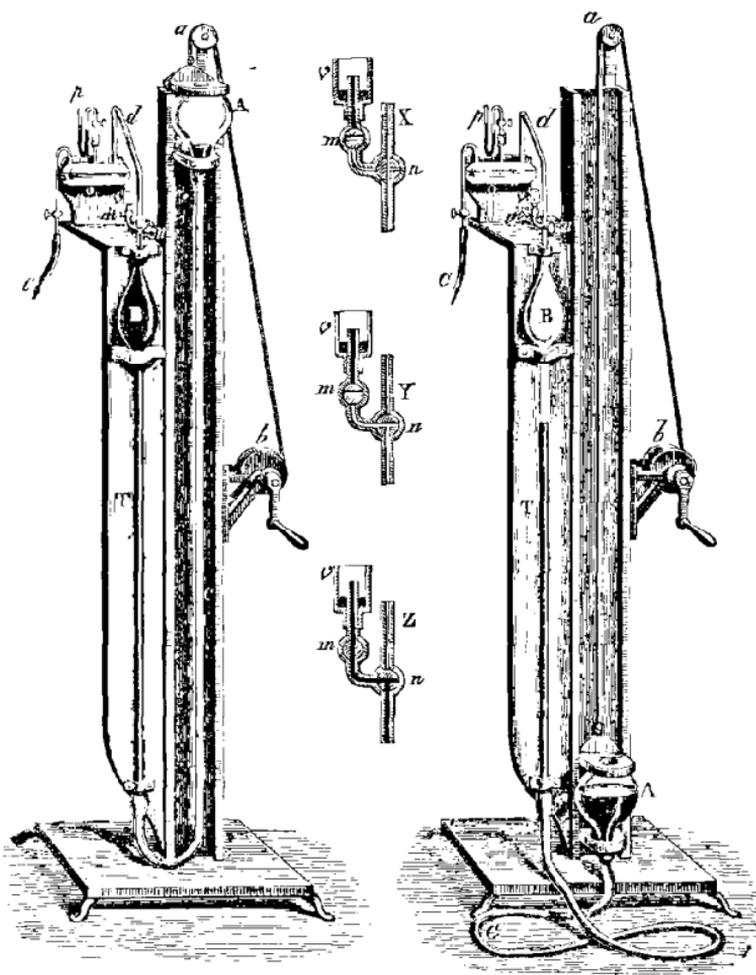
Fig. 149 (h = 1^m,80).

Fig. 150.

par M. Alvergnat, constructeur à Paris, de la machine que Morren a publiée dans les *Annales de chimie et de physique*, en 1865.

Cette machine, à peu près toute de verre, se compose de deux réservoirs A et B (fig. 149 et 150), reliés entre eux par un tube barométrique T et par un tube de caoutchouc C. Le réservoir B et le tube T sont fixés à une planchette verticale; le réservoir A, qui est libre et ouvert, s'élève et s'abaisse alternativement avec une course de 1^m,12. Ce déplacement se produit au moyen d'un

long ruban de fil qui, attaché d'un bout au réservoir A, passe sur une poulie *a* et de là vient s'enrouler sur une seconde poulie *b*, qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Au-dessus du réservoir B est un robinet à trois voies *n*, duquel part un tube *d* qui sert à l'aspiration, et sur la gauche est un robinet simple *m*, qui établit la communication avec un réservoir à mercure *v* et avec l'atmosphère. Le tube d'aspiration *d* n'est pas directement en communication avec le récipient dans lequel on veut faire le vide; il se rend d'abord à un réservoir *o* en partie rempli d'acide sulfurique destiné à dessécher les gaz qui arrivent dans l'appareil. C'est ensuite un tube de caoutchouc *c* qui établit la communication avec le récipient dans lequel on fait le vide. Enfin, sur le réservoir *o* est un petit manomètre à mercure *p*.

Ces détails connus, le réservoir A étant au haut de sa course (fig. 149), le robinet *m* ouvert et le robinet *n* tourné comme on le voit en Z, le tuyau de caoutchouc C, le tube T, le réservoir B et le tube qui est au-dessus sont remplis de mercure jusqu'en *v*; c'est ce qui a lieu dans la figure 149; fermant alors le robinet *m* (fig. Y), et abaissant le réservoir A (fig. 150), le mercure descend dans le réservoir B et dans le tube T jusqu'à ce que la différence de niveau des deux côtés égale la hauteur barométrique, et le vide est fait dans le réservoir B. C'est maintenant que, tournant le robinet *n* comme le montre la figure X, le gaz du récipient dans lequel on fait le vide arrive par les tubes *c* et *d* dans la chambre barométrique B, et le niveau s'abaisse de nouveau dans le tube T. Ramenant enfin les robinets à la position première (fig. Z), et remontant le réservoir A, l'excès de pression du mercure qui est dans le tube de caoutchouc chasse par les robinets *n* et *m* le gaz qui avait pénétré dans la chambre B, et si quelques gouttelettes de mercure sont entraînées, elles sont recueillies dans le vase *v*. On continue ainsi jusqu'à ce que le mercure du manomètre *p* soit sensiblement de niveau dans les deux branches.

Suivant M. Alvergnat, cette machine fait le vide à $\frac{1}{10}$ de millimètre. Son action étant très-lente, on commence par faire le vide à 1 centimètre environ avec une machine ordinaire, puis on achève avec la machine à mercure. Pour faire ainsi le vide dans de grands tubes, qui ont jusqu'à 16 litres de capacité, il faut plusieurs heures, en faisant marcher la machine par intermittences de 15 à 20 minutes, surtout en terminant.

187. Machine de compression. — Cette machine sert à comprimer de l'air ou tout autre gaz dans un récipient. Elle a beaucoup de rapport avec la machine pneumatique, dont elle ne diffère que par le jeu des soupapes. Comme elle, en effet, elle se compose de deux corps de pompes et d'un récipient (fig. 151). Mais celui-ci, tendant à être soulevé par la force élastique du gaz qu'on y comprime, est fortement fixé à la platine. Pour cela, il est formé d'un cylindre de verre ouvert aux deux extrémités, dont les bords sont bien dressés. D'une part, il s'appuie sur la platine, et, de l'autre, il est fermé par une seconde platine percée de quatre trous, dans lesquels passent quatre boulons de fer vissés sur la platine inférieure. Au moyen de ces boulons et d'écrous, on serre les deux platines sur le cylindre. Enfin, pour prévenir les accidents qui pourraient avoir lieu si le cylindre était brisé par la tension du gaz comprimé, on l'entoure d'un grillage de fil de fer. La tension de l'air dans le récipient se mesure au moyen d'un petit mano-

mètre à air comprimé, *m*, placé sur le conduit qui unit les corps de pompe au récipient.

Quant au jeu des soupapes, il est représenté dans la figure 152,

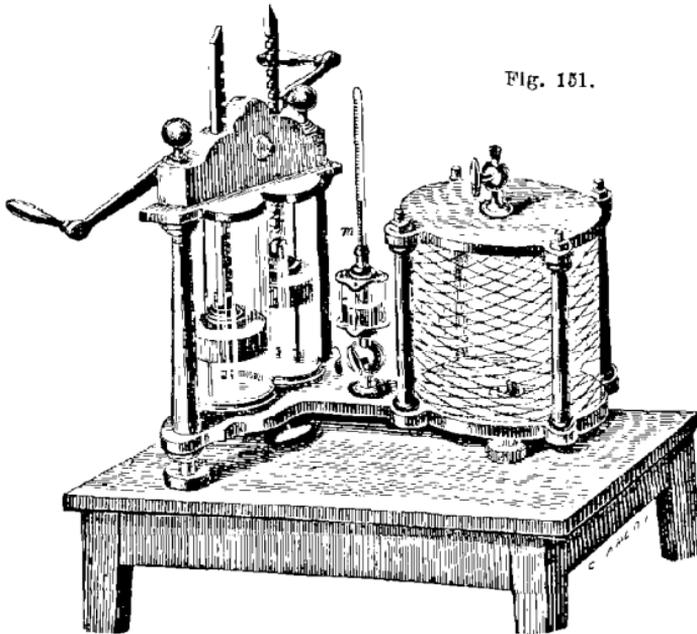


Fig. 151.

qui donne une coupe de l'un des corps de pompe et du récipient. Tandis que dans la machine pneumatique elles ouvrent de bas en

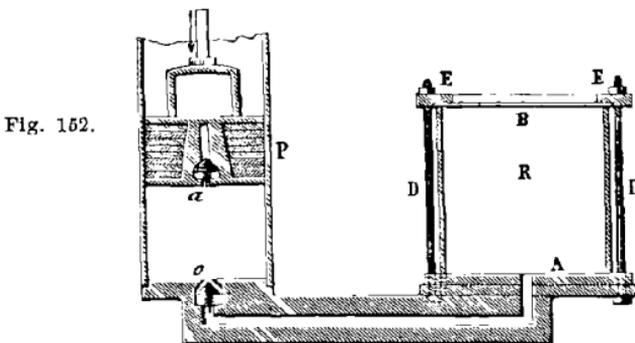


Fig. 152.

haut, ici elles ouvrent de haut en bas. Ces soupapes, dont l'une est représentée en *a*, à la base du piston, et l'autre en *o*, à la base du corps de pompe, sont coniques et maintenues fermées par de petits ressorts à boudin. Lorsque le piston *P* monte, l'air se raréfiant en

dessous, la soupape *o* reste fermée par le ressort à boudin, et la soupape *a* s'ouvre par l'effet de la pression atmosphérique, ce qui permet à l'air extérieur d'entrer dans le corps de pompe. Lorsque le piston descend, l'air qui est au-dessous se comprime, la soupape *a* se ferme, tandis que la soupape *o* s'ouvre et donne passage à l'air refoulé, qui se rend dans le récipient R. A chaque coup de piston, la même masse d'air, celle que contient le corps de pompe, pénètre ainsi dans le récipient, d'où il résulte que le nombre des coups de piston croissant en progression arithmétique, il en est de même de la masse de l'air, et, par suite, de la force élastique sous le récipient. Toutefois il y a une limite à la tension que peut prendre le gaz comprimé.

En effet, ne pouvant éviter un espace nuisible entre les soupapes et la base du piston, il vient un moment où l'air qui est dans les corps de pompe n'acquiert plus, même lorsque le piston est au bas de sa course, une force élastique supérieure à celle qui a lieu dans le récipient, et dès lors il ne passe plus d'air dans celui-ci, la soupape *o* cessant de s'ouvrir.

La machine de compression ci-dessus a peu d'applications; sous la forme suivante, elle est, au contraire, d'un fréquent usage.

188. Pompe de compression. — La pompe de compression, qui est une véritable pompe aspirante et foulante, se compose d'un corps de pompe A d'un petit diamètre (fig. 153), dans lequel

on fait mouvoir avec la main, au moyen d'une poignée, un piston plein, c'est-à-dire sans soupape. Le corps de pompe est muni, à sa base, de deux tubulures horizontales à robinet; dans ces tubulures sont deux soupapes *o* et *s*, agissant en sens contraires, pour servir, la première à l'aspiration, la seconde au refoulement. De petits ressorts à boudin appuient sur les soupapes pour les main-

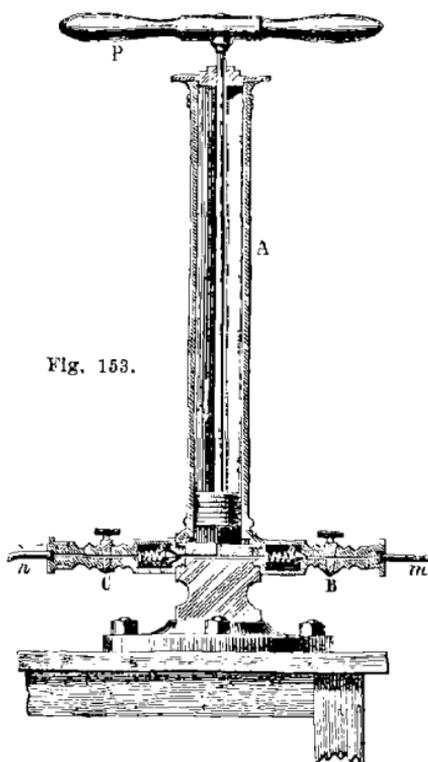


Fig. 153.

tenir fermées. Le jeu est entièrement le même que dans la machine de compression.

Dans la pompe de compression, comme dans la machine précédente, la limite de compression dépend du rapport qui existe entre les deux volumes d'air sous le piston, quand il est au haut

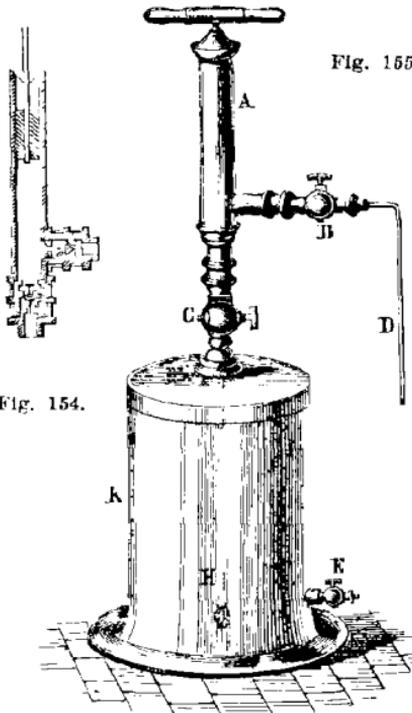


Fig. 154.

Fig. 155.

et au bas de sa course. Si le second volume est, par exemple, $\frac{1}{60}$ du premier, on ne pourra comprimer l'air que jusqu'à soixante atmosphères; car, au delà, la tension dans le récipient serait plus grande que dans le corps de pompe, et alors la soupape s ne pourrait s'ouvrir pour donner passage à une nouvelle quantité d'air.

La pompe de compression est surtout utilisée pour faire dissoudre l'acide carbonique ou tout autre gaz dans l'eau. Elle se visse alors sur le vase même qui contient le liquide (fig. 155), et la soupape de compression s est placée à la base du corps de pompe (fig. 154). Le tube D étant mis en communication avec le réservoir qui contient le gaz qu'on veut faire absorber,

la pompe aspire ce gaz et le refoule dans le vase K, où il se dissout en quantité d'autant plus grande, qu'il est plus comprimé (169, 1^o). C'est à l'aide d'appareils analogues que sont fabriquées les eaux gazeuses artificielles.

La pompe représentée dans la figure 153 sert aussi à faire le vide. Pour cela, on fait communiquer la tubulure *m* avec le récipient duquel on veut aspirer l'air, et la tubulure *n* avec l'air extérieur. L'appareil prend alors le nom de *pompe à main*.

189. **Fontaine de Héron.** — La *fontaine de Héron* tire son nom de celui de son inventeur, qui vivait à Alexandrie 120 ans avant l'ère chrétienne. Elle se compose d'une cuvette de cuivre D (fig. 156) et de deux ballons de verre M et N, de 2 à 3 décimètres de diamètre. La cuvette est en communication avec la partie infé-

rieure du ballon N par un long tube de cuivre B. Un second tube A fait communiquer entre eux les deux ballons. Enfin, un troisième tube plus petit traverse la cuvette et se rend à la partie infé-

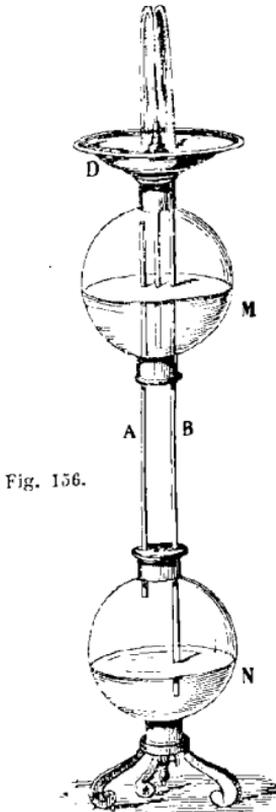


Fig. 156.

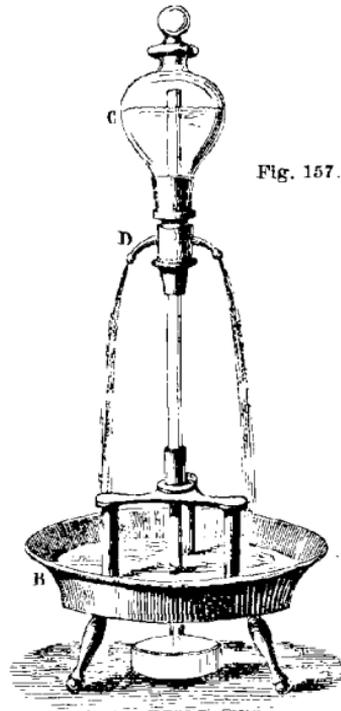


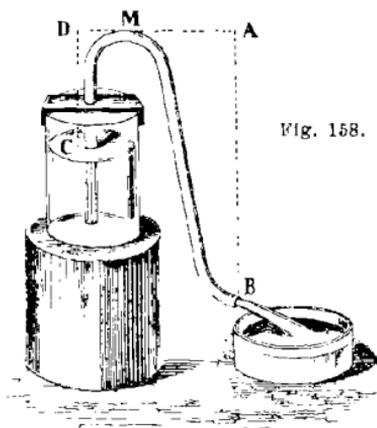
Fig. 157.

rieure du ballon M. Ce troisième tube se retire pour remplir d'eau en partie ce même ballon. Puis, replaçant le tube, on verse de l'eau dans la cuvette. Le liquide descend, par le tube B, dans le ballon inférieur et en chasse l'air, qui est refoulé dans le ballon supérieur, où l'air comprimé réagit sur l'eau et la fait jaillir comme le montre la figure. Sans la résistance de l'air et le frottement, le liquide s'élèverait, au-dessus du niveau D, à une hauteur égale à la différence de niveau dans les deux ballons.

190. **Fontaine intermittente.** — La *fontaine intermittente* est formée d'un globe de verre C (fig. 157) fermé par un bouchon à l'émeri, et portant, à sa partie inférieure, deux ou trois tubulures capillaires D par lesquelles se fait l'écoulement. Un tube de cristal,

ouvert à ses extrémités, pénètre par l'une dans le globe C, et par l'autre vient se terminer près d'un orifice central pratiqué dans une cuvette de cuivre B qui porte tout l'appareil.

Le globe C étant rempli d'eau aux deux tiers environ, le liquide s'écoule d'abord par les orifices D, comme le montre la figure, la pression intérieure, en D, étant égale à celle de l'atmosphère qui se transmet par la partie inférieure du tube de cristal, plus au poids de la colonne d'eau CD, tandis qu'extérieurement, au même point, la pression est seulement celle de l'atmosphère. Ces conditions persistent tant que l'orifice inférieur du tube est ouvert, c'est-à-dire tant que la tension de l'air, à l'intérieur, est égale à la pression de l'atmosphère, car l'air entre à mesure que l'eau s'écoule; mais l'appareil étant réglé de manière que l'orifice pratiqué au fond de la cuvette B laisse écouler moins d'eau que n'en donnent les tubulures D, le niveau s'élève peu à peu dans la cuvette, et le tube finit par plonger entièrement dans le liquide. L'air extérieur ne pouvant plus alors pénétrer dans le globe C, l'air s'y raréfie à mesure que l'écoulement continue, et il vient un moment où la pression due à la colonne d'eau CD et à la tension de l'air renfermé dans l'appareil est égale à la pression extérieure qui s'exerce en D. Par suite, l'écoulement s'arrête; mais la cuvette continuant à se



vider, le bout inférieur du tube se trouve bientôt dégagé. L'air entre alors, l'écoulement recommence, et ainsi de suite tant qu'il reste de l'eau dans le globe C.

* 191. **Siphon.** — Le siphon est un tube recourbé, à branches inégales, qui sert à transvaser les liquides par-dessus les bords des vases; c'est la branche la plus courte qui plonge dans le liquide à transvaser (fig. 158).

Pour se servir du siphon, on commence par l'amorcer, c'est-à-dire par le remplir de liquide. Pour cela, on le retourne, et on l'emplit directement; puis, fermant momentanément ses deux orifices, on le remet en place comme le montre la figure; ou bien, plongeant la petite branche dans le liquide, on aspire avec la bouche, par l'orifice B, l'air qui est dans l'appareil. Le vide se faisant alors dans celui-ci, le liquide du vase C est re-

foulé dans le tube par l'effet de la pression atmosphérique et le remplit.

Lorsque le liquide à transvaser n'est pas de nature à être introduit dans la bouche, on fait usage d'un siphon auquel est soudé un second tube M (fig. 159) parallèle à la grande branche. C'est alors par l'orifice O de ce tube additionnel qu'on aspire l'air, en ayant soin de fermer en même temps l'orifice P, et de ne pas laisser le liquide s'élever, dans le tube additionnel, jusqu'à la bouche. Ou bien, on soude à la grande branche un tube terminé par un petit ballon de verre (fig. 161). En chauffant doucement celui-ci, l'air s'y dilate et s'échappe en assez grande quantité pour que le siphon s'amorce ensuite de lui-même par le refroidissement. Par quelque procédé que le siphon ait été amorcé, l'écoulement se continue de la petite branche vers la grande, tant que la première plonge dans le liquide.

Pour concevoir comment cet écoulement a lieu, il faut remarquer que la force qui presse le liquide en C (fig. 158) et le sollicite à s'écouler dans la direction CMB, égale la pression atmosphérique,

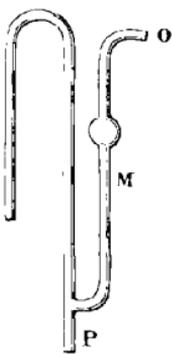


Fig. 159.

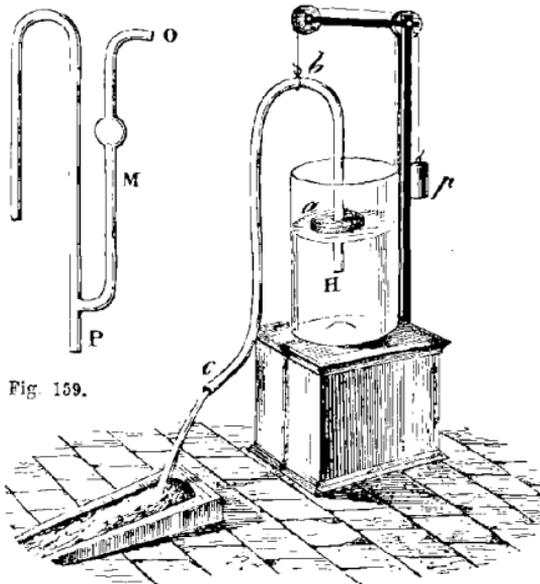


Fig. 160.

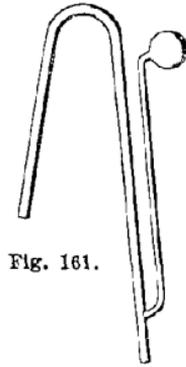


Fig. 161.

moins le poids d'une colonne d'eau dont la hauteur est DC. De même, en B, la force qui sollicite le liquide dans la direction BMC est le poids de l'atmosphère, moins celui d'une colonne d'eau ayant pour hauteur AB. Or cette dernière colonne étant plus grande

que DC, il en résulte que la force effective qui agit en B est plus petite que celle qui agit en C. L'écoulement a donc lieu en vertu de la différence de ces deux forces. Par suite, la vitesse d'écoulement est d'autant plus grande, que la différence de niveau entre l'orifice B et la surface du liquide dans le vase C est plus grande.

On conclut de la théorie du siphon qu'il ne fonctionnerait pas dans le vide, ou encore si la hauteur CD était plus grande que la colonne liquide qui fait équilibre à la pression atmosphérique.

192. **Siphon à écoulement constant.** — D'après ce qui précède, pour que l'écoulement soit constant dans le siphon, il faut que la différence entre les hauteurs du liquide, dans les deux branches, soit toujours la même. On obtient ce résultat en disposant l'appareil comme le montre la figure 160. Le siphon est maintenu en équilibre par un flotteur *a* et par un poids *p*, de manière qu'à mesure que le niveau baisse dans le vase H, le siphon descende avec lui; la différence entre les hauteurs *ab* et *bc* demeure donc invariable.

193. **Siphon intermittent, ou vase de Tantale.** — Le siphon intermittent, ainsi que son nom l'indique, est celui dans lequel

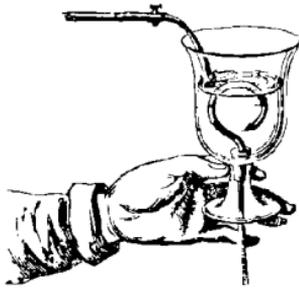


Fig. 162.

l'écoulement n'est pas continu. Ce siphon est disposé dans un vase de manière que la branche la plus courte s'ouvre près du fond, tandis que la plus grande le traverse et s'ouvre au dehors (fig. 162). Le vase étant alimenté par une source d'eau constante, le niveau s'y élève peu à peu, et en même temps dans la petite branche, jusqu'au sommet du siphon. Celui-ci s'amorce alors par l'effet de la pression du liquide, et l'écoulement s'o-

père comme le montre la figure ci-contre. Or, comme on a soin que l'écoulement du siphon soit plus rapide que celui du tube qui alimente le vase, le niveau baisse dans celui-ci, et la petite branche cesse bientôt de plonger; le siphon se vide alors, et l'écoulement est interrompu. Mais le vase continuant à être alimenté par la source constante, le niveau s'élève de nouveau, et la même série de phénomènes se renouvelle périodiquement.

Le siphon intermittent donne l'explication des fontaines intermittentes naturelles qu'on observe dans plusieurs contrées. Il est de ces fontaines qui donnent de l'eau pendant plusieurs jours ou plusieurs mois, puis s'arrêtent pendant un intervalle plus ou moins long, et recommencent ensuite à couler; d'autres s'arrêtent et reprennent leur écoulement plusieurs fois dans une heure.

On explique ces phénomènes en admettant des cavités souterraines qui se remplissent plus ou moins lentement d'eau par des sources, et qui se vident ensuite par des fissures disposées dans le sol de façon à faire siphon intermittent.

194. **Différentes espèces de pompes.** — Les pompes sont des machines qui servent à élever l'eau par aspiration, par pression ou par les deux effets combinés ; de là leur division en *pompe aspirante*, *pompe foulante* et *pompe aspirante et foulante*. Avant Galilée, on attribuait l'ascension de l'eau dans les pompes aspirantes à *l'horreur de la nature pour le vide* ; on va voir que ce phénomène est dû à un effet de la pression atmosphérique.

Les différentes pièces qui entrent dans la composition d'une pompe sont : le *corps de pompe*, le *piston*, les *soupapes* et les *tuyaux d'aspiration et d'ascension*. Le corps de pompe est un cylindre creux et fixe, de métal ou de bois, dans lequel est le piston. Celui-ci est un cylindre de métal ou de bois garni d'étoupes, glissant à frottement doux dans toute la longueur du corps de pompe. Les soupapes sont des disques de métal ou de cuir, servant à fermer alternativement les orifices qui font communiquer le corps de pompe avec les tuyaux d'aspiration ou d'ascension.

Fig. 163.

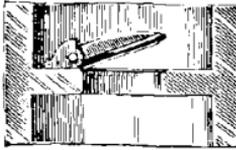
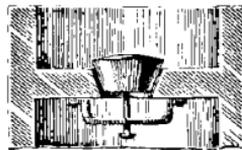


Fig. 164.



Enfin, ceux-ci sont des tuyaux dans lesquels l'eau est d'abord aspirée jusqu'au corps de pompe, puis refoulée au-dessus.

On construit plusieurs sortes de soupapes : les plus fréquemment employées sont la *soupape à clapet* (fig. 163) et la *soupape conique* (fig. 164). La première est un disque métallique fixé à charnière sur le bord de l'orifice qu'il doit fermer. Pour que la fermeture soit plus complète, la face inférieure du disque est garnie d'un cuir épais.

Quant à la soupape conique, elle consiste en un cône métallique s'engageant dans une ouverture de même forme. Au-dessous de celle-ci est une bride de fer, dans laquelle passe un boulon à tête fixé à la soupape. Cette disposition limite le jeu de la soupape, quand elle est soulevée par l'eau, et l'empêche de chavirer.

195. **Pompe aspirante.** — Représentée en coupe dans la figure 165, cette pompe se compose : 1° d'un corps de pompe cylindrique, portant à sa partie supérieure une tubulure latérale par laquelle l'eau

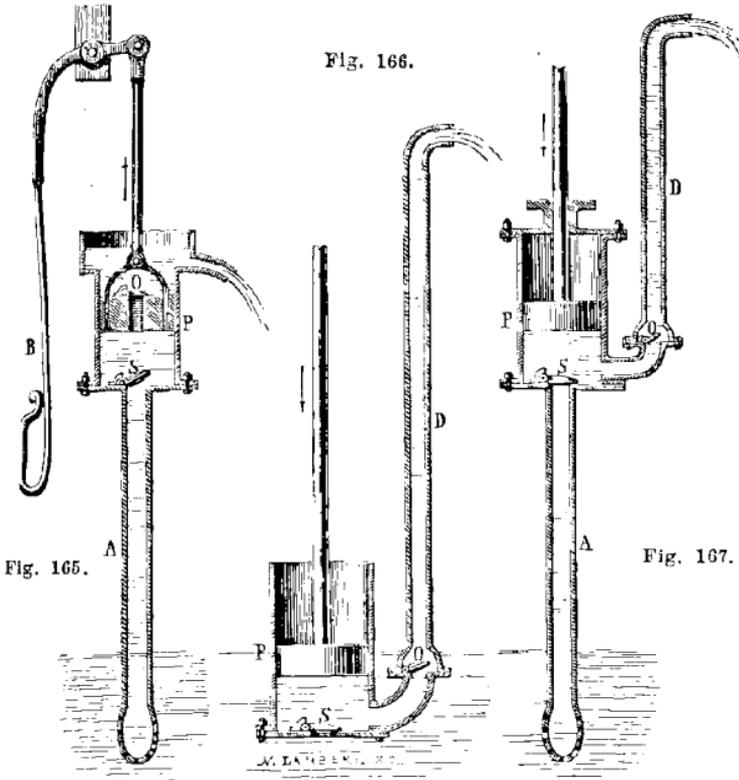
s'écoule, et percé à sa base d'un trou recouvert d'une soupape à clapet S, ouvrant de bas en haut; 2^o d'un tube d'aspiration A, fixé d'un bout au corps de pompe, et plongeant de l'autre dans le liquide qu'on veut élever; 3^o d'un piston P, qui porte une tige à laquelle on imprime un mouvement de va-et-vient à l'aide d'une brimbale B. A son centre, le piston est percé d'un trou que recouvre et que ferme une soupape à clapet O, ouvrant de bas en haut.

Lorsque le piston, d'abord au bas de sa course, s'élève, le vide tend à se faire au-dessous, et la soupape O reste fermée par la pression atmosphérique, tandis que l'air du tuyau A, en vertu de son élasticité, soulève la soupape S, et passe en partie dans le corps de pompe. L'air étant ainsi raréfié, l'eau monte dans le tuyau jusqu'à ce que la pression de la colonne liquide soulevée, ajoutée à la tension de l'air qui reste dans le tuyau, fasse équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau à l'extérieur.

Lorsque le piston descend, la soupape S se ferme par son propre poids, et s'oppose au retour de l'air du corps de pompe dans le tube d'aspiration. L'air comprimé par le piston fait alors ouvrir la soupape O, et se dégage dans l'atmosphère par le trou réservé dans le piston. A un deuxième coup de celui-ci, la même série de phénomènes se reproduit, et après quelques coups, l'eau pénètre enfin dans le corps de pompe. A partir de ce moment, l'effet produit est modifié : pendant la descente du piston, la soupape S se ferme, l'eau comprimée soulève la soupape O et pénètre au-dessus du piston, qui la soulève ensuite, lorsqu'il remonte, jusqu'à la tubulure latérale par laquelle l'eau se déverse. Alors il n'y a plus d'air ni dans le corps de pompe ni dans le tube d'aspiration; et l'eau, poussée par la pression atmosphérique, suit le piston dans sa course; à la condition, toutefois, qu'il ne s'élève pas à plus de 10^m,33 au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir où plonge le tuyau d'aspiration A. En effet, on a vu (144) que le poids d'une colonne d'eau de 10^m,33 fait équilibre à la pression atmosphérique.

Pour connaître la hauteur qu'on peut donner au tube d'aspiration A, il faut observer que, dans la pratique, le piston ne s'applique jamais exactement sur la base du corps de pompe, et que lorsqu'il est au plus bas de sa course, il existe encore au-dessous de lui un *espace nuisible* rempli d'air à la pression atmosphérique. Soit cet espace nuisible égal à $\frac{1}{30}$ du volume du corps de pompe : l'air qui est dans l'espace nuisible se dilate à mesure que le piston remonte, et lorsque celui-ci est arrivé au haut de sa course, la tension de l'air qui reste dans le corps de pompe est $\frac{1}{30}$ de la pression atmosphérique, d'après la loi de Mariotte. L'air du tuyau d'aspiration ne peut donc être raréfié au delà de cette limite, et, par suite, dans

ce tube, l'eau ne peut s'élever, dans le cas que nous considérons, qu'à une hauteur égale aux $\frac{29}{30}$ de $10^m,33$, c'est-à-dire à $9^m,98$. Cette hauteur est encore trop grande, puisque l'eau doit s'élever



d'une certaine quantité au-dessus de la soupape S. Aussi, en général, le tube d'aspiration n'a-t-il pas plus de 8 mètres.

Dans la pompe aspirante, l'eau est donc élevée d'abord dans le tuyau d'aspiration par l'effet de la pression atmosphérique, et la hauteur ainsi obtenue ne saurait dépasser 8 à 9 mètres. Mais une fois que l'eau a passé au-dessus du piston, c'est la force ascensionnelle de celui-ci qui l'élève, et la hauteur qu'elle peut alors atteindre ne dépend que de la force qui fait mouvoir le piston et de la hauteur du tuyau d'ascension qu'on place au-dessus du corps de pompe. Lorsque la pompe est disposée pour fonctionner ainsi, on lui donne le nom de *pompe élévatoire*.

196. **Pompe foulante.** — La pompe foulante n'utilise pas la pression atmosphérique, et n'agit, comme son nom l'indique, que

par pression. Représentée en coupe dans la figure 166, elle diffère de la précédente en ce que son piston est plein, et qu'elle n'a pas de tuyau d'aspiration, le corps de pompe étant plongé dans l'eau même qu'on veut élever; enfin, sur le côté du corps de pompe est adapté un tuyau D, qui est le tuyau d'ascension. A la partie inférieure de ce tuyau est une soupape O, ouvrant de bas en haut, et à la base du corps de pompe est une soupape semblable S.

Lorsque le piston monte, la soupape S s'ouvre, soulevée par la poussée du liquide, et le corps de pompe se remplit. Puis, lorsque le piston descend, la soupape S étant fermée par son propre poids et par la pression qu'elle supporte, l'eau, refoulée par le piston, fait ouvrir la soupape O, et s'élève dans le tuyau D, à une hauteur qui n'a d'autres limites que la pression exercée par le piston, et que la résistance de l'appareil.

197. Pompe aspirante et foulante. — La pompe aspirante et foulante élève l'eau à la fois par aspiration et par pression. Représentée en coupe dans la figure 167, son piston est plein, et à la base du corps de pompe est une soupape ouvrant de bas en haut et fermant un tube d'aspiration A. Sur le côté du corps de pompe est un tube d'ascension D avec sa soupape. Quand la pompe fonctionne, l'eau aspirée par le tuyau A, toutes les fois que le piston monte, est ensuite refoulée, lorsqu'il descend, dans le tuyau D. Quant aux limites d'aspiration et d'ascension, elles restent les mêmes que dans les deux pompes qui viennent d'être décrites.

Dans la pompe aspirante et foulante, représentée dans la figure 167, l'écoulement est évidemment intermittent, n'ayant lieu que lorsque le piston s'abaisse, et s'arrêtant quand il remonte. On corrige ce défaut au moyen du *réservoir d'air* (198).

198. Pompe à incendie. — La pompe à incendie est une pompe foulante dans laquelle la régularité du jet s'obtient non-seulement à l'aide d'un réservoir d'air décrit ci-après, mais encore au moyen de deux pompes foulantes agissant alternativement (fig. 168). Les deux pompes *m*, *n*, mues par un même balancier PQ auquel sont appliqués huit hommes, plongent dans une caisse MN, qu'on nomme *bâche*, et qu'on maintient pleine d'eau tout le temps que l'appareil fonctionne. D'après la disposition des soupapes, on voit que lorsqu'une des pompes aspire l'eau de la bâche, l'autre la refoule dans un compartiment R qu'on nomme le *réservoir d'air*; de là, par un orifice Z, l'eau passe dans un long tuyau de cuir qu'on dirige sur le lieu incendié.

Sans l'addition du réservoir d'air, l'eau cessant d'être refoulée toutes les fois que les pistons arrivent au haut et au bas de leur course, l'écoulement serait intermittent. Or cet inconvénient disparaît avec le réservoir d'air. En effet, la vitesse de l'eau à son entrée dans ce réservoir étant plus grande qu'à sa sortie, son niveau s'élève au-dessus de l'orifice Z, en comprimant l'air qui remplit le réservoir. Par suite, toutes les fois que les pistons s'arrêtent, l'air ainsi comprimé, réagissant sur le liquide, le force à s'écouler pendant l'instant très-court de l'arrêt des pistons; d'où l'on voit que l'effet du réservoir d'air, dans les pompes foulantes, est de rendre l'écoulement continu.

199. **Charge que supporte le piston.** — Dans la pompe aspirante (fig. 165), une fois que l'eau remplit le tuyau d'aspiration et le corps de pompe jusqu'à l'orifice d'écoulement, l'effort nécessaire pour soulever le piston égale le poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base le piston et pour hauteur la distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le réservoir où l'on puise, c'est-à-dire la hauteur à laquelle l'eau est élevée. En effet, soient H la pression atmosphérique, h la hauteur de l'eau au-dessus du piston, et h' la hauteur de la colonne d'eau qui remplit le tube d'aspiration A et la partie inférieure du corps de pompe. La pression au-dessus du piston est

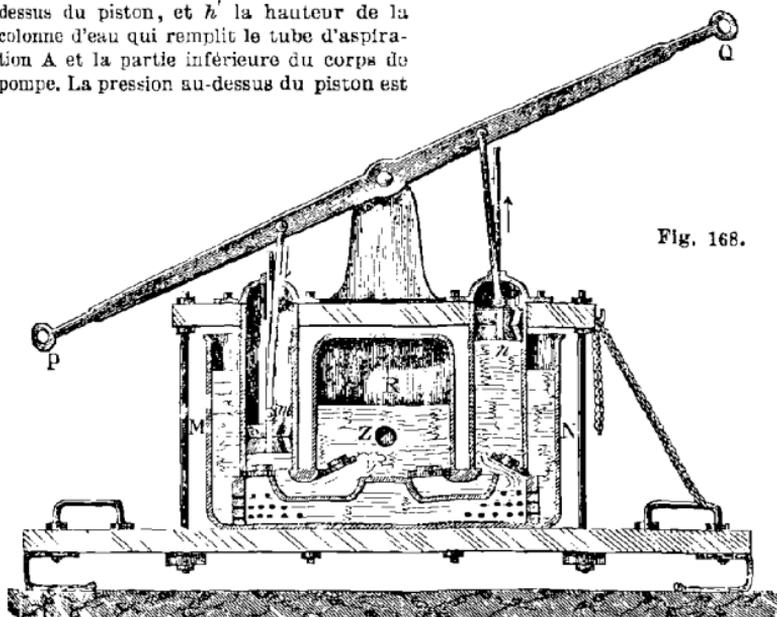


Fig. 168.

évidemment $H + h$, et celle au-dessous $H - h'$, puisque le poids de la colonne h tend à faire équilibre à la pression atmosphérique. Or la pression $H - h'$ tendant à soulever le piston, la résistance effective est égale à l'excès de $H + h$ sur $H - h'$, c'est-à-dire à $h + h'$.

Dans la pompe aspirante et foulante (fig. 167), la pression que supporte le piston est aussi égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la section du piston, et pour hauteur celle à laquelle l'eau est élevée.

* 200. **Flacon de Mariotte, son usage.** — Le *flacon de Mariotte* est un appareil qui offre plusieurs effets remarquables de pression atmosphérique, et au moyen duquel on obtient un écoulement constant. C'est un flacon un peu grand dont le goulot est fermé d'un bouchon (fig. 169). Dans celui-ci passe un tube de verre ouvert à ses deux bouts. Sur le côté du flacon sont trois tubulures a , b , c , chacune à orifice étroit, et fermées par un petit tampon de bois.

Le flacon et le tube étant entièrement remplis d'eau, considérons ce qui se passe lorsqu'on ouvre successivement une des tubulures a , b , c , en supposant, comme le montre la figure, que l'extrémité inférieure du tube g s'arrête entre les tubulures b et c .

1^o Si l'on ouvre d'abord la tubulure b , il y a écoulement, le niveau baisse dans le tube g , et dès que ce niveau y est le même qu'en b , l'écoulement s'arrête. Ces phénomènes s'expliquent par l'excès de pression qui avait d'abord lieu en b , de dedans en dehors, excès de pression qui disparaît lorsque le niveau

est le même dans le tube g qu'en b . En effet, avant que l'écoulement commençât, la pression sur tous les points de la tranche horizontale be n'était pas la même. En e , elle se composait de la pression atmosphérique, plus le poids de la colonne d'eau ge , tandis qu'en b la pression est seulement égale à celle de l'atmosphère. Mais une fois que le niveau est le même en e et en b , il y a

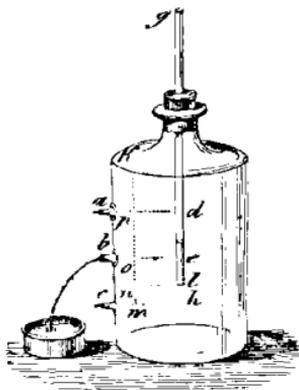


Fig. 169.

la molécule o supporte, en réalité, deux pressions, l'une égale au poids de la colonne d'eau ko , l'autre à la pression $H - ko$, résultant de la réaction de la paroi k . La pression réelle que supporte la molécule o est donc $ko + H - ko$, ou H , ce qu'il fallait démontrer.

2° Si l'on ferme la tubulure b et qu'on ouvre la tubulure a , il n'y a pas écoulement; au contraire, l'air entre dans le flacon par l'orifice a , et l'eau remonte dans le tube g jusqu'à la tranche ad ; à ce moment l'équilibre est rétabli. En effet, par un raisonnement semblable au précédent, on reconnaît que la pression est alors la même sur tous les points de la tranche horizontale ad .

3° Les orifices a et b étant fermés, on ouvre l'orifice c . Dans ce cas, l'eau s'abaisse dans le tube g jusqu'en l , et il y a écoulement constant, tant que le niveau de l'eau, dans le flacon, n'est pas descendu au-dessous de l'orifice l ; l'air entre alors bulle à bulle par cet orifice et gagne la partie supérieure du flacon.

Pour démontrer que l'écoulement est constant par l'orifice e , il faut faire voir que la pression qui s'exerce sur la tranche horizontale ch est invariablement égale à la pression de l'atmosphère augmentée de celle de la colonne d'eau hl . Supposons, en effet, que, dans le flacon, le niveau de l'eau se soit abaissé jusqu'à la tranche ad . L'air qui a pénétré dans le flacon supporte alors une pression égale à $H - pn$. En vertu de son élasticité, l'air renvoie cette pression à la couche ch . Or celle-ci supporte en outre le poids de la colonne d'eau pm ; donc la pression transmise en m est en réalité $pm + H - pn$, ou $H + mn$, c'est-à-dire $H + hl$. On démontrerait de la même manière que cette pression est encore la même lorsque le niveau s'est abaissé en be , et ainsi de suite tant que le niveau est plus haut que l'orifice l ; la pression sur la tranche ch est donc constante, et, par conséquent, la vitesse d'écoulement. Mais une fois que le niveau est descendu au-dessous du point l , cette pression décroît, et, par suite, la vitesse.

D'après ce qui précède, le flacon de Mariotte donne le moyen d'obtenir un écoulement constant; pour cela, on le remplit d'eau et l'on tient ouverte la tubulure placée au-dessous de l'orifice l du tube. La vitesse d'écoulement est alors constante et proportionnelle à la racine carrée de la hauteur lh .

LIVRE V

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION, PROPAGATION ET RÉFLEXION DU SON

201. **Objet de l'acoustique.** — L'*acoustique* a pour objet l'étude des sons et celle des vibrations des corps élastiques.

La musique considère les sons par rapport aux sentiments et aux passions qu'ils peuvent exciter en nous ; l'acoustique ne traite que des propriétés des sons , abstraction faite des sensations que nous en éprouvons.

202. **Son et bruit.** — Le *son* est une sensation excitée dans l'organe de l'ouïe par le mouvement vibratoire des corps, lorsque ce mouvement se transmet à l'oreille à l'aide d'un milieu élastique.

Tous les sons ne sont point identiques : ils présentent des différences assez sensibles pour qu'on puisse les distinguer entre eux, les comparer et déterminer leurs rapports.

On distingue le son d'avec le *bruit*. Le son proprement dit, ou *son musical*, est celui qui produit une sensation continue et dont on peut apprécier la valeur musicale ; tandis que le bruit est un son d'une durée trop courte pour être bien apprécié, comme le bruit du canon ; ou bien c'est un mélange confus de plusieurs sons discordants, comme le roulement du tonnerre, le bruit des vagues. Toutefois la différence entre le son et le bruit n'est pas nettement tranchée ; il est, dit-on, des oreilles assez bien organisées pour déterminer la valeur musicale du bruit produit par une voiture roulant sur le pavé.

203. **Cause du son.** — Le son est le résultat d'oscillations rapides imprimées aux molécules des corps élastiques, lorsque, par le choc ou le frottement, l'état d'équilibre de ces molécules a été troublé. Elles tendent alors à reprendre leur position première ; mais elles n'y reviennent qu'en exécutant, en deçà et au delà de cette position, des mouvements vibratoires extrêmement rapides, dont l'amplitude décroît très-vite.

On nomme *corps sonore* celui qui rend ou peut rendre un son,

et *vibration simple*, le mouvement qui ne comprend qu'une *allée* ou qu'un *retour* des molécules vibrantes; une *vibration double* ou *complète* comprend l'*allée* et le *retour*. Les vibrations sont faciles à constater par les expériences suivantes. Qu'on projette

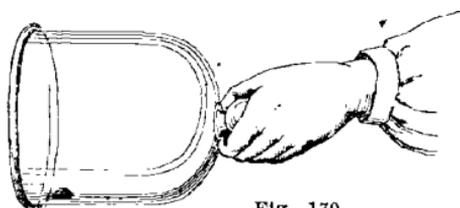


Fig. 170.

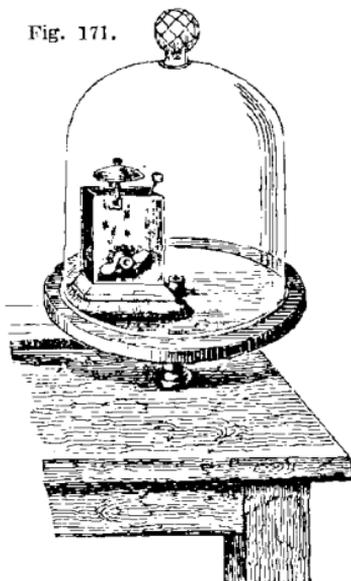
une poussière légère sur un corps qui rend un son, elle prend un mouvement rapide, et rend ainsi visibles les vibrations du corps; de même, si l'on pince une corde tendue un peu longue, ses vibrations sont apparentes à l'œil. Ou encore on prend une cloche de verre qu'on tient horizontalement d'une main par le bouton (fig. 170), et de l'autre on donne sur la cloche un coup sec avec le doigt pour la faire vibrer. Or, si l'on a placé au dedans un fragment de métal, il est soulevé rapidement par les vibrations de la paroi, sur laquelle il fait entendre des chocs répétés; en posant la main sur la cloche, ce qui arrête les vibrations, les chocs cessent aussitôt.

204. Le son ne se propage pas dans le vide. — Les vibrations des corps élastiques ne peuvent faire naître en nous la sensation du son que par l'intermédiaire d'un milieu pondérable, interposé entre l'oreille et le corps sonore, et vibrant avec lui. Ce milieu est ordinairement l'air; mais les gaz, les vapeurs, les liquides, les solides, transmettent aussi le son.

Pour démontrer qu'un milieu est nécessaire à la propagation du son, on place sous la cloche d'une machine pneumatique un timbre métallique que frappe un marteau mû par un mouvement d'horlogerie (fig. 171). Tant que la cloche est pleine d'air à la pression ordinaire, on entend résonner le timbre; mais à mesure qu'on raréfie l'air, le son perd de son intensité, et cesse d'être perceptible lorsque le vide est fait.

Pour que l'expérience réussisse bien, il faut disposer la sonne-

Fig. 171.



rie sur de la ouate ; autrement les pièces métalliques dont cette sonnerie est formée transmettent leurs vibrations à la platine de la machine pneumatique, et celle-ci à l'air.

On fait aussi usage d'un ballon de verre à robinet, contenant une petite sonnette suspendue à un fil. Si l'on agite le ballon lorsqu'il est plein d'air, on entend distinctement la sonnette ; mais après qu'on a raréfié l'air qu'il renferme, au moyen de la machine pneumatique, on n'entend plus rien.

205. Le son se propage dans tous les corps élastiques. — Si, dans les expériences ci-dessus, après avoir fait le vide, on laisse entrer, dans le récipient ou dans le ballon, un gaz ou une vapeur, on entend le son du timbre ou de la sonnette, ce qui démontre que le son se propage dans les gaz et dans les vapeurs comme dans l'air. Toutefois, d'après les expériences de M. John Leslie, le son se transmet très-mal dans l'hydrogène, ou dans un mélange de ce gaz et d'air ; et le son s'éteint même davantage dans ce mélange que dans l'hydrogène pur.

Le son se propage bien dans les liquides. Lorsque deux corps se heurtent sous l'eau, on en entend distinctement le choc, et un plongeur, au fond de l'eau, distingue ce qu'on dit sur le rivage.

Quant aux solides, leur conductibilité est telle, qu'un bruit extrêmement léger, comme celui du frottement d'une barbe de plume à l'extrémité d'une pièce de bois, est perçu à l'autre extrémité. Le sol conduit si bien le son, que, la nuit, en appliquant l'oreille contre terre, on peut entendre, à de grandes distances, des pas de chevaux ou tout autre bruit.

206. Mode de propagation du son dans l'air. — Pour simplifier la théorie de la propagation du son, soit d'abord le cas où il se propage dans un tube indéfini MN (fig. 172), rempli d'air à une pression et à une température constantes, et, dans ce tube, soit un piston P oscillant avec une grande vitesse de A en a, et réciproquement. Lorsqu'il passe de A en a, ce piston comprime la couche d'air en contact avec lui ; or, par suite de la rapidité du mouvement et de la grande compressibilité de l'air, la condensation ne s'opère pas dans toute la longueur du tube, mais seulement sur une certaine longueur aH, qu'on nomme l'onde condensée.

Toutes les parties de l'onde condensée ne le sont pas également, et leur vitesse n'est pas la même ; car le piston, dans son mouvement de va-et-vient, est animé de vitesses variables. Sa vitesse, d'abord nulle en A, croît progressivement jusqu'au milieu de sa course, puis décroît jusqu'en a, où elle est nulle de nouveau. De là, dans l'onde aH, des densités et des vitesses de l'air variables avec la vitesse du piston. En a, où celui-ci est au repos,

la vitesse de l'air est nulle, et ce fluide a repris sa densité primitive. En H, où finit l'onde, la vitesse et la densité sont les mêmes qu'en a ; mais, dans les points intermédiaires, ces quantités croissent depuis le point a jusqu'à la section moyenne de l'onde, pour décroître ensuite jusqu'en H.

En concevant le tuyau MN divisé en longueurs égales à aH , et chacune partagée en tranches parallèles au piston, on démontre,

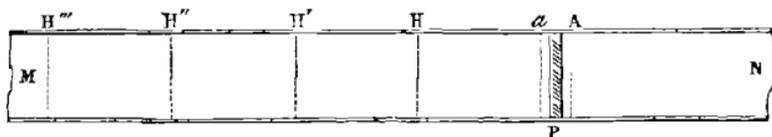


Fig. 172.

par le calcul, qu'au moment où la première tranche de l'onde aH arrive au repos, la première tranche de la partie HH' commence à participer au mouvement; puis, lorsque la seconde tranche de l'onde aH passe à l'état de repos, le mouvement se communique à la deuxième tranche de HH' , et ainsi de suite, de tranche en tranche, dans les parties $H'H''$, $H''H'''$... L'onde condensée avance donc dans le tube, chacune de ses parties passant successivement par les mêmes degrés de vitesse et de condensation.

Le piston revenant ensuite sur lui-même dans la direction aA , il se produit derrière lui un vide dans lequel se dilate la couche d'air en contact avec sa face postérieure. Puis la couche suivante, se dilatant à son tour, ramène la première à son état primitif de condensation, et ainsi de suite, de tranche en tranche; de sorte que, lorsque le piston est revenu en A, il s'est produit une *onde dilatée* de même longueur que l'onde condensée, et la suivant immédiatement dans le tube cylindrique, où elles se propagent ensemble, les tranches correspondantes des deux ondes possédant des vitesses égales et contraires.

L'ensemble de l'onde condensée et de l'onde raréfiée forme une *onde sonore*; c'est-à-dire qu'une onde sonore comprend la partie de la colonne d'air modifiée pendant une allée et un retour du piston; la *longueur* de l'onde sonore est l'épaisseur de l'onde condensée et de l'onde dilatée réunies, c'est-à-dire l'espace que le son parcourt pendant la durée d'une vibration complète du corps qui le produit. Cette longueur est d'autant moindre, que les vibrations sont plus rapides.

On passe facilement de la théorie du mouvement des ondes sonores dans un tube, à celle de leur mouvement dans un milieu indéfini dans tous les sens; il suffit, pour cela, d'appliquer dans toutes les directions, à chaque molécule des corps vibrants, ce qui

vient d'être dit d'un piston mobile dans un tuyau. Il se produit, en effet, autour de chaque centre d'ébranlement, une suite d'ondes sphériques alternativement condensées et raréfiées. Ces ondes étant comprises entre deux surfaces sphériques concentriques dont les rayons croissent graduellement, tandis que la longueur d'ondulation reste la même, leur masse augmentée à mesure qu'elles s'éloignent du centre d'ébranlement; il en résulte que la vitesse de vibration imprimée aux molécules s'affaiblit graduellement et que l'intensité du son diminue.

Ce sont ces ondes sphériques alternativement condensées et raréfiées qui, en se propageant dans l'air, transmettent le son. Si plusieurs points sont ébranlés en même temps, il se produit autour de chacun un système d'ondes semblable au précédent. Or toutes ces ondes se transmettent les unes à travers les autres, sans modifier ni leur longueur ni leur vitesse. Tantôt les ondes condensées ou dilatées se superposent avec des ondes de même nature, de manière à produire un effet égal à leur somme; tantôt elles se rencontrent et produisent un effet égal à leur différence. Il suffit d'ébranler en plusieurs points la surface d'une eau tranquille pour rendre visible cette *coexistence des ondes*.

207. Causes qui font varier l'intensité du son. — Ces causes sont : la distance du corps sonore, l'amplitude des vibrations, la densité de l'air dans le lieu où le son se produit, la direction des courants d'air, et enfin le voisinage d'autres corps sonores.

1° L'intensité du son est en raison inverse du carré de la distance du corps sonore. Cette loi, à laquelle on est conduit par la théorie, peut aussi se démontrer expérimentalement. Concevons, en effet, plusieurs sons exactement d'égale intensité, produits, par exemple, par des timbres identiques frappés par des marteaux de même poids, tombant de hauteurs égales. Si l'on place quatre de ces timbres à une distance de 20 mètres de l'oreille, et un seul à une distance de 10 mètres, on observe que ce dernier, frappé seul, rend un son de même intensité que les quatre premiers timbres frappés simultanément; ce qui fait voir que, pour une distance double, l'intensité est quatre fois moindre.

2° L'intensité du son augmente avec l'amplitude des vibrations du corps sonore. La liaison qui existe entre l'intensité du son et l'amplitude des vibrations se constate facilement à l'aide des cordes vibrantes; en effet, si les cordes sont un peu longues, les oscillations sont sensibles à l'œil, et l'on vérifie que, l'amplitude des oscillations décroissant, le son s'affaiblit.

3° L'intensité du son dépend de la densité de l'air dans le lieu où il se produit. Lorsqu'on place sous le récipient de la machine

pneumatique une sonnerie mue par un mouvement d'horlogerie, l'intensité du son décroît à mesure qu'on raréfie l'air.

Dans l'hydrogène, qui est environ 14 fois moins dense que l'air, les sons ont une intensité beaucoup plus faible, quoique la pression soit la même. Dans l'acide carbonique, au contraire, dont la densité, par rapport à l'air, est de 1,529, les sons deviennent plus intenses. Sur les hautes montagnes, où l'air est très-raréfié, il faut parler avec effort pour se faire entendre, et l'explosion d'une arme à feu n'y produit qu'un son faible.

4° *L'intensité du son est modifiée par l'agitation de l'air et la direction des vents.* On constate que, par un temps calme, le son se propage toujours mieux que lorsqu'il fait du vent, et qu'en ce dernier cas le son est plus intense, à distance égale, dans la direction du vent que dans la direction contraire.

5° *Le son est renforcé par le voisinage d'un corps sonore.* Une corde d'instrument, tendue à l'air libre, ne rend qu'un son faible loin de tout corps sonore; mais qu'elle soit tendue au-dessus d'une caisse sonore, comme dans la guitare, le violon ou la basse, elle rend un son plein et intense; ce qui est dû à ce que la caisse et l'air qu'elle contient vibrent à l'unisson avec la corde (230). De là l'emploi des caisses sonores dans les instruments à cordes.

. 208. **Influence des tuyaux sur l'intensité du son.** — La loi que l'intensité du son est en raison inverse du carré de la distance, n'est pas applicable aux sons transmis par des tuyaux, surtout si ceux-ci sont cylindriques et droits. Les ondes sonores ne se propageant plus alors sous la forme de sphères concentriques croissantes, le son peut être porté à une distance considérable sans altération bien sensible. Biot a constaté que, dans un tuyau de conduite des eaux de Paris, long de 951 mètres, la voix perd si peu de son intensité, que, d'une extrémité à l'autre de ce tuyau, on peut entretenir une conversation à voix basse. Toutefois l'affaiblissement du son devient sensible dans les tubes d'un grand diamètre, ou dont les parois présentent des anfractuosités. C'est ce qu'on observe dans les souterrains et dans les longues galeries.

Cette propriété qu'ont les tubes de porter au loin les sons est utilisée pour transmettre les ordres dans les hôtels et dans les grands établissements au moyen de tubes de caoutchouc, d'un petit diamètre, passant d'une pièce à l'autre au travers des murs. Si l'on parle d'une voix peu élevée à l'une des extrémités, on l'est entendu très-distinctement à l'autre.

209. **Vitesse du son dans les gaz.** — La propagation des ondes sonores étant successive, le son ne peut se transmettre d'un lieu à un autre que dans un intervalle de temps plus ou moins long.

C'est ce que démontrent un grand nombre de phénomènes. Par exemple, le bruit de la foudre ne se fait entendre qu'un certain temps après qu'on a vu l'éclair, bien que le bruit et l'éclair se produisent simultanément dans la nue.

De nombreuses tentatives ont été faites pour déterminer la vitesse du son dans l'air, c'est-à-dire l'espace qu'il parcourt en une seconde. La dernière fut faite dans l'été de 1822, pendant la nuit, par les membres du Bureau des longitudes. On avait choisi pour stations deux hauteurs situées, l'une à Villejuif, l'autre à Montlhéry, près de Paris. A chaque station, on tirait, de dix en dix minutes, un coup de canon. Les observateurs de Villejuif entendirent très-distinctement les douze coups tirés à Montlhéry; mais ceux de cette station n'entendirent que sept coups, sur douze tirés à Villejuif, la direction du vent étant contraire.

A chaque station, on notait, au moyen de chronomètres, le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière, au moment de l'explosion, et l'audition du son. Ce temps pouvait être pris pour celui qu'employait le son à se propager d'une station à l'autre, car l'intervalle des deux stations n'était que de 18 612^m, 52, et l'on verra, en optique, que, pour parcourir cette distance, il faut à la lumière un temps inappréciable. On constata ainsi que la durée moyenne de propagation entre les deux stations était de 54^s, 6. Divisant par ce nombre l'intervalle des deux stations, on trouve que la vitesse du son, par seconde, est de 340^m, 89, à la température de 16 degrés, qui était celle de l'air pendant l'expérience.

La vitesse du son dans l'air décroît avec la température : à 10 degrés, elle n'est que de 337 mètres; à zéro, de 333 mètres. Mais, pour une même température, elle est indépendante de la densité de l'air, et, par conséquent, de la pression. A température égale, elle est la même pour tous les sons, forts ou faibles, graves ou aigus. En effet, Biot constata, dans les expériences ci-dessus mentionnées sur la conductibilité des tuyaux, que lorsqu'on jouait de la flûte à l'extrémité d'un tuyau de fonte de 951 mètres de longueur, les sons gardaient leur rythme à l'autre extrémité; ce qui indique que les différents sons se propagent avec des vitesses égales. Cependant ceci ne doit pas être admis d'une manière générale pour les sons qui ont une origine dissemblable, comme le bruit du canon, par exemple, et le son d'un instrument ou de la voix humaine. C'est du moins ce que tend à prouver l'observation suivante, faite par le capitaine Parry, pendant son expédition dans les mers du Nord. Ayant un jour fait faire l'exercice du canon, et les artilleurs ne faisant feu qu'au commandement donné par l'officier, plusieurs personnes, placées à une assez grande distance des

pièces, entendirent le bruit du canon avant d'avoir entendu le commandement de faire feu, ce qui indiquerait que les sons produits avec violence se propagent plus vite.

La vitesse du son varie d'un gaz à un autre, quoique la température soit la même. A l'aide des formules sur les tuyaux sonores (255), Dulong a trouvé qu'à la température de zéro, la vitesse du son, dans les gaz suivants, est :

Acide carbonique.	261 mètres.
Oxygène	317
Air	333
Oxyde de carbone	337
Hydrogène	1269

210. **Formules pour calculer la vitesse du son dans les gaz.** — Newton, le premier, a donné pour calculer la vitesse du son dans les gaz, à la température de zéro, la formule $v = \sqrt{\frac{e}{d}}$, dans laquelle v représente la vitesse du son, c'est-à-dire l'espace qu'il parcourt en une seconde; e l'élasticité du gaz à zéro, et d sa densité aussi à zéro.

On conclut de cette formule que la vitesse de propagation du son dans un gaz est directement proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité du gaz, et inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité. D'où, pour un même gaz, cette vitesse reste constante, quelle que soit la pression; car, l'élasticité augmentant, la densité augmente dans le même rapport d'après la loi de Mariotte.

En représentant par g l'intensité de la pesanteur, par h la hauteur du baromètre ramenée à zéro, et par δ la densité du mercure aussi à zéro, pour un gaz soumis à la pression atmosphérique, l'élasticité e croissant comme chacune de ces quantités, on peut poser $e = gh\delta$. La formule de Newton devient donc,

pour la température de zéro, $v = \sqrt{\frac{gh\delta}{d}}$.

Or la température d'un gaz augmentant de 0 à t degrés, son volume croît, et sa densité varie en raison inverse du volume; par conséquent, si l'on représente par 1 le volume du gaz à zéro, et par α l'accroissement que prend l'unité de volume en s'échauffant de 1 degré, le volume à t degrés sera $1 + \alpha t$ (325). Par

suite, la densité, qui est d à zéro, sera $\frac{d}{1 + \alpha t}$ à t degrés. La formule de Newton, pour une température t , doit donc s'écrire

$$v' = \sqrt{\frac{gh\delta}{d}(1 + \alpha t)}, \text{ ou } v' = \sqrt{\frac{gh\delta}{d}} \cdot \sqrt{1 + \alpha t} = v \sqrt{1 + \alpha t};$$

v' étant la vitesse à t degrés, et v la vitesse à zéro.

Les valeurs de v obtenues par cette formule ont toujours été plus petites que celles fournies par l'expérience. Laplace a donné, pour cause de cette différence, la chaleur qui se développe, par l'effet de la pression, dans des ondes condensées.

En s'appuyant sur les idées de Laplace, Poisson et Biot ont trouvé que la formule de Newton doit être ramenée à la formule $v = \sqrt{\frac{gh\delta}{d}(1 + \alpha t)\frac{c}{c'}}$;

c étant la chaleur spécifique, à pression constante, du gaz dans lequel le son se propage (402), et c' sa chaleur spécifique à volume constant. On va voir que cette formule n'est pas, dans tous les cas, rigoureusement d'accord avec l'expérience (211).

* 211. **Expériences de M. Regnault sur la propagation des ondes.** — Dans la théorie mathématique qui a conduit à la formule ci-dessus, on a supposé les gaz *parfaits*, c'est-à-dire soumis rigoureusement à la loi de Mariotte, et tous également dilatables; de plus, on a admis que la compression qui existe dans l'onde condensée est infiniment petite par rapport à la pression barométrique que supporte le gaz. Or M. Regnault ayant trouvé qu'aucune de ces conditions n'est rigoureusement satisfaite, on devait s'attendre à ce que la formule et l'expérience ne seraient pas toujours d'accord; c'est, en effet, ce que prouvent les résultats suivants, obtenus récemment par M. Regnault.

1^o Théoriquement, dans un tuyau cylindrique et rectiligne, une onde plane se propage avec une intensité constante (206); mais M. Regnault a observé que l'intensité de l'onde, dans un tuyau, décroît successivement, et que la distance à laquelle elle cesse d'être perceptible, dans le tuyau, est approximativement proportionnelle au diamètre de celui-ci.

On produisait des ondes d'égale intensité à l'aide d'un même pistolet chargé de 1 gramme de poudre et tiré à l'orifice de tuyaux de conduite de différents diamètres; puis on cherchait la distance à laquelle le son n'était plus appréciable à l'oreille, ou n'agissait plus sur une *membrane sensible*. On nomme ainsi une membrane très-flexible, fixée en travers des tuyaux et munie, à son centre, d'un petit disque de cuivre. Celui-ci, lorsque la membrane commence à vibrer, frappe un contact métallique, et ferme un courant électrique (296) qui va tracer sur un chronographe l'instant précis où la membrane a reçu l'onde sonore.

En expérimentant ainsi, M. Regnault a trouvé qu'un pistolet chargé de 1 gramme de poudre donne un son qui n'est plus perceptible à l'oreille quand il a parcouru

1159 mètres dans un tuyau d'un diamètre de	0 ^m ,108
3810	0 ^m ,300
9540	1 ^m ,100

L'onde qui n'agit plus sur l'oreille agit encore sur les membranes, dans les tuyaux ci-dessus, respectivement aux distances de 4156, 11430 et 19851 mètres.

Suivant M. Regnault, la principale cause qui affaiblit l'intensité du son dans les tuyaux cylindriques est une perte de force vive (37) par la réaction des parois élastiques des tuyaux.

2^o D'après la formule théorique de Blot et Poisson, la vitesse de propagation d'une onde est la même à toutes les distances, quelle que soit son intensité. Or M. Regnault a constaté que la vitesse, dans les tuyaux ci-dessus, diminue d'autant plus rapidement, que la section est moindre, phénomène résultant de la nature et du degré de poli des parois.

3^o Les sons aigus se propagent dans les tuyaux beaucoup moins facilement que les sons graves; en effet, dans les tuyaux très-longs, pour bien entendre la voix humaine, il faut faire chanter une voix de baryton.

4^o Ainsi que l'indique la formule théorique, l'expérience confirme que la vitesse de propagation dans les gaz est indépendante de la pression.

5^o L'expérience vérifie encore que, dans des gaz différents, les vitesses sont en raison inverse des racines carrées des densités.

6^o Enfin, en expérimentant dans l'air libre par la méthode des coups de canon réciproques, M. Regnault a trouvé que la vitesse du son, dans l'air libre, sec et à zéro, est de 330^m,7, au lieu de 333 (209).

212. **Vitesse du son dans les liquides et les solides.** — La vitesse du son dans les liquides est beaucoup plus grande que dans l'air. Colladon et Sturm ont trouvé, par des expériences faites, en 1827, sur le lac de Genève, que la vitesse du son dans l'eau est de 1435 mètres à la température de 8^o,1. C'est plus que le quadruple de celle qui a lieu dans l'air.

Dans les solides, la vitesse du son est encore plus grande. En expérimentant sur des tuyaux de fonte destinés à la conduite des eaux, Biot a trouvé que, dans la fonte, le son se propage 10,5 fois plus vite que dans l'air. La vitesse du son dans les autres solides a été déterminée théoriquement par Chladni, Savart, Masson et Wertheim, en s'appuyant, soit sur le nombre des vibrations longitudinales ou transversales des corps, soit sur leur coefficient d'élasticité. Chladni a trouvé, à l'aide des vibrations longitudinales, que, dans les différentes espèces de bois, la vitesse est de 10 à 16 fois plus grande que dans l'air. Dans les métaux, elle est plus variable, et égale de 4 à 16 fois celle qui a lieu dans l'air.

213. **Réflexion du son.** — Tant que les ondes sonores ne sont

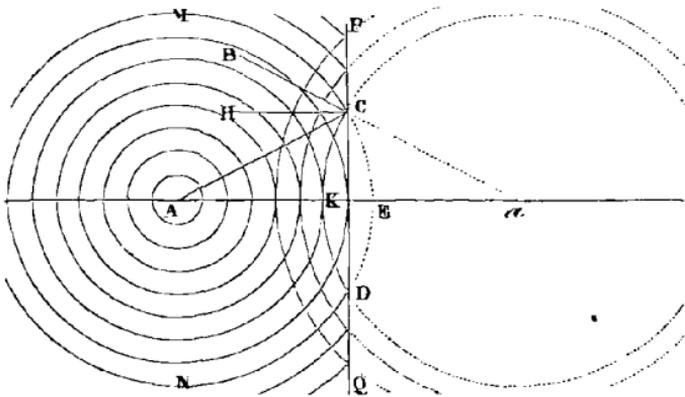


Fig. 173.

point gênées dans leur développement, elles se propagent sous forme de sphères concentriques; mais lorsqu'elles rencontrent un obstacle, elles suivent la loi générale des corps élastiques, c'est-à-dire qu'elles reviennent sur elles-mêmes, en formant de nouvelles ondes concentriques qui semblent émaner d'un second centre situé de l'autre côté de l'obstacle; ce qu'on exprime en disant que les ondes sont *réfléchies*.

La figure 173 représente une suite d'ondes incidentes, réfléchies sur un obstacle PQ. Si l'on considère, par exemple, l'onde incidente MCDN, émise du centre A, l'onde réfléchie correspondante est représentée par l'arc CKD, dont le point *a* est le *centre virtuel*. La droite AC, suivant laquelle se propage le son de A en C, est un *rayon sonore*; et si l'on mène par le point C une perpendiculaire CH à la surface réfléchissante, l'angle ACH que fait le rayon sonore avec cette perpendiculaire se nomme *angle d'inci-*

dence; enfin, l'angle BCH, que fait le rayon sonore réfléchi BC avec la même perpendiculaire, est l'angle de réflexion.

Cela posé, la réflexion du son est soumise aux deux lois suivantes, qui sont les mêmes pour la chaleur et la lumière :

1^o L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

2^o Le rayon sonore incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

On verra (427) comment ces deux lois se vérifient pour la chaleur au moyen de deux miroirs concaves placés en regard l'un de l'autre à plusieurs mètres de distance. Or on les vérifie de la même manière pour le son, en suspendant une montre au foyer de l'un des miroirs, et en plaçant l'oreille au foyer de l'autre. Les battements de la montre, renvoyés par un effet de réflexion du premier miroir au second et à l'oreille, sont alors entendus distinctement par l'observateur.

D'après ces lois, l'onde qui, dans la figure, se propage suivant AC, prend, après la réflexion, la direction CB; en sorte qu'un observateur placé en B entend, outre le son parti du point A, un deuxième son qui lui semble émis dans la direction CB.

214. **Échos et résonances.** — On nomme *écho* la répétition d'un son dans l'air par l'effet de sa réflexion sur quelque obstacle.

Pour un son très-bref, comme un choc, il peut y avoir écho, lorsque la surface réfléchissante est distante seulement de 17 mètres. C'est la limite qu'on admet ordinairement pour tous les sons; mais pour les sons articulés, il faut au moins une distance double, c'est-à-dire 34 mètres. En effet, il est facile de constater qu'on ne peut prononcer ou entendre bien distinctement plus de cinq syllabes par seconde. Or la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, il s'ensuit que, dans un cinquième de seconde, le son parcourt 68 mètres. Par conséquent, si l'obstacle réfléchissant est à une distance de 34 mètres, le son, tant pour aller jusqu'à l'obstacle que pour revenir, aura 68 mètres à parcourir. Le temps écoulé entre le son articulé et le son réfléchi sera donc d'un cinquième de seconde; dès lors les deux sons ne se confondront pas, et le son réfléchi sera entendu distinctement. D'après ce qui précède, si l'on parle à voix haute devant un réflecteur distant de 34 mètres, on ne peut distinguer que la dernière syllabe réfléchie; l'écho est donc *monosyllabique*. Si le réflecteur est distant de deux fois, trois fois 34 mètres, l'écho sera *dissyllabique*, *trissyllabique*, et ainsi de suite.

Lorsque la distance de la surface réfléchissante est moindre que 34 mètres, le son direct et le son réfléchi tendant à se confondre, on ne peut les entendre séparément; mais le son se trouve ren-

forcé, ce qu'on exprime en disant qu'il y a *résonnance*. C'est ce qu'on observe dans les grands appartements. Les salles nues sont très-retentissantes; au contraire, les tentures, les draperies, qui réfléchissent mal le son, rendent les appartements *sourds*.

On nomme *échos multiples* ceux qui répètent plusieurs fois le même son : c'est ce qui arrive lorsque deux obstacles placés l'un vis-à-vis de l'autre, deux murs parallèles par exemple, se renvoient successivement le son. Il existe des échos qui répètent ainsi jusqu'à vingt ou trente fois le même son. On cite particulièrement celui du château de Simonetta, près de Milan.

Lorsqu'on parle sous une arche de pont de pierre, la face tournée contre l'une des piles, la voix peut se reproduire auprès de l'autre pile avec assez d'intensité pour qu'on entretienne ainsi une conversation à voix basse, sans que des personnes placées dans l'espace intermédiaire puissent l'entendre. Il existe, au rez-de-chaussée du Conservatoire des arts et métiers de Paris, une salle carrée, à voûte elliptique, qui présente ce phénomène d'une manière remarquable, lorsqu'on se place aux deux foyers de l'ellipse.

Du reste, le son ne se réfléchit pas seulement à la surface des corps solides; il se réfléchit aussi sur les nuages, à la rencontre d'une couche d'air de densité différente de celle qu'il vient de traverser, enfin sur les vésicules mêmes des brouillards. On observe, en effet, que, si l'air est brumeux, les sons subissent une foule de réflexions partielles, et s'éteignent rapidement. C'est la nuit, lorsque l'air est calme et d'une densité uniforme, que les sons peuvent être entendus de plus loin.

215. Réfraction du son. — On verra plus tard qu'on entend par *réfraction* un changement de direction qu'éprouvent la lumière et la chaleur en passant d'un milieu dans un autre. Or Sondhauss a constaté que les ondes sonores se réfractent comme la chaleur et la lumière.

Pour cela, on coupe, sur un grand ballon de collodion, deux segments égaux, et on les fixe sur les deux faces d'un anneau de tôle ayant 31 centimètres de diamètre, de manière à former une lentille biconvexe, creuse, dont l'épaisseur, au centre, est d'environ 12 centimètres. Puis, remplissant d'acide carbonique la lentille ainsi formée, on place une montre sur la direction de l'axe, et on cherche ensuite, de l'autre côté de la lentille, le point où le bruit de la montre est entendu avec plus d'intensité. On observe ainsi que, tant que l'oreille est éloignée de l'axe, le son est à peine perceptible; mais que, lorsqu'elle est sur l'axe, à une distance convenable de la lentille, le son est entendu très-distinctement : les ondes sonores, à leur sortie de la lentille, viennent donc concou-

rir vers l'axe; ce qui montre qu'elles ont changé de direction, et, par conséquent, qu'elles se sont réfractées.

216. **Porte-voix, cornet acoustique.** — Le *porte-voix* et le *cornet acoustique* sont deux instruments fondés à la fois sur le renforcement et la conductibilité du son par les tuyaux (208).

Le *porte-voix*, ainsi que l'indique son nom, est destiné à transmettre la voix à de grandes distances. C'est un tube de fer-blanc ou de laiton (fig. 174), légèrement conique et très-évasé à l'une de



Fig. 174.

ses ouvertures, qu'on nomme *pavillon*. Cet instrument, qui s'embouche par l'autre extrémité, porte la voix d'autant plus loin, que ses dimensions sont plus grandes. On explique, en général, les effets du *porte-voix* par une suite de réflexions successives des ondes sonores sur les parois du tube, réflexions en vertu desquelles les ondes tendent à se propager de plus en plus suivant une direction parallèle à l'axe de l'instrument. On a objecté à cette théorie que les sons émis à travers le *porte-voix* ne sont pas renforcés seulement dans la direction de son axe, mais dans toutes; et encore que le *pavillon* serait inutile pour obtenir le parallélisme des rayons sonores, tandis qu'au contraire il exerce une influence considérable sur l'intensité des sons transmis. Enfin, en doublant d'une étoffe de laine l'intérieur du *porte-voix*, l'effet en est peu affaibli. Les effets de cet instrument doivent donc plutôt être expliqués par un renforcement produit par la colonne d'air qui est dans le tube, laquelle vibre à l'unisson, à mesure qu'on parle à son extrémité. Quant à l'effet du *pavillon*, on n'en a point donné jusqu'ici d'explication satisfaisante.

Le *cornet acoustique* sert aux personnes qui ont l'oreille *dure*. C'est un tube conique de métal, dont l'une des extrémités, terminée en *pavillon*, est destinée à recevoir le son, tandis que l'autre extrémité est introduite dans l'oreille. Le *pavillon* sert ici d'embouchure, c'est-à-dire qu'il reçoit les sons venant de la bouche de la personne qui parle. Ces sons se transmettent par une suite de réflexions dans l'intérieur du *cornet*, en sorte que les ondes qui eussent pris un grand développement se trouvent concentrées dans l'appareil auditif, et y produisent un effet beaucoup plus sensible que ne l'eussent fait des ondes divergentes.

217. **Stéthoscope.** — On nomme ainsi un petit instrument dont on se sert en médecine pour ausculter les malades. On en a imaginé plusieurs. Nous donnons ici celui construit par Kœnig. C'est une espèce de cornet acoustique consistant en une capsule de cuivre fermée par une membrane de caoutchouc *c*, et divisée à l'intérieur en deux compartiments par une seconde membrane *a*, de manière qu'en insufflant, par un robinet latéral, de l'air entre les deux membranes, elles prennent la forme d'une lentille biconvexe, comme le montre, en coupe, la figure 175. Du centre de la

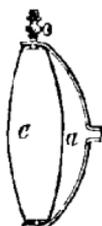


Fig. 175.

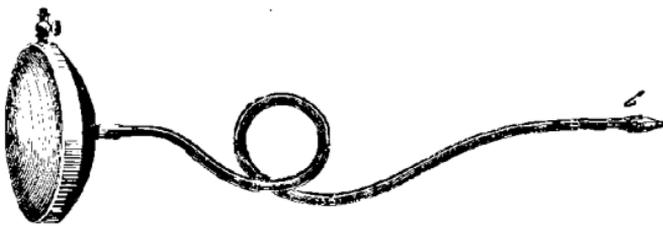


Fig. 176.

capsule de cuivre part un tuyau de caoutchouc terminé par un bout de corne ou d'ivoire *b*, qu'on introduit dans l'oreille (fig. 176).

En appliquant la membrane *c* sur la poitrine d'un malade, les battements du cœur et les bruits de la respiration se transmettent fidèlement à l'air renfermé dans la chambre *ca*, et de là à l'oreille par le tuyau de caoutchouc. On peut même s'ausculter soi-même, et si plusieurs tuyaux sont adaptés à l'appareil, autant d'observateurs peuvent ausculter simultanément le même sujet.

CHAPITRE II

MESURE DU NOMBRE DES VIBRATIONS

218. **Méthodes pour mesurer le nombre des vibrations.** — Ces méthodes sont : 1^o la méthode acoustique, comprenant la sirène et la roue de Savart ; 2^o la méthode graphique, comprenant l'appareil de Duhamel et le phonautographe de Scott ; 3^o la méthode optique de Lissajous ; 4^o les flammes manométriques.

219. **Sirène.** — La *sirène* est un petit appareil qui sert à mesurer le nombre des vibrations d'un corps sonore en un temps donné. Cagniard-Latour, qui en est l'inventeur, a donné le nom de sirène à cet instrument, parce qu'on peut lui faire rendre des sons sous l'eau.

La figure 177 représente la sirène montée sur le sommier d'une

soufflerie (220), et les figures 178 et 179 en donnent les détails intérieurs. A la partie inférieure de l'instrument, qui est tout de cuivre, est une caisse cylindrique O, recouverte d'un plateau fixe B. Sur ce plateau s'appuie une tige verticale T, à laquelle est fixé un disque A, qui peut tourner librement avec la tige; des trous circulaires équidistants sont pratiqués dans le plateau B, et

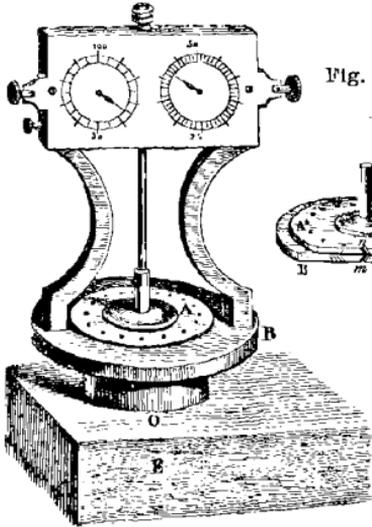


Fig. 177 (h = 17).

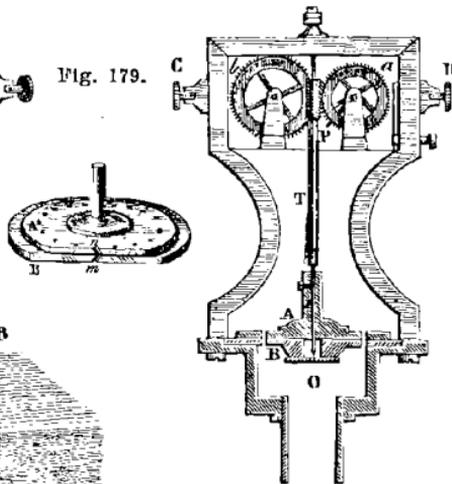


Fig. 178.

dans le disque A se trouve un nombre égal de trous de même grandeur et à la même distance du centre que ceux du plateau. Ces trous ne sont point perpendiculaires aux plans du plateau et du disque; mais, inclinés tous de la même quantité dans le plateau, ils le sont en sens contraire dans le disque, de manière que, lorsque les trous du plateau et ceux du disque sont en regard, ils sont disposés comme le représente la figure 179, qui donne une coupe des deux disques A et B suivant les deux trous antérieurs, au moment où ils se correspondent. Il résulte de cette disposition que lorsqu'un courant d'air rapide arrive de la soufflerie dans la caisse cylindrique et dans le trou *m*, il frappe obliquement les parois du trou *n*, et imprime au disque A un mouvement de rotation dans le sens *An*.

Pour simplifier l'explication du jeu de la sirène, supposons d'abord que, le disque mobile A portant 18 trous, le plateau fixe B ne soit percé que d'un seul, et considérons le cas où celui-ci coïncide avec un des trous supérieurs. Le vent de la soufflerie venant à frapper obliquement la paroi de ce dernier, le disque mobile se met à

tourner, et le plein qui se trouve entre deux trous consécutifs vient fermer le trou du plateau inférieur. Mais le disque continuant à tourner, en vertu de sa vitesse acquise, deux trous se trouvent de nouveau en regard, d'où résulte une nouvelle impulsion, et ainsi de suite. De la sorte, pendant une révolution complète du disque, l'orifice inférieur est 18 fois ouvert et 18 fois fermé. Il en résulte une suite d'écoulements et d'arrêts qui font entrer l'air en vibration, et finissent ainsi par produire un son, quand les impulsions successives sont assez rapides. Si l'on suppose actuellement que le plateau fixe B ait 18 trous, comme le disque tournant, chaque trou produira simultanément le même effet qu'un seul; le son sera donc 18 fois plus intense, mais le nombre des vibrations n'en sera pas augmenté. Dans les deux cas, il est de 18 vibrations doubles par chaque révolution du disque A.

Pour connaître le nombre de vibrations correspondant au son que rend l'appareil pendant son mouvement de rotation, il reste à savoir combien le disque A fait de révolutions par seconde. Pour cela, la tige T porte une vis sans fin qui transmet le mouvement à une roue *a* garnie de 100 dents. Cette roue, qui avance d'une dent pour chaque révolution du disque, porte un taquet P, qui, à chaque tour, fait marcher d'une dent une seconde roue *b* qu'on voit à gauche dans la figure 178. Les axes de ces roues font tourner deux aiguilles qui se meuvent sur des cadrans (fig. 177). Ces aiguilles indiquent, l'une le nombre des tours du disque A, l'autre les centaines de tours. Deux boutons D et C servent à engrener ou à désengrener à volonté la petite roue *a* avec la vis sans fin.

Comme le son s'élève à mesure que la vitesse du disque A s'accroît, il suffit de forcer le vent de la soufflerie pour parvenir à faire rendre à l'appareil un son déterminé. On entretient alors le même courant d'air pendant un certain temps, 20 secondes par exemple; puis on lit sur les cadrans le nombre de tours qu'a faits le disque. En multipliant ce nombre par 18 et divisant le produit par le nombre de secondes 20, le quotient indique le nombre de vibrations doubles par seconde correspondant au son donné.

La sirène, à vitesse égale, donne le même son sous l'eau que dans l'air; il en est de même dans tous les gaz: ce qui fait voir qu'un son déterminé ne dépend que du nombre des vibrations, et non de la nature du corps sonore.

220. **Soufflerie.** — La soufflerie sert à faire parler les tuyaux. Elle se compose d'un fort soufflet S, qui est placé entre les quatre pieds d'une table, et marche au moyen d'une pédale P (fig. 180). L'air refoulé par le soufflet se rend dans un réservoir de cuir R, très-flexible, qui se gonfle à mesure que l'air y arrive. Comprimé

par deux plaques de plomb qui chargent le réservoir, l'air passe par un tuyau A dans un coffre *mn*, qui est placé sur la table et qu'on nomme *sommier*; de là il se distribue aux différents tuyaux placés dessus. Pour cela, les trous dans lesquels s'engagent les pieds des tuyaux sont fermés par des soupapes *s* (fig. 181) qui

Fig. 180
(h = 1^m,507).

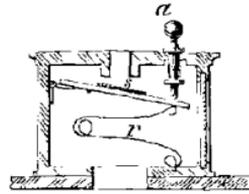
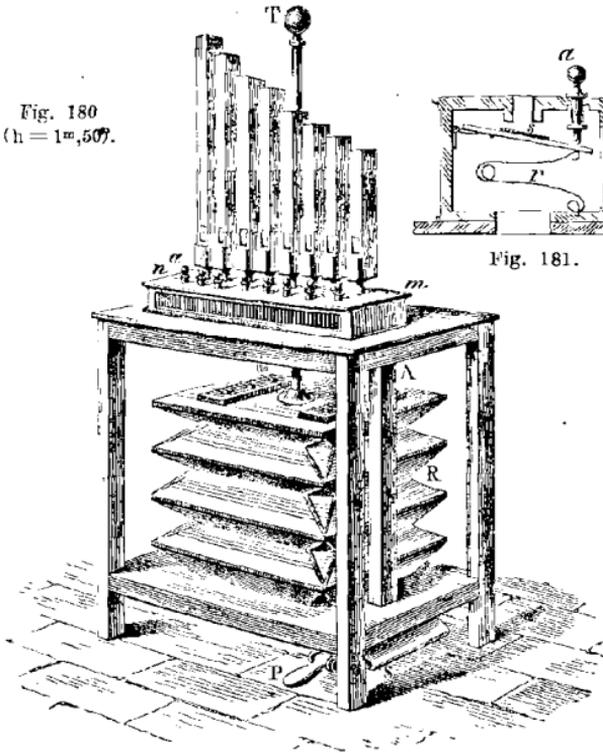


Fig. 181.

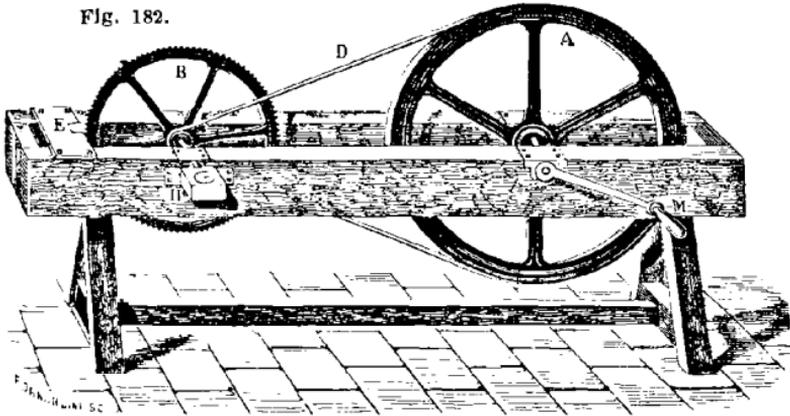
s'opposent au passage de l'air; mais devant chaque tuyau est une touche *a*, qui, lorsqu'on appuie dessus, fait ouvrir la soupape et laisse passer l'air. Au-dessous de la soupape est un ressort *r*, qui la soulève dès qu'on cesse d'appuyer sur la touche.

221. **Roue de Savart.** — La *roue de Savart*, ainsi nommée du nom de son inventeur, est un appareil destiné à faire connaître le nombre absolu de vibrations qui correspond à un son déterminé. Il est formé d'un banc de chêne solidement établi et ouvert dans toute sa longueur. Dans l'ouverture sont montées deux roues A et B (fig. 182) : la première sert à imprimer une grande vitesse à la plus petite, et cette dernière, qui est garnie de dents, est destinée à faire vibrer une carte E fixée sur le banc. Cette carte, étant

choquée au passage de chaque dent, fait, par révolution de la petite roue, autant de vibrations complètes qu'il y a de dents. Enfin, sur le côté de l'appareil est un compteur H, qui reçoit son mouvement de l'axe de la roue dentée, et qui indique le nombre de tours et, par suite, le nombre de vibrations dans un temps donné.

Si l'on imprime d'abord à la roue dentée un mouvement lent, on entend distinctement les chocs successifs des dents contre la carte; mais si l'on augmente graduellement la vitesse, on obtient un son continu de plus en plus élevé. Lorsqu'on est parvenu à reproduire le son dont on veut connaître le nombre de vibrations, on entretient la même vitesse pendant un nombre de secondes déterminé; lisant ensuite, sur le compteur, le nombre de tours de la roue dentée, il ne reste plus qu'à multiplier ce nombre par celui des dents, pour obtenir le nombre total des vibrations. Di-

Fig. 182.



visant enfin ce produit par le nombre de secondes correspondant, le quotient donne le nombre de vibrations par seconde.

222. Limite des sons perceptibles. — Avant les travaux de Savart, les physiiciens admettaient que l'ouïe cessait de percevoir le son lorsque le nombre des vibrations doubles, par seconde, était au-dessous de 16 pour les sons graves, et au-dessus de 9 000 pour les sons aigus. Mais ce savant a fait voir que ces limites étaient trop resserrées, et que la faculté de percevoir des sons très-graves ou très-aigus dépend plutôt de l'intensité que de la hauteur; en sorte que, quand les sons extrêmes ne sont pas entendus, cela tient à ce que ces sons n'ont pas été produits avec une intensité suffisante pour impressionner l'organe de l'ouïe.

En augmentant le diamètre de sa roue dentée, et, par suite,

l'amplitude et l'intensité des vibrations, Savart a reculé la limite des sons aigus jusqu'à 24 000 vibrations doubles par seconde.

Pour les sons graves, il a substitué à sa roue dentée une barre de fer de 65 centimètres de longueur, tournant entre deux lames de bois minces, distantes de la barre de 2 millimètres seulement. A chaque passage, il se produit un son sec, dû au déplacement de l'air. Le mouvement s'accélégrant, le son devient continu, extrêmement plein et assourdissant. Savart a trouvé ainsi que lorsqu'il se produit de 7 à 8 vibrations doubles par seconde, l'oreille percevoit encore un son bien déterminé, mais très-grave.

Despretz, qui a fait des recherches sur le même sujet, a trouvé 16 vibrations doubles pour limite des sons graves, et 36 850 pour limite des sons aigus.

* 223. **Méthode graphique.** — En faisant usage de la sirène ou de la roue de Savart, il est difficile de déterminer avec précision le nombre de vibrations



Fig. 184.

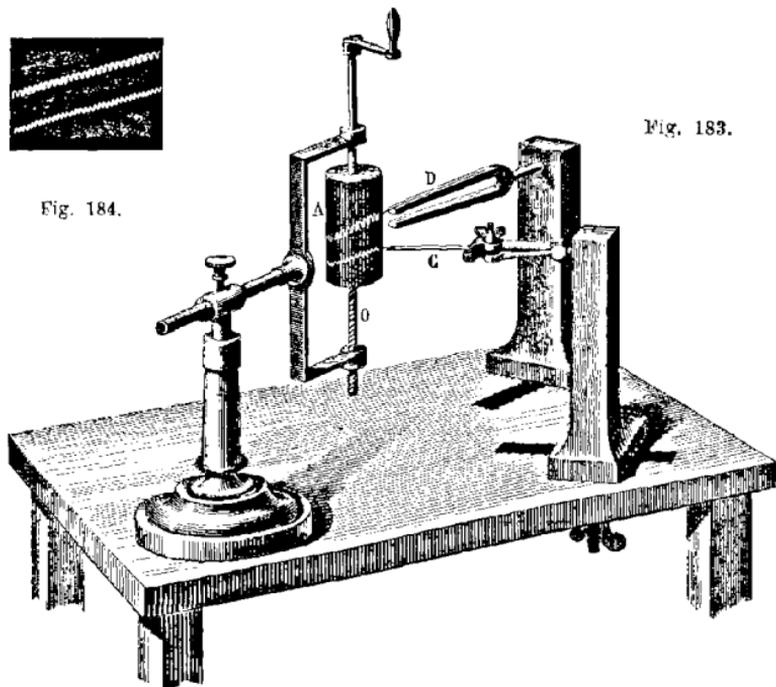


Fig. 183.

correspondant à un son donné, puisqu'il faut les mettre à l'unisson de celui-ci, ce qui demande une oreille exercée. La méthode graphique ne présente pas cette difficulté. Elle consiste à fixer sur le corps sonore un style léger qui en trace les vibrations sur une surface convenablement préparée.

L'appareil suivant, fondé sur cette méthode et imaginé par Duhamel, consiste en un cylindre A, de bois ou de métal, fixé à un axe vertical O (fig. 183).

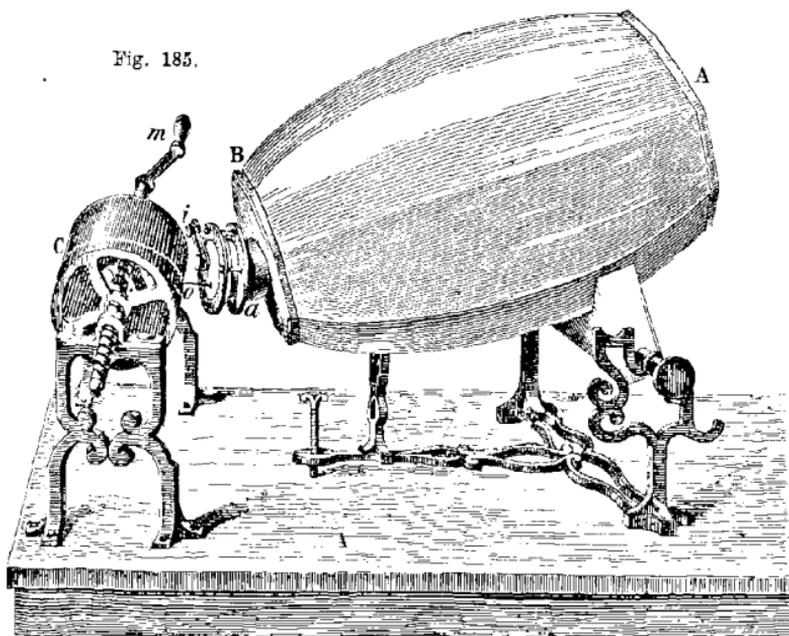
On fait tourner celui-ci à l'aide d'une manivelle, et, tout en tournant dans un sens ou dans l'autre, il prend un mouvement de haut en bas ou de bas en haut, au moyen d'un pas de vis tracé sur l'axe même et passant dans un écrou. Autour du cylindre est enroulée une feuille de papier sur laquelle est déposée une couche légère et non adhérente de noir de fumée. C'est sur cette couche que s'inscrivent les vibrations. Pour cela, le corps sonore étant, par exemple, une lame élastique *C* solidement encastrée à une de ses extrémités, on fixe à l'autre un style léger qui rase la surface du cylindre pendant sa rotation. Si celui-ci tourne sans que la lame vibre, le style trace en blanc sur le fond noir un trait hélicoïdal régulier; mais si la lame vibre, le trait est ondulé, et autant d'ondulations, autant de vibrations de la lame. Il ne reste plus qu'à déterminer le temps pendant lequel se sont effectuées ces vibrations.

On peut y arriver de plusieurs manières: la plus simple est de comparer la courbe tracée par la lame vibrante à celle tracée par un diapason (237) qui donne par seconde un nombre de vibrations connu, 500 par exemple. Une des branches du diapason étant, elle aussi, munie d'un style léger, on met celui-ci en contact avec le noir de fumée, puis on fait vibrer simultanément la lame et le diapason; les deux styles tracent alors deux hélices ondulées, mais inégalement. Or, en déroulant la feuille de papier (fig. 184), et en comparant les nombres d'oscillations qui se correspondent sur les deux courbes, il est facile d'en déduire combien la lame fait de vibrations par seconde. Par exemple, supposons qu'à 150 vibrations du diapason en correspondent 165 de la lame, chaque vibration du diapason étant, par hypothèse, de $\frac{1}{500}$ de seconde, 150 vibrations correspondent à $\frac{1 \times 0}{500}$ de seconde; c'est donc en $\frac{150}{500}$ de seconde que la lame a fait 165 vibrations. Par suite, en $\frac{1}{500}$ de seconde, elle en fait $\frac{165}{150}$, et en une seconde $\frac{165 \times 500}{150}$, ou 550.

* 224. **Phonautographe de L. Scott.** — L'appareil que nous venons de décrire ne peut inscrire les vibrations des tuyaux sonores, du chant, d'un bruit quelconque. M. L. Scott a généralisé la méthode graphique dans le *phonautographe*, qui inscrit tous les sons. Cet appareil se compose d'un ellipsoïde creux *AB* (fig. 185), de plâtre ou de métal, ayant environ 50 centimètres de long, sur 30 de diamètre. L'extrémité *A* est ouverte et reçoit les sons extérieurs; l'autre est fermée par un fond solide, au centre duquel est adapté un tuyau *a*, condensé et terminé par un anneau, sur lequel est fixée une membrane flexible de baudruche ou de caoutchouc très-mince. Un second anneau, qui se serre plus ou moins sur le premier à l'aide de vis, sert à tendre à volonté la membrane, qui, du reste, ne vibre bien à l'unisson qu'autant qu'elle n'est que peu tendue. On peut tourner le tuyau *a* sur lui-même, de manière à faire prendre toutes les inclinaisons à la membrane. Sur cette dernière, près du centre, est fixé, avec de la cire à cacheter, un style *o* extrêmement léger, participant à tous les mouvements de la membrane. Afin que ce style ne se trouve pas correspondre à un nœud de vibration, M. Scott adapte, sur l'anneau tenseur de la membrane, une pièce mobile *i*, qu'il en nomme le *subdiviseur*, et qui, en la touchant en tel ou tel point, à la volonté de l'expérimentateur, modifie la position des nœuds, de manière que le style corresponde à un ventre (244), et, par suite, vibre avec la membrane. Les vibrations de celle-ci s'inscrivent ensuite, identiquement comme dans l'appareil de Duhamel, sur un cylindre tournant, autour duquel s'enroule une feuille de papier recouverte de noir de fumée. Le cylindre avançant dans le sens de son axe, le style *o* trace fidèlement les vibrations que les ondes sonores, dans la caisse *AB*, transmettent à la membrane. Pour fixer les épreuves ainsi obtenues, M. Scott les trempe d'abord dans un bain d'alcool; puis, quand elles sont séchées, dans un second bain d'alcool tenant en dissolution une résine, de la sandaraque par exemple.

Au lieu de donner au phonautographe la forme d'un ellipsoïde, comme ci-dessus, on lui donne aujourd'hui celle d'un parabololoïde dont la membrane occupe le foyer, ce qui augmente la sensibilité de l'appareil.

Fig. 185.



* 225. **Méthode optique de Lissajous.** — Dès 1827, Wheatstone, en Angleterre, avait imaginé, sous le nom de *caléïdophone*, un petit appareil qui reproduit, en traits lumineux, les vibrations sonores. C'est une série de verges élastiques de métal, à section rectangulaire, solidement encastées d'un bout, et terminées de l'autre par une petite perle qu'on éclaire avec une lampe. En imprimant à une pareille verge des chocs qui la fassent vibrer à la fois suivant les deux dimensions de sa section, le point brillant de la perle décrit des courbes qui paraissent continues à cause de la persistance de la sensation lumineuse, et dont la forme varie avec le rapport des nombres de vibrations dans les deux sens.

M. Lissajous a perfectionné la méthode optique en prenant pour corps sonores des diapasons dont l'une des branches est armée d'un petit réflecteur et l'autre d'un contre-poids, et il en a fait une heureuse application à la composition de deux mouvements vibratoires parallèles, puis de deux mouvements rectangulaires. Il est parvenu ainsi à dessiner en traits de feu des courbes qui caractérisent les vibrations transversales ou tournantes, l'accord, l'octave, la tierce, la quarte, la quinte, les dissonances, les battements, les sons résultants.

* 226. **Composition optique de deux mouvements vibratoires parallèles.** — Pour composer deux mouvements parallèles, deux diapasons armés de miroirs sont disposés en regard l'un de l'autre (fig. 186), de manière qu'un faisceau lumineux émis d'une lampe et réfléchi sur le miroir *m* revienne sur le miroir *m'*, et de là sur une lentille qui projette l'image sur un écran.

Si l'on ne fait vibrer qu'un diapason, l'image s'allonge; si on les fait vibrer tous les deux, supposés parfaitement à l'unisson, l'allongement augmente ou

diminue, suivant qu'il y a concordance ou discordance entre les mouvements simultanés imprimés à l'image par les vibrations des miroirs.

Si les deux diapasons passent en même temps et dans le même sens par leur forme d'équilibre, l'image atteint son maximum de grandeur. S'ils y passent en

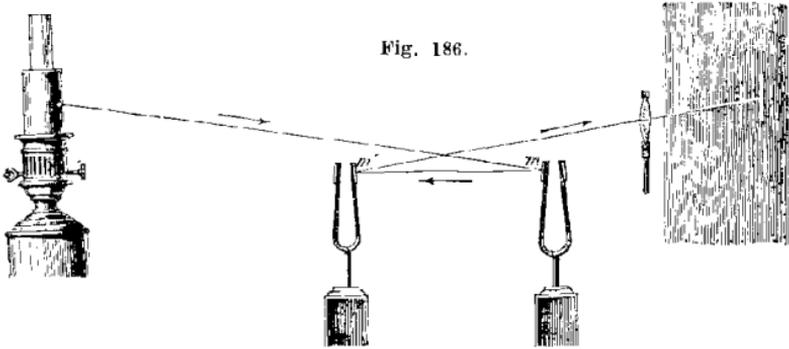


Fig. 186.

même temps, mais en sens contraires, il y a minimum. Entre ces deux limites, l'amplitude de l'image varie avec le temps qui s'écoule entre les moments précis où les deux diapasons passent par leur forme d'équilibre. Le rapport entre ce temps et la durée d'une vibration double a été désigné par M. Lissajous sous la dénomination de *différence de phase*.

Lorsque les diapasons sont rigoureusement d'accord, la trace lumineuse portée sur l'écran n'éprouve qu'un décroissement progressif de longueur, à mesure que l'amplitude des vibrations diminue; mais si l'accord est tant soit peu altéré, la grandeur de l'image varie périodiquement, et tandis que l'oreille entend les battements (231) qui résultent du défaut d'accord, l'œil voit nettement les pulsations concomitantes de l'image.

* 227. **Composition optique de deux mouvements vibratoires rectangulaires.** — La composition optique de deux mouvements vibratoires rectangu-

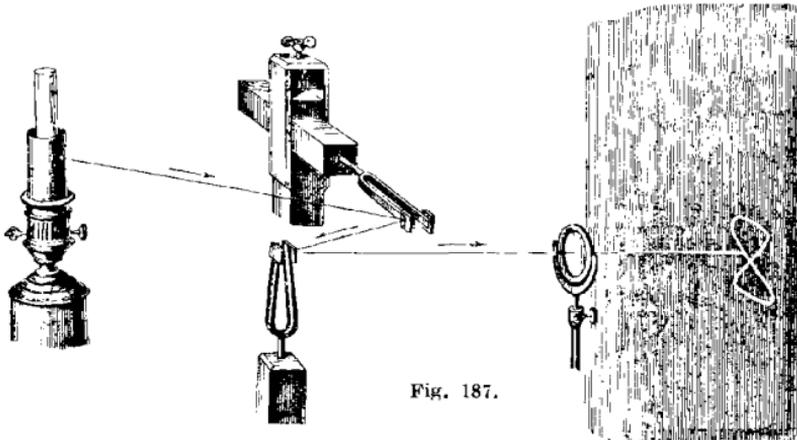
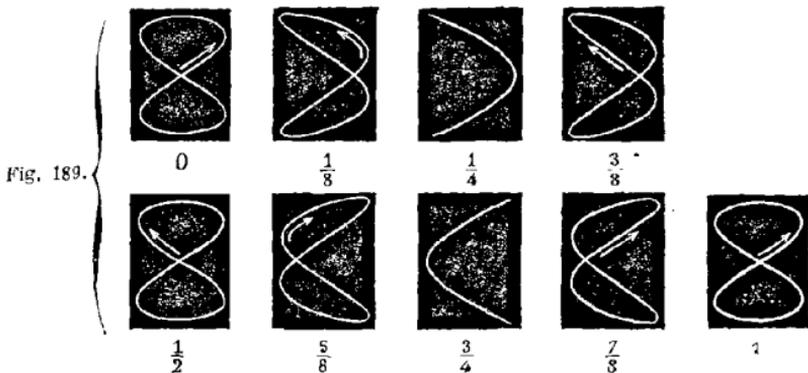
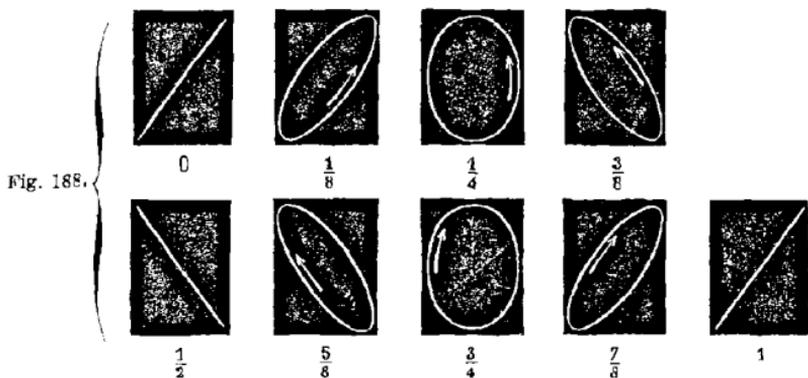


Fig. 187.

lares s'opère comme le montre la figure 187, c'est-à-dire à l'aide de deux diapasons, l'un horizontal, l'autre vertical, et armés tous les deux de miroirs

comme dans l'expérience précédente. Si l'on ne fait vibrer d'abord que le diapason horizontal, on voit se former sur l'écran une trace lumineuse horizontale; si c'est le second diapason qui vibre seul, l'image est verticale. Mais si l'on fait résonner à la fois les deux diapasons, les deux mouvements se combinent, et le faisceau réfléchi décrit sur l'écran une courbe plus ou moins compliquée,



dont la forme dépend du rapport entre les nombres de vibrations exécutés dans le même temps par les deux diapasons.

La figure 188 représente les différentes formes de la projection lumineuse sur l'écran quand les deux diapasons sont à l'unisson.

Les fractions placées au-dessous de chaque courbe indiquent les différences de phases correspondant à chacune d'elles. C'est la différence de phase qui détermine la forme initiale de la courbe; mais celle-ci conserve exactement la même forme lorsque les diapasons sont d'accord, à la condition, toutefois, que les amplitudes des deux vibrations rectangulaires décroissent dans le même rapport.

Si les diapasons ne sont pas tout à fait d'accord, la différence initiale de phase ne se maintient pas, et la courbe passe par toutes ses variétés; et elle semble se balancer sur elle-même avec d'autant plus de rapidité, que les diapasons sont plus loin de l'accord.

La figure 189 représente les différents aspects qu'offre l'image lumineuse quand les diapasons sont à l'octave, c'est-à-dire quand leur nombre de vibrations sont entre eux comme 1 est à 2.

* 228. **Flammes manométriques de Kœnig.** — La méthode de Kœnig consiste à transmettre le mouvement des ondes sonores qui constituent un son à des flammes de gaz qui, par leurs trépidations, font connaître la nature des sons. Pour cela, une capsule métallique représentée en coupe en A (fig. 190) est divisée en deux compartiments par une membrane mince de caoutchouc; sur la

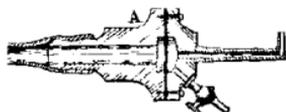


Fig. 190.

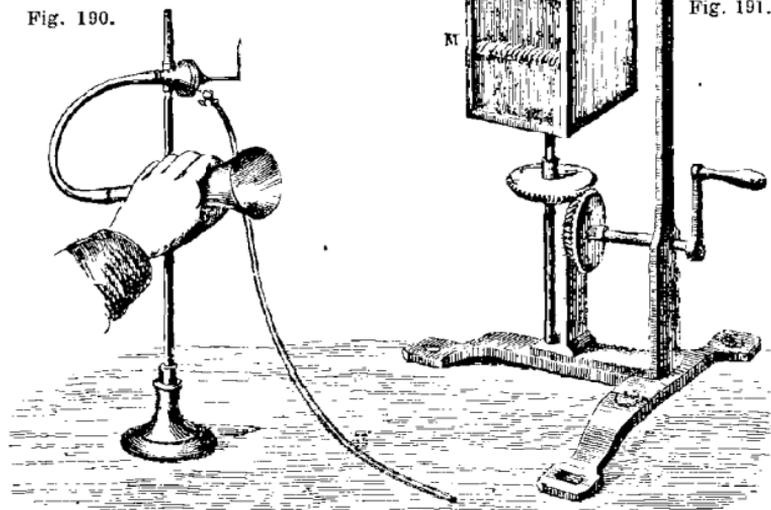


Fig. 191.

droite de la figure est un bec de gaz, et au-dessous un robinet sur lequel s'adapte un tuyau de caoutchouc qui amène le gaz d'éclairage; à gauche est une tubulure sur laquelle un second tuyau de caoutchouc. Celui-ci se rend au nœud d'un tuyau sonore, comme on le voit ci-après dans la figure 212: ou bien il se termine par une embouchure à l'ouverture de laquelle on chante telle ou telle note. C'est cette disposition qui est représentée ci-dessus.

Lorsque les ondes pénètrent, par l'embouchure et le tuyau, dans la capsule, la membrane de celle-ci cédant aux condensations et aux raréfactions des ondes, le gaz d'éclairage, dans le compartiment à droite, se trouve alternativement comprimé et dilaté, et de là résultent, dans la flamme du bec, des allongements et des raccourcissements peu apparents lorsqu'on regarde la flamme. Pour les rendre sensibles, pour les séparer, on reçoit l'image de celle-ci sur un miroir à quatre faces M (fig. 191), qu'on fait tourner à l'aide de deux roues d'angle et d'une manivelle. Alors, si la capsule est en communication avec un tuyau sonore rendant le son fondamental, l'image de la flamme prend la forme représentée dans la figure 192; et celle de la figure 193, si le tuyau rend le son à l'octave. Si les deux sons arrivent simultanément à la capsule, l'image prend

l'aspect de la figure 194; mais il faut alors que le tuyau qui se rend à la capsule

Fig. 192.

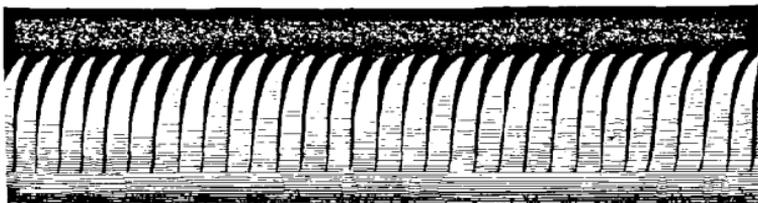


Fig. 193.

communiqué en même temps, au moyen d'un tube en T, avec deux tuyaux so-

Fig. 194.

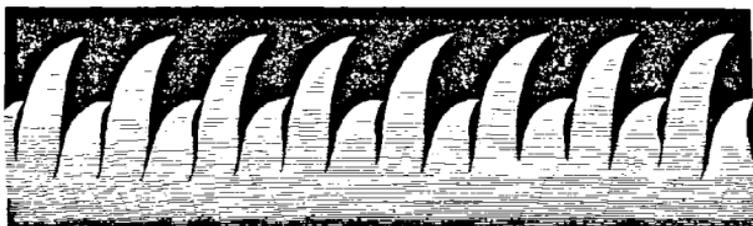


Fig. 195.

nores, rendant l'un le son fondamental, l'autre l'octave. Si l'un rend le son fondamental, et l'autre la tierce, la flamme offre la figure 196.

On verra plus loin l'application du même appareil à l'analyse des sons (264).

CHAPITRE III

THÉORIE PHYSIQUE DE LA MUSIQUE

229. **Qualités du son musical.** — Le *son musical* est le résultat de vibrations continues, rapides et isochrones, qui produisent sur l'organe de l'ouïe une sensation prolongée. On peut toujours le comparer à d'autres sons et en prendre l'unisson, ce qui ne peut se faire pour le bruit (202).

Un son étant déterminé par le nombre de vibrations qui lui correspond, on est convenu, pour comparer entre eux les sons, de les représenter par leur nombre de vibrations, non pas absolu, mais relatif. Par exemple, trois sons correspondant aux nombres de vibrations 72, 144, 288, on représente le premier par 1, le second par 2, et le troisième par 4.

L'oreille distingue dans le son musical trois qualités particulières : la *hauteur*, l'*intensité* et le *timbre*.

Hauteur. — La *hauteur* est l'impression qui résulte, pour l'organe de l'ouïe, du plus ou moins grand nombre de vibrations dans un temps donné. On nomme *sons graves* ceux qui sont produits par un petit nombre de vibrations, et *sons aigus* ceux qui sont le résultat d'un grand nombre de vibrations. Il n'y aurait donc de sons absolument graves ou aigus que ceux qui se trouveraient aux extrémités de l'échelle des sons perceptibles. Tous les sons intermédiaires ne sont graves ou aigus que d'une manière relative. Toutefois on dit un *son grave* ou un *son aigu*, comme on dit une *basse température* ou une *température élevée*, en comparant le son à ceux qu'on entend le plus ordinairement.

Le rapport de gravité ou d'acuité de deux sons se nomme *ton*, c'est-à-dire que ce mot exprime le degré de hauteur d'un son : au point de vue musical, il exprime le degré de hauteur de la gamme dans laquelle on joue.

Intensité. — On a vu (207) que l'*intensité*, ou la force du son, dépend de l'amplitude des oscillations et non de leur nombre. Un même son peut conserver le même degré de gravité ou d'acuité, et prendre une intensité plus ou moins grande, lorsqu'on fait varier l'amplitude des oscillations. C'est ce qui arrive pour une corde tendue, qu'on écarte plus ou moins de sa position d'équilibre.

Timbre. — Le *timbre* est ce qui fait que, deux instruments différents rendant chacun un son de même hauteur et de même intensité, ces deux sons peuvent être parfaitement distingués l'un de l'autre. Le son du hautbois, par exemple, est très-distinct

de celui de la flûte; le son du cor, de celui du basson. De même la voix humaine présente un timbre bien différent, suivant les individus, l'âge ou le sexe.

On a longtemps ignoré la cause du timbre; ce n'est qu'en 1863 que Helmholtz a fait voir que le timbre particulier qui caractérise un son est dû aux harmoniques (233) plus ou moins nombreux qui l'accompagnent. Nous reviendrons sur ce sujet en faisant connaître l'analyse et la synthèse des sons (263).

230. **Unisson.** — Deux sons produits par un même nombre de vibrations sont dits à *l'unisson*: ils sont alors de même hauteur, c'est-à-dire également graves ou aigus.

231. **Battements.** — Lorsque deux sons qui ne sont pas à l'unisson se produisent simultanément, on entend, à des intervalles égaux, un renforcement du son, qu'on nomme *battement*. Par exemple, que les nombres de vibrations, pour deux sons, soient 30 et 31; après 30 vibrations du premier, ou 31 du second, il y aura coïncidence, et, par suite, battement. Si les battements sont assez rapprochés pour produire un son continu, ce son sera évidemment plus grave que ceux dont il dérive, puisqu'il provient d'une seule vibration, quand les autres proviennent de 30 et 31.

232. **Accords, intervalles.** — On nomme *accord* la coexistence de plusieurs sons produisant sur l'oreille une sensation agréable. Si cet organe est péniblement affecté, on dit qu'il y a *dissonance*.

L'*intervalle* entre deux sons est le rapport $\frac{n'}{n}$ de leurs nombres de vibrations, n' étant toujours plus grand que n ; c'est-à-dire qu'on est convenu de prendre pour premier terme du rapport le son le plus aigu. Comme la fraction $\frac{n'}{n}$ ne change pas de valeur lorsqu'on multiplie ou divise ses deux termes par un même nombre, on voit que l'intervalle de deux sons ne dépend pas du nombre absolu de vibrations, mais du nombre relatif.

L'oreille n'est agréablement affectée qu'autant que les deux termes du rapport $\frac{n'}{n}$ sont de petits nombres, et l'on dit alors qu'il y a *consonnance*. Les intervalles les plus agréables à l'oreille sont :

$\frac{n'}{n} = \frac{1}{1}$, c'est l'unisson.	$\frac{n'}{n} = \frac{4}{3}$ la <i>quarte</i> .
$\frac{n'}{n} = \frac{2}{1}$ l'octave.	$\frac{n'}{n} = \frac{5}{4}$ la <i>tierce majeure</i> .
$\frac{n'}{n} = \frac{5}{3}$ la <i>sixte</i> .	$\frac{n'}{n} = \frac{6}{5}$ la <i>tierce mineure</i> .
$\frac{n'}{n} = \frac{3}{2}$ la <i>quinte</i> .	

Ces rapports se rencontrent fréquemment, et il importe de les retenir. Toutes les fois que les nombres de vibrations de deux sons sont entre eux comme 2 est à 1, ou comme 3 est à 2, ou comme 4 est à 3, on dit, du plus aigu, qu'il donne l'octave, la quinte ou la quarte de l'autre son; et réciproquement, si l'on dit de deux sons qu'ils forment une quarte, une tierce majeure..., cela signifie que leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 4 est à 3, ou comme 5 est à 4, et ainsi de suite.

233. **Harmoniques.** — On nomme *sons harmoniques*, ou simplement *harmoniques*, des sons dont les nombres de vibrations sont entre eux comme la suite naturelle des nombres entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6... La superposition de deux de ces sons donne un accord d'autant plus consonnant, qu'on les prend plus bas dans la série. En effet, le deuxième harmonique est l'octave du premier; le troisième, qui revient à $\frac{3}{2} \times 2$, en est la double quinte; le quatrième, qui peut s'écrire 2×2 , en est la double octave; le cinquième, qui équivaut à $\frac{5}{4} \times 4$, en est la quadruple tierce. De plus, les deux premiers harmoniques donnent l'octave; le second et le troisième, la quinte; le troisième et le quatrième, la quarte; le quatrième et le cinquième, la tierce. Les harmoniques ne donnent donc que des accords, d'où leur vient leur nom. Toutefois ceci n'est exact que pour les premiers sons de la série; car plus on s'élève, plus l'accord tend à se changer en dissonance.

234. **Échelle musicale, gamme.** — On nomme *échelle musicale* une série de sons séparés les uns des autres par des intervalles qui paraissent avoir leur origine dans la nature de notre organisation.

Dans cette série, les sons se reproduisant dans le même ordre, par périodes de sept, chaque période se désigne sous le nom de *gamme*, et les sept sons ou *notes* de chaque gamme, par les noms *ut, ré, mi, fa, sol, la, si*.

En comparant entre eux, soit à l'aide de la sirène (219), soit à l'aide de la roue de Savart ou de la méthode graphique (221 et 223), les nombres de vibrations des sept notes de la gamme, et en représentant le son le plus grave, l'*ut* fondamental, par 1, on trouve que les nombres relatifs de vibrations correspondant à ces notes sont représentés par les fractions ci-après :

[A]	{	Notes.	<i>ut</i>	<i>ré</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>
	}	Nombres relatifs de vibrations. . .	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

Là ne s'arrête pas l'échelle musicale : cette gamme est suivie d'une série de gammes semblables, dans lesquelles chaque note correspond à un nombre de vibrations double de celui de la note de même nom dans la gamme qui précède; c'est-à-dire que dans

chaque gamme les notes sont toutes des multiples, par les puissances croissantes de 2, des notes de même nom dans la gamme fondamentale.

235. **Valeurs des intervalles, dièses et bémols.** — Les fractions qui occupent la seconde ligne du tableau [A] ci-dessus ne représentent pas seulement les nombres de vibrations relatifs par rapport à l'*ut* fondamental, mais les intervalles successifs des six dernières notes par rapport à la première (232). Or, si l'on cherche les intervalles entre les notes consécutives, on trouve :

(Notes.)	<i>ut</i>	<i>ré</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>ut</i>
[B] Nombres relatifs de vibrations.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
Intervalles		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$.

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 grand, s'appelle *ton majeur*; le second, *ton mineur*, et le troisième, qui est le plus petit, se nomme *semi-ton majeur*. De là, toutes les fois que l'intervalle entre deux sons est $\frac{9}{8}$ ou $\frac{10}{9}$, on dit qu'il y a entre eux un *ton*; et si l'intervalle est $\frac{16}{15}$, qu'il y a un *demi-ton*. On peut donc dire que les intervalles successifs de la gamme *ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut*, comprennent deux tons, un demi-ton, trois tons et un demi-ton.

L'intervalle entre le ton majeur et le ton mineur est $\frac{90}{81}$. C'est le *plus petit intervalle* que l'on considère; il faut une oreille exercée pour l'apprécier. On le désigne sous le nom de *comma*.

Les intervalles de chaque note par rapport à l'*ut* fondamental se désignent sous les noms suivants :

L'intervalle de <i>ut</i> à	}	<i>ré</i> = $\frac{9}{8}$ s'appelle une <i>seconde</i> .
		<i>mi</i> = $\frac{5}{4}$ une <i>tierce</i> .
		<i>fa</i> = $\frac{4}{3}$ une <i>quarte</i> .
		<i>sol</i> = $\frac{3}{2}$ une <i>quinte</i> .
		<i>la</i> = $\frac{5}{3}$ une <i>sixte</i> .
		<i>si</i> = $\frac{15}{8}$ une <i>septième</i> .
		<i>ut</i> = 2 une <i>octave</i> .

On a déjà vu que plusieurs de ces intervalles donnent des accords consonnants (232); la *seconde* et la *septième*, exprimées par des rapports compliqués, donnent des dissonances.

La gamme dont les rapports de vibrations viennent d'être indiqués, est la *gamme diatonique*; la *gamme chromatique* est celle qui procède par demi-tons; elle se compose de 13 sons.

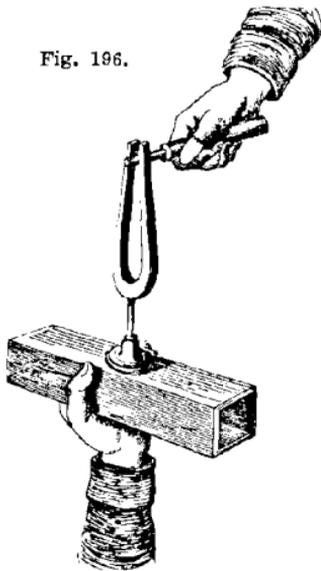
Les musiciens ont été conduits à intercaler entre les notes de la

gamme des notes intermédiaires qu'on désigne sous les noms de *dièses* et de *bémols*. *Diéser* une note, c'est augmenter le nombre de ses vibrations dans le rapport de 24 à 25; la *bémoliser*, c'est diminuer ce même nombre dans le rapport de 25 à 24.

236. **Accords parfaits.** — On donne le nom d'*accord parfait* à trois sons simultanés tels, que le premier et le second forment une tierce majeure, le second et le troisième une tierce mineure, le premier et le troisième une quinte; c'est-à-dire trois sons tels, que les nombres de vibrations qui leur correspondent soient entre eux comme 4, 5 et 6. Cette condition est remplie par les trois notes *ut*, *mi*, *sol*, dont les nombres de vibrations sont entre eux comme 1, $\frac{5}{4}$ et $\frac{3}{2}$, ou comme 4, 5 et 6. De tous les accords, c'est le plus agréable à l'oreille; c'est l'*accord parfait majeur*. Les trois sons 10, 12, 15, dont les intervalles $\frac{6}{5}$, $\frac{5}{4}$ et $\frac{3}{2}$ ne diffèrent des intervalles des précédents que par l'ordre des deux premiers, donnent l'*accord parfait mineur*.

237. **Diapason.** — Le *diapason* est un petit instrument à l'aide duquel on reproduit à volonté une note invariable, ce qui le rend propre à régler les instruments de musique.

Fig. 196.



Il consiste en une verge d'acier recourbée sur elle-même en forme de pincette (fig. 196). On le fait vibrer, soit en passant un archet sur ses bords, soit en écartant brusquement ses deux branches au moyen d'un cylindre de fer qu'on passe de force entre elles, comme le montre la figure. Les deux lames, ainsi écartées de leur position d'équilibre, y reviennent en vibrant, et produisent un son constant pour chaque diapason. On renforce le son de cet appareil en le fixant sur une caisse de bois blanc ouverte à l'une de ses extrémités.

Le nombre de vibrations du diapason variant avec la longueur et l'épaisseur de ses deux branches, on le règle à l'aide de la sirène, ou mieux par le procédé graphique de Duhamel. Le nombre des vibrations simples du diapason a d'abord été de 856 par seconde; mais comme, pour régler le son de leurs instruments, les musiciens ne faisaient point usage de cet appareil, il est arrivé que le ton allait toujours en s'élevant sur tous les grands théâtres

d'Europe, et qu'en outre il n'était pas le même à Paris, à Vienne, à Milan, etc. Les constructeurs portèrent alors le nombre des vibrations du diapason à 880; enfin, en 1859, une commission choisie à cet effet adopta un *diapason normal*, obligatoire pour tous les établissements musicaux de France. Ce diapason, dont un étalon est déposé au Conservatoire de musique de Paris, donne 870 vibrations simples par seconde. On va voir ci-après quelle est la note correspondante à ce nombre.

238. Notation des gammes, nombre absolu de vibrations. — Le nombre absolu de vibrations qui correspond à l'*ut* fondamental étant tout à fait arbitraire, on peut admettre un nombre indéterminé de gammes. Comme point de départ pour toutes les autres, on a choisi celle dont l'*ut* correspond au son le plus grave de la basse, et l'on est convenu, en physique, de distinguer les notes de cette gamme en leur donnant l'indice 1 ; tandis qu'on donne aux gammes plus élevées les indices $2, 3, \dots$, et aux gammes plus graves, les indices $-1, -2, \dots$, c'est-à-dire qu'on écrit $ut_1, ré_1, ut_{-1}, ré_{-1}, \dots$. Par exemple, fa_2 est à l'octave aiguë de fa_1 .

On n'a considéré jusqu'ici que les nombres de vibrations relatifs; mais de ceux-ci il est facile de déduire les nombres absolus. En effet, le nombre 870 de vibrations simples, ou 435 de vibrations doubles, adopté ci-dessus pour le diapason, représente la_3 . Par conséquent, les nombres de vibrations relatifs de *ut* et *la* étant 1 et $\frac{3}{2}$, si l'on représente par n le nombre de vibrations de ut_3 , on doit avoir $n \times \frac{3}{2} = 435$; d'où $n = 261$ vibrations doubles. Ut_3 une fois connu, on aura les autres notes $ré_3, mi_3, fa_3, \dots$, en multipliant 261 par $\frac{3}{8}$, par $\frac{5}{4}$, par $\frac{4}{3}, \dots$ (234, A). Quant à ut_2 , il égale $\frac{ut_3}{2} = 130\frac{1}{2}$, et $ut_1 = \frac{ut_2}{2} = 65\frac{1}{4}$.

La valeur de ut_1 était anciennement 64; son accroissement résulte du plus grand nombre de vibrations attribué au diapason.

239. Longueur des ondes. — Lorsqu'on connaît le nombre de vibrations que fait un corps sonore par seconde, il est facile d'en déduire la longueur des ondes (206). On sait, en effet, qu'à 10 degrés le son parcourt 337 mètres par seconde; par conséquent, si un corps ne faisait qu'une vibration double par seconde, la longueur d'onde serait de 337 mètres; s'il en faisait deux, la longueur d'onde serait la moitié de 337 mètres; s'il en faisait trois, le tiers; et ainsi de suite. C'est-à-dire que la longueur d'onde est le quotient de la vitesse du son divisée par le nombre de vibrations complètes; et cela, quelle que soit la hauteur du son, puisque la vitesse est la même pour les sons graves ou aigus (209).

Si donc on représente la vitesse du son par v , la longueur d'onde par λ , le nombre de vibrations par seconde par n , on aura $v = n\lambda$; formule d'où l'on tire $n = \frac{v}{\lambda}$: ce qui fait voir que le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur d'onde.

CHAPITRE IV

VIBRATIONS DES CORDES

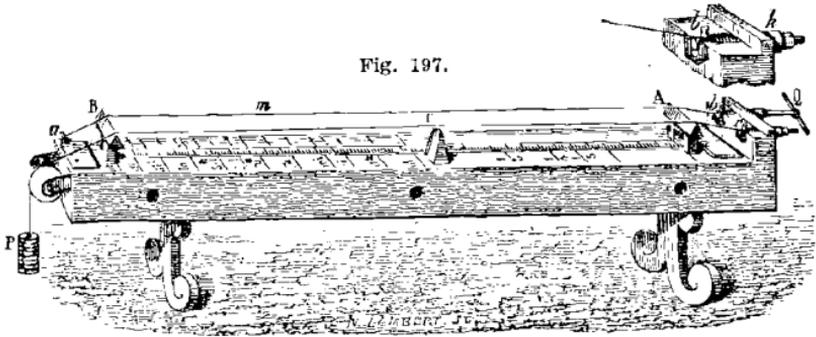
240. Vibrations transversales des cordes. — On nomme *cordes*, en acoustique, des corps filiformes, de métal ou de boyau, élastiques par tension.

On distingue, dans les cordes, deux sortes de vibrations, les unes *transversales*, ou dans une direction perpendiculaire aux cordes; les autres *longitudinales*, ou dans le sens de leur longueur. On excite les premières avec un archet, comme sur le violon, ou en pinçant les cordes, comme on le fait sur la harpe et la guitare. Quant aux vibrations longitudinales, on les fait naître en frottant les cordes, dans le sens de leur longueur, avec un morceau d'étoffe saupoudré de colophane.

241. Sonomètre. — Le *sonomètre* est un appareil qui sert à étudier les vibrations transversales des cordes. On l'appelle aussi *monocorde*, parce que souvent il ne porte qu'une seule corde. Cet appareil se compose d'une caisse de bois mince, destinée à renforcer le son; sur cette caisse sont deux chevalets fixes A et B (fig. 197), distants l'un de l'autre d'un mètre. D'un chevalet à l'autre est une échelle divisée en millimètres, et à gauche et à droite de cette échelle sont tracées sur la caisse deux séries de divisions, marquant, l'une la gamme vraie ou diatonique (235), l'autre la gamme *tempérée*, c'est-à-dire une gamme dans laquelle l'octave est partagée en douze intervalles rigoureusement égaux, qu'on nomme *demi-tons moyens*. Sur les chevalets passent deux cordes: l'une, m , s'enroule d'un bout sur un boulon de fer a , qui est fixe; et de l'autre bout sur un boulon b , qui est lié à une vis horizontale, qu'on recule plus ou moins en faisant tourner un écrou k , dans lequel passe la vis, de manière à tendre la corde à volonté. La deuxième corde, fixée de la même manière à son extrémité r , passe à son autre extrémité sur une poulie. Là elle est tendue par des poids P, de plomb, qu'on augmente jusqu'à ce que la corde ait pris la tension voulue. Enfin, un chevalet mobile C peut se déplacer sous la corde pour en faire varier la longueur.

La première corde m est à son fixe; c'est-à-dire qu'on la tend jusqu'à lui faire rendre un son donné, auquel on compare ensuite les sons rendus par l'autre corde, à mesure qu'on la tend ou qu'on

Fig. 197.



la raccourcit davantage. Ou bien les deux cordes passent chacune sur une poulie, et alors elles sont tendues par des poids égaux, ou dans un rapport donné.

242. **Lois des vibrations transversales des cordes.** — Le calcul et l'expérience font voir que les vibrations transversales des cordes sont soumises aux lois suivantes :

1° *La tension d'une corde étant constante, le nombre des vibrations, dans le même temps, est en raison inverse de la longueur.*

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations est en raison inverse du rayon de la corde.*

3° *Le nombre des vibrations d'une corde est directement proportionnel à la racine carrée du poids qui la tend.*

4° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations d'une corde est inversement proportionnel à la racine carrée de sa densité.*

En musique, ces lois trouvent leur application dans les instruments à cordes, dans lesquels on fait varier la longueur, le diamètre, la tension et la nature des cordes, de manière à leur faire rendre telle ou telle note.

Ces lois sont comprises dans la formule $n = \frac{1}{\tau l} \sqrt{\frac{P}{\pi d}}$, dans laquelle n représente le nombre de vibrations simples par seconde, l la longueur de la corde, c'est-à-dire la partie vibrante comprise entre les deux chevalets A et B (fig. 197), τ le rayon de la section de la corde, P le poids qui la tend, et enfin d la densité de la corde, c'est-à-dire la masse sous l'unité de volume (44); quant à π , c'est le rapport de la circonférence au diamètre, lequel, comme on sait, est constant et égal à 3,141592.....

Dans cette formule P est compté en kilogrammes, τ et l en décimètres.

Remarque sur la formule des vibrations des cordes. — On donne à la formule sur les vibrations transversales des cordes, tantôt la forme $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{P}{\pi d}}$ [1] ci-dessus, tantôt la forme $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$ [2]. Cette différence provient de ce que, dans la formule [2], d représente le poids spécifique de la corde, c'est-à-dire sa densité relative (45), tandis que dans la formule [1], la même lettre représente la densité absolue. En effet, Lagrange a donné la formule des vibrations transversales des cordes sous la forme $n = \sqrt{\frac{gP}{lp}}$ [3], dans laquelle n , P et l ayant la même signification que ci-dessus, g représente l'intensité de la pesanteur (62), et p le poids de la partie vibrante de la corde. Or, d'après la formule connue $P = VD$, on a $p = \pi r^2 d$, d étant le poids spécifique de la corde, et $\pi r^2 l$ son volume, puisqu'elle n'est autre chose qu'un cylindre de rayon r et de hauteur l ; portant cette valeur de p dans la formule de Lagrange, on trouve

$$n = \sqrt{\frac{gP}{\pi r^2 l d}} = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$$

Au contraire, si l'on représente par d la densité absolue de la corde, on aura, d'après la formule $P = VDg$ (45), $p = \pi r^2 l g d$, et portant encore cette valeur dans la formule de Lagrange, il vient $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{P}{\pi d}}$, c'est-à-dire la formule [1] ci-dessus.

Tant que l'on ne considérera que des nombres relatifs de vibrations, il sera plus simple de faire usage de la formule [1]; mais si l'on veut calculer le nombre absolu de vibrations que fait la corde par seconde, on devra avoir recours à la formule [2], en ayant soin de compter g en décimètres.

243. Vérification des lois des vibrations transversales des cordes.

— *Loi des longueurs.* — Pour vérifier cette loi, rappelons que les nombres relatifs de vibrations des notes de la gamme sont

ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Cela posé, si l'on fait vibrer la corde du sonomètre d'abord dans son entier, puis ensuite en lui donnant, à l'aide du chevalet mobile, les longueurs $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$, et $\frac{1}{2}$, inverses des nombres ci-dessus, on obtient successivement toutes les notes de la gamme, ce qui prouve la première loi (242).

Loi des rayons. — On vérifie cette loi en tendant également sur le sonomètre deux cordes de même substance, dont les diamètres soient, par exemple, 3 et 2. Or, en les faisant vibrer, la deuxième donne la quinte de la première; ce qui fait voir qu'elle fait 3 vibrations pendant que la première en fait 2 (232).

Loi des tensions. — Ayant placé sur le sonomètre deux cordes identiques, on les tend par des poids qui soient entre eux comme 4 et 9. Or la deuxième donne encore la quinte de la première: d'où l'on conclut que leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 2 est à 3, c'est-à-dire comme les racines carrées des

tensions. Si les deux poids étaient entre eux comme 16 et 25, on obtiendrait la tierce majeure, ou $\frac{5}{4}$.

Loi des densités. — On fixe sur le sonomètre deux cordes de même rayon, mais de densités différentes. Leur ayant donné la même tension, on promène sous la plus dense le chevalet mobile jusqu'à ce qu'elle soit à l'unisson avec l'autre corde : d, d' étant alors les densités des deux cordes, et l, l' les longueurs qui vibrent à

l'unisson, on trouve $\frac{l}{l'} = \frac{\sqrt{d}}{\sqrt{d'}}$. Or, comme, d'après la première loi,

on sait que $\frac{l}{l'} = \frac{n'}{n}$, on a $\frac{n'}{n} = \frac{\sqrt{d}}{\sqrt{d'}}$, égalité qui vérifie la loi.

244. **Nœuds et lignes nodales, sons harmoniques des cordes.** — Lorsqu'un corps vibre, non-seulement il vibre dans son ensemble,

Fig. 198.

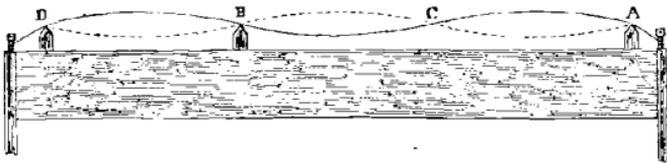


Fig. 199.

mais il se divise généralement en un certain nombre de parties aliquotes, dont chacune est animée de vibrations qui lui sont propres. Entre ces diverses parties, il existe des points et des lignes sensiblement fixes. Ce sont ces points et ces lignes qu'on désigne sous les noms de *nœuds* et de *lignes nodales*. Les parties vibrantes comprises entre deux nœuds ou deux lignes nodales se nomment *concamérations*. Le milieu d'une concamération, là où les vibrations atteignent leur maximum d'amplitude, est un *ventre*.

Les cordes vibrantes présentent des exemples curieux de nœuds et de ventres, quand on ne fait vibrer qu'une partie aliquote de leur longueur, c'est-à-dire un tiers, un quart, un cinquième. Pour cela, on fixe la corde à ses deux bouts, et l'on fait glisser dessous un petit chevalet, en l'arrêtant successivement au tiers, au quart, au cinquième de la corde. Le chevalet étant au tiers, comme le représente la figure 198, on fait vibrer la portion BD avec un ar-

chet; l'autre portion AB se subdivise alors en deux parties AC et CB, qui vibrent séparément, le point C demeurant sensiblement fixe. En effet, en plaçant de petits chevrons de papier, l'un en C, un autre entre B et C, un troisième entre C et A, celui qui est en C n'éprouve qu'un léger ébranlement, tandis que les deux autres sont projetés au loin. Il y a donc un nœud dans le premier point, et des ventres dans les deux autres. Si le chevalet B est au quart de la corde, il se produit, entre A et B, deux nœuds et trois ventres (fig. 199); s'il est au cinquième, il se forme, entre les mêmes points, trois nœuds et quatre ventres, et ainsi de suite.

Lorsqu'une corde un peu longue vibre dans son entier, une oreille exercée distingue, outre le son fondamental, les *harmoniques* 2, 3, 4, 5; c'est-à-dire l'octave aiguë du son fondamental, la quinte de l'octave, la double octave et la tierce majeure.

Le même phénomène se produit dans tous les corps vibrants. ainsi qu'on le verra bientôt dans les tuyaux sonores (250).

245. **Problèmes sur les vibrations transversales des cordes.** — I. Une corde métallique fait 500 vibrations par seconde, sous la tension de 25 kilogrammes; combien en ferait-elle sous une tension de 49 kilogrammes?

Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations étant directement proportionnels aux racines carrées des poids qui tendent la corde (8^e loi, 242). on a, en représentant par n le nombre de vibrations cherché,

$$\frac{n}{500} = \frac{\sqrt{49}}{\sqrt{25}}, \text{ d'où } n = \frac{500 \times 7}{5} = 700.$$

II. Une corde tendue par un poids de 15 kilogrammes rend un certain son; quelle devrait être la force de tension pour que la corde rendit la tierce majeure du son primitif? — On sait que la tierce majeure est représentée par $\frac{5}{4}$ quand le son primitif l'est par 1.

Les nombres de vibrations des deux sons étant entre eux comme 1 est à $\frac{5}{4}$, ou, ce qui est la même chose, comme 4 est à 5, si l'on représente par P le poids cherché, on a $\frac{4}{5} = \frac{\sqrt{15}}{\sqrt{P}}$, ou $\frac{16}{25} = \frac{15}{P}$; d'où $P = \frac{25 \times 15}{16} = 23^k,4375$.

III. Une corde de platine de 0^m11,8 de diamètre et une corde de fer de 1^m11,3 étant tendues par des poids égaux, quelles doivent être leurs longueurs relatives pour qu'elles rendent deux sons à l'unisson? — On sait que le poids spécifique du platine est 23, et celui du fer 7,78.

Représentons par R, L, D, le rayon, la longueur et la densité de la corde de platine, par r, l, d , les mêmes quantités pour la corde de fer, et par P le poids qui les tend.

Les nombres de vibrations étant égaux, on a, d'après la formule $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{P}{\pi d}}$,

$$\frac{1}{RL} \sqrt{\frac{P}{\pi D}} = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{P}{\pi d}},$$

ou, en supprimant les facteurs communs,

$$\frac{1}{RL} \cdot \frac{1}{\sqrt{D}} = \frac{1}{r'l} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}; \text{ d'où } \frac{L}{l} = \frac{r}{R} \sqrt{\frac{d}{D}}.$$

Si l'on prend $l=1$, il vient $L = \frac{r}{R} \sqrt{\frac{d}{D}} = \frac{6,5}{4} \sqrt{\frac{7,78}{23}} = 0,944$.

Les deux longueurs relatives sont donc 1 et 0,944.

IV. Calculer, à l'aide du sonomètre, le nombre de vibrations correspondant à un son donné.

Supposant que la corde du sonomètre rende un son moindre que la_3 du diapason (237), on la raccourcit au moyen du chevalet mobile, jusqu'à ce qu'elle rende cette note, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'elle fasse 870 vibrations simples par seconde. On mesure la longueur l de la partie vibrante; puis, avançant ou reculant le chevalet, on cherche la longueur que doit avoir la corde pour être à l'unisson du son donné: l' étant cette longueur, et n le nombre de vibrations correspondant, on a, d'après la loi des longueurs,

$$\frac{n}{870} = \frac{l}{l'}, \text{ d'où } n = \frac{870l}{l'}.$$

* 246. **Vibrations longitudinales des cordes.** — On a déjà vu que pour déterminer dans une corde tendue des vibrations longitudinales, on la frotte dans le sens de sa longueur avec un morceau de drap saupoudré de colophane (240).

On trouve par le calcul que les lois des vibrations longitudinales des cordes sont données par la formule $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{gQ}{\pi d}}$, n , r , l , g et d ayant la même signification que dans la formule des vibrations transversales, et Q étant le coefficient d'élasticité de la corde. On nomme ainsi le poids qui serait nécessaire pour donner à la corde une tension telle, qu'elle s'allongeât d'une quantité égale à elle-même; allongement qui ne peut jamais se réaliser, la rupture ayant lieu bien auparavant.

De la formule ci-dessus on déduit quatre lois identiques avec celles déjà données pour les vibrations transversales.

CHAPITRE V

VIBRATION DE L'AIR DANS LES TUYAUX SONORES

247. **Tuyaux sonores.** — On nomme *tuyaux sonores* des tubes dans lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne d'air qui y est contenue. Dans les divers appareils décrits jusqu'ici, le son résulte des vibrations de corps solides; l'air n'en est que le véhicule. Dans les instruments à vent, lorsque les tuyaux ont leurs parois suffisamment résistantes, c'est la colonne d'air qui est dans les tuyaux qui seule est le corps sonore. On constate, en effet, que la matière des tuyaux est sans influence sur le son; il est le même, à dimensions égales, que les tuyaux soient de bois, de cristal ou de métal. Le timbre seul est modifié.

Si l'on ne faisait que souffler dans les tuyaux, il n'y aurait pas de son, mais seulement un mouvement progressif continu de l'air. Pour qu'un son se produise, il faut, par un moyen quelconque,

exciter dans l'air une succession rapide de condensations et de raréfactions qui se propagent à toute la colonne d'air. De là, la nécessité de donner à l'*embouchure*, c'est-à-dire l'extrémité du tuyau par laquelle arrive l'air, une forme convenable pour que celui-ci ne puisse entrer que par intermittences, et non d'une manière continue. D'après la disposition adoptée pour mettre ainsi l'air en vibration, les tuyaux sonores se divisent en *tuyaux à bouche* et en *tuyaux à anche*.

248. **Tuyaux à bouche.** — Dans les tuyaux à bouche, toutes les

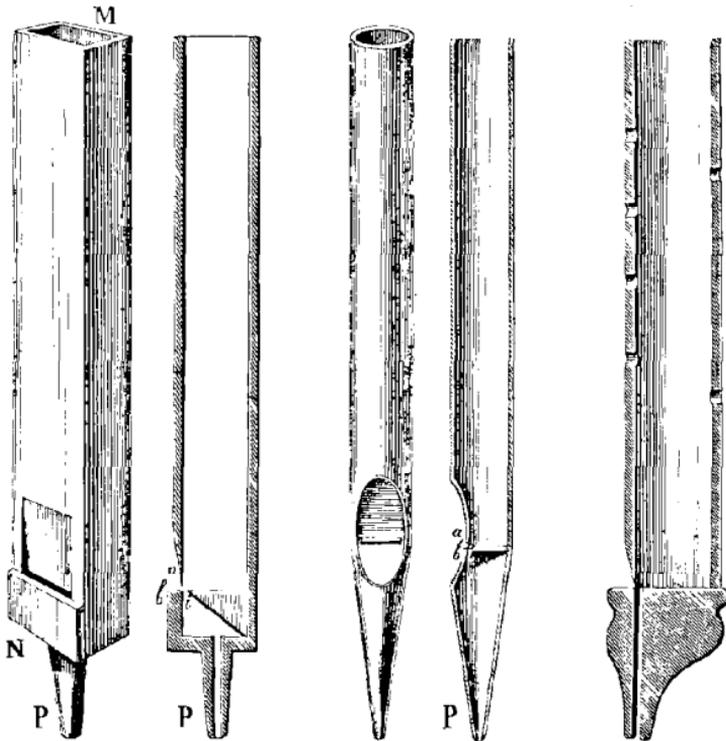


Fig. 200.

Fig. 201.

Fig. 202.

Fig. 203.

Fig. 204.

parties de l'embouchure sont fixes. Ces tuyaux sont de bois ou de métal, prismatiques ou cylindriques, et toujours d'une grande longueur par rapport à leur section. La figure 200 représente un tuyau à bouche, et la figure 201 en montre une coupe longitudinale. Dans ce tuyau, la partie inférieure P, par laquelle arrive l'air, est le *piéd*; celui-ci sert à fixer le tuyau sur une soufflerie (fig. 180). A sa sortie du piéd, l'air passe dans une fente étroite *i*,

qu'on appelle la *lumière*. En regard de celle-ci est pratiquée, dans la paroi opposée, une ouverture transversale qui est la *bouche*; son bord *a*, taillé en biseau, est la *lèvre supérieure*, et le bord *b*, la *lèvre inférieure*.

Le courant d'air qui passe par la lumière se brise contre la lèvre supérieure, s'y comprime, et, par un effet d'élasticité, réagit sur le courant qui continue d'arriver et l'arrête; mais cet arrêt n'a lieu que pendant un temps très-court, parce que, l'air s'échappant par la bouche, le courant qui vient du pied reprend aussitôt, et ainsi de suite tout le temps qu'on fait arriver l'air. De là des pulsations qui se transmettent à l'air dans le tuyau, et y font naître une suite de demi-ondes sonores alternativement condensées et raréfiées (206). Ces ondes sont d'autant plus rapides, que la vitesse du courant est plus grande, et que la lèvre supérieure est plus rapprochée de la lumière. Pour que le son soit pur, il y a un certain rapport à établir entre les dimensions des lèvres, l'ouverture de la bouche et la grandeur de la lumière. Enfin, le tuyau doit avoir une grande longueur par rapport à sa section.

Dans la flûte traversière, l'embouchure consiste en une simple ouverture latérale circulaire. C'est par la disposition qu'on donne aux lèvres que le courant d'air vient se briser contre les bords de cette ouverture. Il en est de même dans la flûte de Pan et pour une clef forcée avec laquelle on siffle.

La figure 202 représente l'embouchure d'un tuyau cylindrique fort en usage dans les jeux d'orgue, et la figure 203 en montre une coupe longitudinale. Les mêmes lettres indiquent les mêmes pièces que dans la figure 201. La figure 204 représente l'embouchure du sifflet et du flageolet, laquelle a beaucoup de rapport avec les précédentes.

249. **Tuyaux à anche.** — Dans ces tuyaux, la colonne d'air est ébranlée à l'aide de lames élastiques qu'on nomme *anches*, et qui se divisent en *anche battante* et en *anche libre*.

Anche battante. — Cette anche se compose d'une pièce de bois ou de métal *a* (fig. 206), qu'on nomme la *rigole*, et qui est creusée en forme de cuiller dans le sens de sa longueur. Elle est fixée à une espèce de bouchon *K*, percé d'un trou qui fait communiquer la cavité de la rigole avec un long tuyau *T*. La rigole est recouverte d'une lame mince de laiton *l*, qu'on nomme la *languette*. Celle-ci, dans sa position ordinaire, est légèrement écartée des bords de la rigole; mais, étant très-flexible, elle peut s'en rapprocher facilement et la fermer. Enfin, un fil de fer *br*, qu'on désigne sous le nom de *rasette*, s'applique par sa partie inférieure, qui est recourbée, sur la languette, et règle son écartement de la rigole. En enfonçant plus ou moins la rasette, on raccourcit

ou l'on allonge la partie vibrante de la languette, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer le nombre de ses vibrations.

L'anche est adaptée au haut d'un tuyau rectangulaire KN, qui

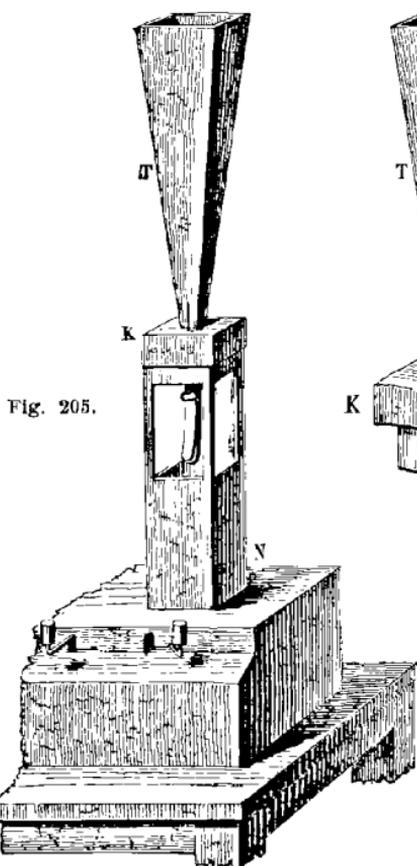


Fig. 205.

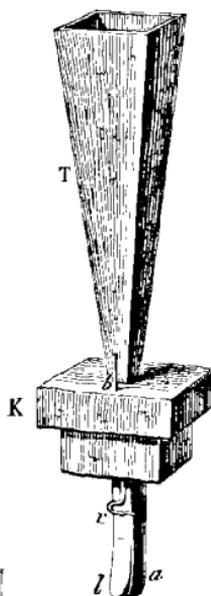


Fig. 206.

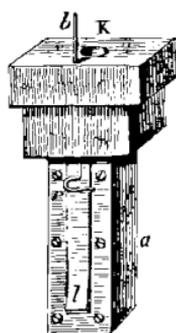


Fig. 207.

est le *porte-vent* (fig. 205). Ce tuyau est fixé sur le sommet d'une soufflerie. Dans les cours de physique, pour laisser voir les vibrations de la languette, les parois du porte-vent, dans la partie qui correspond à l'anche, sont de verre; c'est cette disposition qui est représentée dans la figure.

Lorsqu'on fait arriver l'air dans le porte-vent, il passe d'abord entre la languette et la rigole pour s'échapper par le tuyau T; puis, la vitesse du courant s'accéléralant, la languette vient frapper les bords de la rigole, et, la fermant, le courant ne passe plus. Or, en vertu de son élasticité, la languette revient sur elle-même, puis est entraînée de nouveau aussitôt que le courant passe, 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 résulte un son d'autant plus élevé, que le courant d'air est plus rapide.

Anche libre. — Grenié, en 1810, a inventé une espèce d'anche qu'on nomme *anche libre*, parce que la languette, au lieu de battre sur les bords de la rigole, entre dans la rigole en rasant ses bords de manière à osciller en dedans et en dehors. La rigole consiste ici en une petite caisse de bois *a* (fig. 207), dont la paroi antérieure est une plaque de laiton. Au milieu de celle-ci est une ouverture longitudinale dans l'intérieur de laquelle est la languette *l*, qui peut s'infléchir librement en avant et en arrière pour livrer passage au courant d'air, qu'elle arrête chaque fois qu'elle rase les bords de la fente. Une rasette *r* sert encore à régler la longueur de la partie vibrante de la languette. L'anche étant placée dans le tuyau KN (fig. 205), lorsqu'un courant d'air arrive dans celui-ci, la languette se trouve comprimée, se courbe de dehors en dedans, et livre passage à l'air qui s'échappe par le tuyau T. Mais la languette, revenant sur elle-même en vertu de son élasticité, forme une suite d'oscillations qui font que la rigole est successivement ouverte et fermée, et que le courant d'air passe et s'arrête par intermittences comme avec les anches battantes.

250. **Sons harmoniques rendus par un même tuyau.** — Daniel Bernoulli, célèbre géomètre de Groningue, mort en 1782, a le premier reconnu qu'un même tuyau peut successivement rendre des sons de plus en plus élevés lorsqu'on force le courant d'air qui le fait parler. Pour cela, on fait usage d'un long tube de verre fixé à l'une des embouchures décrites ci-dessus (248), mais munie d'un robinet qui sert à régler le courant d'air (fig. 210). Ce tuyau étant fixé sur une soufflerie, en ménageant le vent, on lui fait d'abord rendre le son fondamental, c'est-à-dire le son le plus grave. Puis, forçant le vent en ouvrant davantage le robinet et en appuyant avec la main sur la tige T de la soufflerie (fig. 180), on obtient des sons de plus en plus élevés dans l'ordre suivant :

1° Si le tuyau est ouvert à son extrémité opposée à l'embouchure, et si l'on représente par 1 le son fondamental, les sons qui viennent après lui sont successivement 2, 3, 4, 5, 6, 7, ... c'est-à-dire tous les harmoniques du son fondamental.

2° Si le tuyau est fermé à l'extrémité opposée à l'embouchure, il ne rend que les sons 1, 3, 5, 7, 9, ... c'est-à-dire seulement les harmoniques de rang impair.

Dans les deux cas, quelque tentative que l'on fasse, on ne peut tirer d'un même tuyau toutes les notes de l'échelle musicale, mais seulement les harmoniques du son fondamental.

251. **Nœuds et ventres de vibration dans les tuyaux sonores.** —

Les rapports des sons successifs rendus par un même tuyau sonore indiquent que la colonne d'air contenue dans le tuyau se subdivise en parties aliquotes de plus en plus courtes, vibrant à l'unisson. En effet, la théorie et l'expérience font voir qu'il existe dans la

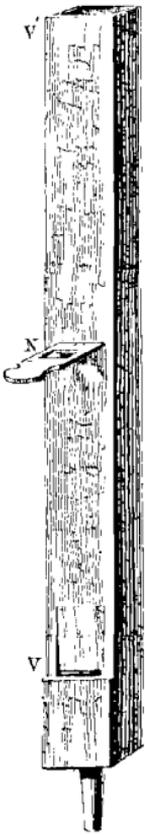


Fig. 208.



Fig. 209.

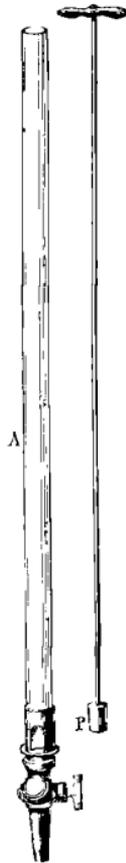


Fig. 210.



Fig. 211.

colonne d'air, de distance en distance, des tranches fixes qui sont des *nœuds*; et qu'entre deux nœuds consécutifs il se rencontre toujours une section où l'air atteint un maximum de vibration : c'est un *ventre*. Le caractère des nœuds, c'est que l'air n'y vibre pas, mais subit des variations continuelles de densité et de pression; tandis que le caractère des ventres, c'est que l'air y vibre constamment sans changer de densité ni de pression.

252. **Expériences qui montrent les nœuds et les ventres.** — Plu-

sieurs expériences servent à constater l'existence des nœuds et des ventres de vibration dans les tuyaux sonores.

1^o On colle une membrane de baudruche sur un anneau de carton supporté par trois fils comme un plateau de balance; puis, ayant répandu du sable sur la baudruche, on descend le tout lentement dans un tuyau pendant qu'il parle (fig. 211). Or, de distance en distance, on observe que les grains de sable ne reçoivent aucun mouvement de la baudruche et restent immobiles : c'est là que sont les nœuds; tandis que, dans les positions intermédiaires, les grains de sable sont projetés plus ou moins vivement par les vibrations que la membrane reçoit de l'air.

2^o On constate encore l'existence des nœuds et des ventres, en percant, dans les parois d'un tuyau sonore, des trous qu'on peut ouvrir ou fermer à volonté à l'aide d'obturateurs mobiles sur des tournillons (fig. 209). La densité de l'air, comme on l'a dit ci-dessus, étant constante et la même qu'à l'extérieur dans les parties correspondantes aux ventres, lorsqu'on ouvre un trou en regard de ceux-ci, le son n'éprouve aucune modification. Au contraire, en regard des nœuds, où la densité de l'air est variable, dès qu'un trou est ouvert, le son est complètement changé; ce qui résulte de ce que la tranche d'air intérieure, se trouvant à la pression atmosphérique, prend une densité constante, et que, par suite, là où était un nœud, se forme un ventre.

3^o Si l'on enfonce lentement dans le tuyau A (fig. 210) un piston P fixé à une longue tige, le son monte d'abord; mais, à mesure que le piston descend, on rencontre une ou plusieurs positions où le tuyau rend exactement le même son qu'avant l'introduction du piston. Or, la couche d'air en contact avec celui-ci étant alors nécessairement immobile, il fallait qu'elle le fût avant, puisqu'on entend le même son. Donc toutes les positions du piston où se reproduit le son primitif sont des nœuds. Si l'on arrête le piston entre deux nœuds, le son est changé, ce qui prouve que la tranche d'air maintenant immobile ne l'était pas d'abord.

4^o Enfin, nous citerons encore l'expérience suivante, faite au



moyen des flammes manométriques de Kœnig (228). Sur une des parois d'un tuyau rectangulaire est une chambre P, dans laquelle arrive du gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc S (fig. 212). De cette chambre partent trois tubes de caoutchouc a, a, a , qui conduisent le gaz à autant de capsules fixées dans la paroi antérieure du tuyau, et sur chacune desquelles est appliqué un bec de gaz. Les trois becs étant allumés, si l'on fait rendre d'abord au tuyau le son fondamental, les deux becs A et C brûlent avec calme, tandis que le bec B s'éteint. Or on va voir ci-après (fig. 216) qu'en B il y a un nœud, c'est-à-dire une tranche subissant constamment des variations de pression et de densité; ce sont ces variations qui, faisant vibrer la membrane de la capsule B (228), sont cause que le bec s'éteint.

Si l'on recommence l'expérience en soufflant tout d'un coup avec force pour obtenir le son 2, ce n'est plus le bec B qui s'éteint, mais les deux becs A et C; c'est-à-dire qu'en B est un ventre, et en A et C des nœuds, comme le montre la figure 217 ci-après.

Dans toutes ces expériences, on constate que, dans un même tuyau, ouvert ou fermé, quel que soit le nombre des nœuds, ils sont toujours également distants entre eux, et que le milieu entre deux nœuds est toujours un ventre.

253. Disposition des nœuds et des ventres. — 1^o Tuyaux fermés.

— Dans ces tuyaux, auxquels les organistes donnent le nom de *bourdons*, le fond opposé à l'embouchure est toujours un nœud, puisque la couche d'air en contact avec lui est nécessairement immobile et ne subit que des variations de densité. A la bouche, au contraire, où l'air conserve une densité constante, celle de l'atmosphère, et où le mouvement vibratoire est maximum, se trouve toujours un ventre. Dans tout tuyau fermé, il y a donc au moins un nœud et un ventre (fig. 213); c'est alors que le tuyau rend le son fondamental, et la distance VN du ventre au nœud égale une demi-onde condensée ou raréfiée, ou, ce qui est la même chose, égale le quart de la longueur totale de l'onde complète (206).

A partir de là, si l'on force le vent, la bouche restant toujours un ventre et le fond un nœud, la colonne d'air se subdivise en trois parties égales (fig. 214), et il se produit un nœud et un ventre intermédiaires. Or la distance VN entre un nœud et un ventre consécutifs étant toujours le quart de la longueur d'onde, celle-ci est devenue trois fois plus petite, et par suite le nombre des vibrations trois fois plus grand, puisque le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur d'onde (239). Donc, si l'on représente par 1 le son fondamental, on a actuellement le son 3. Pour le son qui vient après, il y a deux nœuds et deux ventres entre le fond

et la bouche (fig. 215), et la distance VN étant cinq fois moindre, on a le son 5, et ainsi de suite; ce qui montre comment les tuyaux fermés rendent successivement les sons 1, 3, 5, 7, ... (250).

2° *Tuyaux ouverts aux deux bouts.* — Dans ces tuyaux, les tranches d'air à la bouche et à l'extrémité opposée conservant nécessairement une densité constante, celle de l'atmosphère, il y a

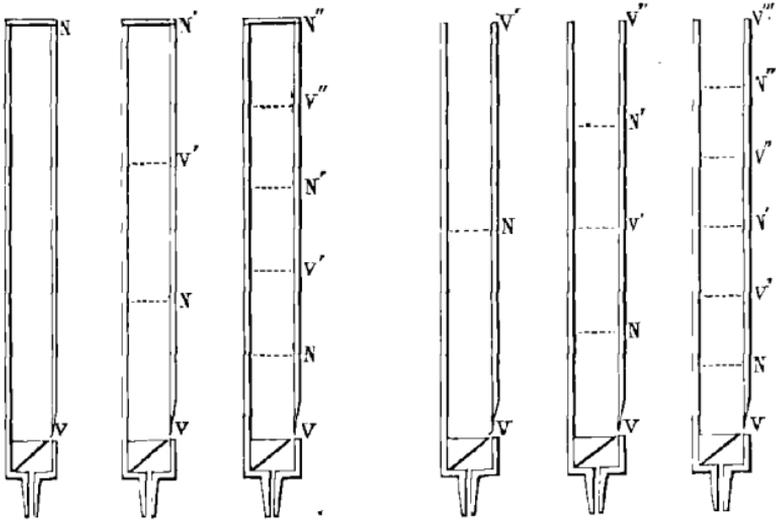


Fig. 213. Fig. 214. Fig. 215. Fig. 216. Fig. 217. Fig. 218.

toujours un ventre à chaque extrémité et au moins un nœud entre les deux (fig. 216). On a alors le son fondamental, et la longueur d'onde complète, qui est toujours quatre fois la distance d'un nœud à un ventre, est double de la longueur du tuyau.

Si l'on force le vent, il se produit deux nœuds et un ventre intermédiaires (fig. 217), et la longueur d'onde étant deux fois moindre, on a le son 2. Puis la colonne d'air se subdivisant en trois nœuds et deux ventres intermédiaires (fig. 218), la longueur d'onde est trois fois moindre, d'où résulte le son 3, et ainsi de suite. D'où l'on voit comment les tuyaux ouverts rendent successivement tous les sons 1, 2, 3, 4, 5...

254. **Origine des nœuds et des ventres dans les tuyaux.** — Dans les tuyaux fermés, les nœuds et les ventres de vibration ont pour cause la réflexion des ondes sonores sur le fond. Les ondes réfléchies croisent alors les ondes directes sans les altérer; mais ou les ondes qui se rencontrent sont de même sens, et alors elles se superposent pour donner un maximum de vibration, c'est-à-dire

un ventre; ou elles sont de sens contraires; et c'est alors que, se faisant équilibre, elles donnent naissance à un nœud.

Dans les tuyaux ouverts, c'est contre la masse d'air indéfinie située à l'extérieur que les ondes sonores se réfléchissent.

Quant aux variations de densité et de pression qui se produisent aux nœuds, elles résultent des condensations et des raréfactions successives des ondes, en vertu desquelles les tranches d'air s'approchent et s'éloignent alternativement des nœuds. Si les ondes marchent les unes vers les autres, comme le montrent les flèches

Fig. 219.

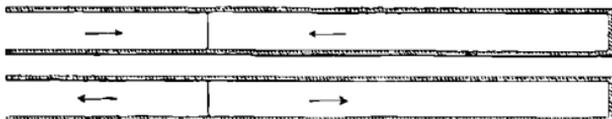


Fig. 220.

dans la figure 219, il y a condensation; au contraire, lorsque les ondes s'éloignent (fig. 220), il y a dilatation; mais, dans les deux cas, les vitesses étant égales et de signes contraires, la tranche de séparation, ou le nœud, est toujours immobile.

255. Formules des tuyaux sonores. — De ce qui précède, il découle que la colonne d'air, dans les tuyaux fermés, est toujours partagée par des nœuds et des ventres de vibration en un nombre impair de parties égales entre elles et égales au quart de la longueur d'onde complète (fig. 213, 214 et 215), et dans les tuyaux ouverts, en un nombre pair (fig. 216, 217 et 218). Si donc on représente la longueur du tuyau par L , par l la longueur de l'onde complète, et par p un nombre entier quelconque, en sorte que $2p$ soit un nombre pair, et $2p + 1$ un nombre impair, on a pour les tuyaux fermés, $L = (2p + 1) \frac{l}{4}$ [1]; et pour les tuyaux ouverts $L = 2p \times \frac{l}{4}$, ou $L = p \times \frac{l}{2}$ [2].

En remplaçant dans les formules [1] et [2] l par sa valeur $\frac{v}{n}$ tirée de l'équation $v = ln$ (239), v étant la vitesse du son dans l'air, et n le nombre de vibrations par seconde, il vient

$$L = (2p + 1) \frac{v}{4n}, \text{ et } L = p \frac{v}{2n}.$$

D'où l'on tire, pour les tuyaux fermés, $n = \frac{(2p + 1)v}{4L}$ [3], et pour les tuyaux ouverts $n = \frac{pv}{2L}$ [4].

Or si, dans la formule [3], on donne à p successivement les valeurs 0, 1, 2, 3,, on obtient $n = \frac{v}{4L}$, $3 \cdot \frac{v}{4L}$, $5 \cdot \frac{v}{4L}$, $7 \cdot \frac{v}{4L}$,, c'est-à-dire que les tuyaux fermés rendent le son fondamental $\frac{v}{4L}$, et tous ses harmoniques de rang impair; ce qui est conforme à l'expérience (260).

Si, dans la formule [4], on donne à p les valeurs 1, 2, 3, 4, 5....., il vient $n = \frac{v}{2L}, 2 \frac{v}{2L}, 3 \frac{v}{2L}, 4 \frac{v}{2L}, 5 \frac{v}{2L}$; c'est-à-dire que les tuyaux ouverts rendent le son fondamental $\frac{v}{2L}$, et tous ses harmoniques, pairs et impairs

256. Loi des longueurs. — Les formules [3] et [4] ci-dessus montrent que, dans les tuyaux ouverts, aussi bien que dans les tuyaux fermés, le nombre de vibrations est en raison inverse de la longueur des tuyaux. Cette loi, qui est connue sous le nom de lois des longueurs, se vérifie expérimentalement en faisant vibrer deux tuyaux de même espèce, l'un double de l'autre; on trouve que le plus court donne l'octave aiguë du plus long.

Enfin, si l'on compare le son fondamental d'un tuyau fermé à celui d'un tuyau ouvert de même longueur, les formules [3] et [4] ci-dessus font voir que le nombre des vibrations du tuyau ouvert est double, et par suite que le son fondamental d'un tuyau ouvert est à l'octave aiguë de celui du tuyau fermé de même longueur; ce qu'on peut encore exprimer, d'après la loi des longueurs, en disant que le son fondamental rendu par un tuyau fermé est le même que celui rendu par un tuyau ouvert de longueur double. On vérifie cette dernière loi au moyen d'un tuyau ouvert aux deux bouts, muni en son milieu d'un diaphragme à coulisse, percé d'une ouverture carrée égale à la section du tuyau (fig. 208). Quand le diaphragme est enfoncé, le tuyau est ouvert dans toute sa longueur; mais il est fermé en son milieu, lorsque le diaphragme est dans la position représentée par le dessin. Dans ce cas, on a le son fondamental d'un tuyau fermé de longueur VN . Puis, lorsque le diaphragme est rentré, on a le son fondamental d'un tuyau ouvert de longueur double VV' . Or, dans les deux cas, le son est le même.

257. Lois de Bernoulli. — En résumant ce qui précède sur les tuyaux sonores, on conclut les lois suivantes, connues sous le nom de lois de Bernoulli qui, le premier, les a posées.

Lois des tuyaux fermés. — 1° Un tuyau fermé d'un bout et muni d'une embouchure à bouche ou à anche à l'autre bout, étant fixé sur la table d'une soufflerie, rend des sons de plus en plus élevés à mesure qu'on force le vent; et si l'on représente par 1 le son le plus grave, ou le son fondamental, on trouve que le tuyau rend successivement les sons 1, 3, 5, 7, 9.... représentés par la série des nombres impairs.

2° Pour les tuyaux inégaux, les sons de même ordre correspondent à des nombres de vibrations qui sont en raison inverse des longueurs des tuyaux.

3° Les vibrations de l'air, dans les tuyaux, sont longitudinales, et la colonne d'air vibrante est partagée en parties égales par des nœuds et des ventres, le fond des tuyaux étant toujours un nœud et l'embouchure un ventre.

4° Les nœuds, ou les surfaces de séparation des parties vibrantes, sont immobiles et n'éprouvent que des changements de densité, tandis que les ventres, ou les milieux des parties vibrantes, conservent la même densité, mais vibrent constamment.

5° Dans le cas d'un seul nœud, le tuyau rend le son fondamental, et la longueur de l'onde complète égale quatre fois celle du tuyau.

Lois des tuyaux ouverts. — Les lois des tuyaux ouverts aux deux bouts ne diffèrent des lois précédentes qu'en ce que les sons rendus par un même tuyau sont successivement représentés par la suite naturelle des nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6.... et qu'en ce que les extrémités des tuyaux sont toujours des ventres.

De plus, le son fondamental d'un tuyau ouvert par les deux bouts est toujours l'octave aiguë du même son dans un tuyau de même longueur ouvert par un seul. Enfin, la longueur d'onde égale deux fois celle du tuyau.

258. Les lois de Bernoulli ne sont qu'approchées. — Les lois de Bernoulli

ne se vérifient pas rigoureusement par l'expérience. Que les tuyaux soient à bouche ou à anche, on obtient des sons plus graves que ne l'indique la théorie. De plus la distance du premier nœud à l'embouchure est toujours moindre que la distance théorique; au contraire, dans les tuyaux fermés, la distance du fond au premier ventre est plus grande que celle donnée par les lois de Bernoulli.

259. **Problèmes sur les tuyaux sonores.** — I. Un tuyau ouvert donnant pour troisième harmonique $ré_3$, quelle est la longueur de ce tuyau en mètres, la température de l'air étant de 10 degrés?

On sait que la_3 correspond à 435 vibrations doubles par seconde (238), et que le rapport de ut à la est 1 à $\frac{5}{3}$; on a donc $ut_3 \times \frac{5}{3} = 435$, d'où $ut_3 = 261$.

Ut_3 une fois connu, on en déduit $ré_3$ en multipliant 261 par $\frac{9}{8}$, qui représente le nombre relatif de vibrations de $ré$ par rapport à ut (234); donc

$$ré_3 = 261 \times \frac{9}{8} = 293 \frac{5}{8}.$$

Cela posé, on sait que dans les tuyaux ouverts on a la relation $n = p \cdot \frac{v}{2L}$ (255), n étant le nombre des ondes sonores complètes par seconde; v la vitesse du son dans l'air, laquelle à 10 degrés est de 337 mètres; L la longueur du tuyau de la bouche à l'extrémité, et p un nombre entier quelconque.

Faisant $p = 4$ pour avoir le son 4, ou le troisième harmonique, il vient

$$n = \frac{4v}{2L}, \text{ d'où } L = \frac{2v}{n} = \frac{2 \cdot 337}{293 + \frac{5}{8}} = 2^m, 295.$$

II. On demande le rang dans l'échelle musicale de l'harmonique 5, lorsqu'il est rendu, à la température de 10 degrés, par un tuyau fermé de 3^m,23 de longueur.

La formule des tuyaux fermés étant $L = (2p + 1) \frac{v}{4n}$ (255), en y faisant $p = 2$ pour avoir le son du troisième rang, c'est-à-dire l'harmonique 5, il vient :

$$L = \frac{5v}{4n}, \text{ d'où } n = \frac{5v}{4L} = \frac{5 \cdot 337^m}{4 \cdot 3^m, 23} = 130,4.$$

Or on a vu que ut_2 correspond à 130,5 vibrations complètes (238), donc l'harmonique 5 du tuyau donné est ut_2 .

III. Un tuyau ouvert donne un son de 100 vibrations par seconde, lorsqu'on y souffle de l'air à 10 degrés; quelle devrait être la température de l'air introduit, pour que le son rendu fût la quinte majeure du premier?

On sait que le son fondamental étant 1, la quinte majeure est $\frac{3}{2}$ (232), c'est-à-dire que les deux sons qui donnent la quinte sont entre eux comme 2 est à 3. Par conséquent, le son donné étant 100, le son cherché est 150.

Cela posé, la formule des tuyaux ouverts étant $L = p \cdot \frac{v}{2n}$ (255), si l'on y fait $p = 1$, on trouve, pour le son fondamental, $L = \frac{v}{2n}$; d'où l'on déduit, pour le premier son, $L = \frac{v'}{200}$, et pour le second, $L = \frac{v''}{300}$, v' étant la vitesse du son à 10 degrés, et v'' sa vitesse à t . De ces deux égalités on tire $\frac{v'}{200} = \frac{v''}{300}$. Or on sait (210) que $v' = v\sqrt{1 + 10\alpha}$, et $v'' = v\sqrt{1 + \alpha t}$. On a donc

$$\frac{v\sqrt{1+10\alpha}}{200} = \frac{v\sqrt{1+\alpha t}}{300}, \text{ ou } \frac{1}{2}\sqrt{1+10\alpha} = \frac{1}{3}\sqrt{1+\alpha t};$$

en élevant au carré et réduisant, on a enfin

$$9(1+10\alpha) = 4(1+\alpha t), \text{ ou } 5+90\alpha = 4\alpha t;$$

résolvant cette dernière équation par rapport à t , et remplaçant α par sa valeur 0,00367 (320), on trouve $t = 363^{\circ}$.

IV. Un tuyau ouvert et un bourdon (tuyau fermé) ont une longueur commune de 2 mètres; on demande : 1° quel est le rapport musical qui existe entre les seconds harmoniques de ces tuyaux; 2° quel est le nombre absolu de vibrations qui caractérise l'un ou l'autre de ces tuyaux. — La température est de 20 degrés, le coefficient de dilatation de l'air 0,00367, et la vitesse du son dans l'air à zéro 333 mètres.

1° On sait que le son fondamental étant 1, le tuyau ouvert rend les harmoniques 2, 3, 4, 5, 6, ... et le tuyau fermé les harmoniques 3, 5, 7, ... (250). Les seconds harmoniques que l'on compare sont donc 3 et 5; mais comme, dans les tuyaux ouverts, un harmonique quelconque est à l'octave aigüe de l'harmonique de même rang dans les tuyaux fermés de même longueur (257), les nombres relatifs de vibrations des deux sons que l'on compare ne sont pas 3 et 5, mais 6 et 5; leur rapport est donc $\frac{6}{5}$, c'est-à-dire la tierce mineure (232).

2° Pour calculer le nombre absolu de vibrations qui caractérise un de ces deux sons, celui rendu par le tuyau ouvert, par exemple, prenons la formule $n = p \cdot \frac{v'}{2L}$, qui est celle des tuyaux ouverts, et dans laquelle v' représente la vitesse du son dans l'air à t degrés.

En y faisant $p = 3$, pour avoir le second harmonique, et $v' = v\sqrt{1+\alpha t}$ (210), il vient $n = \frac{3v\sqrt{1+\alpha t}}{2L}$; ou, remplaçant v , t , L par les valeurs données dans

$$\text{l'énoncé, } n = \frac{3.333\sqrt{1+0,00367 \times 20}}{4} = 258,7.$$

Si l'on voulait calculer le nombre absolu des vibrations du deuxième son, on prendrait la formule $n' = \frac{(2p+1)v'}{4L}$; en y faisant $p = 2$ pour avoir le deuxième harmonique, on trouve

$$n' = \frac{5v\sqrt{1+\alpha t}}{4L} = \frac{5.333\sqrt{1+0,00367 \times 20}}{8} = 215,6.$$

Si l'on prend le rapport des deux nombres 258,7 et 215,6, on vérifie qu'il est $\frac{6}{5}$.

* CHAPITRE VI

VIBRATIONS DES VERGES, DES LAMES, DES PLAQUES ET DES MEMBRANES

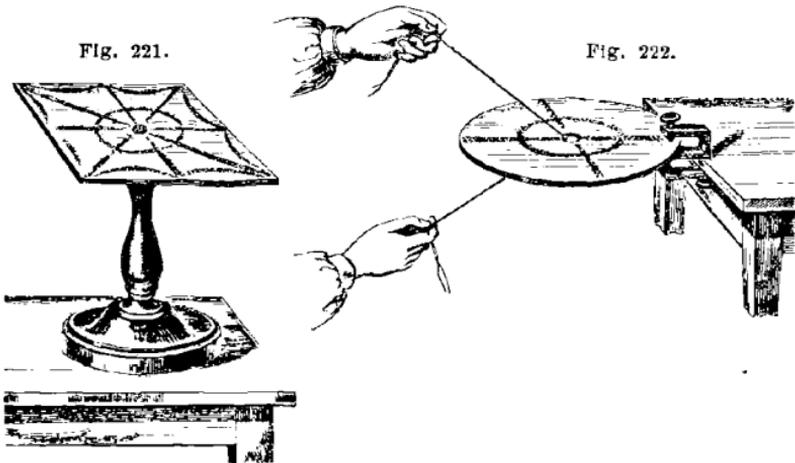
260. **Vibrations des verges et des lames.** — Les verges et les lames minces, de bois, de verre, de métal, et surtout d'acier trempé, vibrent en vertu de leur élasticité, et présentent, comme les cordes, deux sortes de vibrations, les unes transversales, les autres longitudinales. On fait naître les premières en fixant les

verges et les lames par un bout, et en passant un archet sur la partie libre. On produit les vibrations longitudinales dans une verge en la fixant en l'un de ses points, et en la frottant, dans le sens de sa longueur, avec un morceau de drap mouillé ou saupoudré de colophane. Toutefois, dans ce dernier cas, on n'obtient un son qu'autant que le point de la verge qu'on a fixé en marque la moitié, le tiers, le quart, en un mot, une partie aliquote.

On démontre, par le calcul, que le nombre des vibrations transversales des verges et des lames de même nature est en raison directe de leur épaisseur et en raison inverse du carré de leur longueur. La largeur des lames n'a pas d'influence sur le nombre des vibrations qu'elles peuvent rendre; elle fait seulement varier la force nécessaire pour les ébranler.

Dans les verges élastiques de même nature, le nombre de vibrations longitudinales est en raison inverse de leur longueur, quels que soient leur diamètre et la forme de leur section transversale.

261. **Vibrations des plaques.** — Lorsqu'on veut mettre une plaque en vibration, on la fixe par son centre (fig. 221), et on l'ébranle sur ses bords au moyen



d'un archet; ou bien on la fixe par quelque point de sa surface, et on l'ébranle à son centre, percé pour cela d'une ouverture dans laquelle on détermine un frottement à l'aide de crins enduits de colophane (fig. 222).

Les plaques qu'on fait vibrer présentent des lignes nodales (244) qui varient par leur nombre et leur position, selon la forme des plaques, leur élasticité, le mode d'ébranlement et le nombre des vibrations. On rend les lignes nodales apparentes en recouvrant les plaques d'une légère couche de sable avant de les faire vibrer. Aussitôt que les vibrations commencent, le sable abandonne les parties vibrantes, et vient se déposer sur les lignes nodales (fig. 221 et 222).

On détermine la position des lignes nodales à volonté, en touchant les parties où l'on désire qu'elles se produisent. Le nombre de ces lignes est généralement d'autant plus considérable, que le nombre des vibrations est plus grand, c'est-à-dire que le son rendu par les plaques est plus haut. Les lignes nodales présentent toujours une grande symétrie de forme, et pour une même plaque ébranlée dans les mêmes conditions, elles se produisent identiquement. C'est Chladni qui a fait connaître le phénomène des lignes nodales dans les plaques.

Les vibrations des plaques sont soumises aux lois suivantes : *Pour des plaques de même nature, de même forme, donnant les mêmes figures, le nombre des*

vibrations est en raison directe des épaisseurs des plaques, et en raison inverse de leurs surfaces.

262. **Vibrations des membranes.** — La flexibilité des membranes ne leur permet pas de vibrer, si elles ne sont tendues comme la peau d'un tambour. Elles rendent alors un son d'autant plus élevé, qu'elles sont de plus petite dimension et plus fortement tendues. Pour obtenir des membranes vibrantes, Savart collait, sur des cadres de bois, de la baudruche très-flexible.

Les membranes peuvent vibrer par percussion, comme dans le tambour, ou par influence. En effet, Savart a observé qu'une membrane peut vibrer sous l'influence des vibrations de l'air, quel que soit le nombre de ces vibrations, pourvu qu'elles soient assez intenses. La figure 223 représente une membrane vibrant sous l'influence des vibrations qu'imprime à l'air un timbre sonore. Du sable

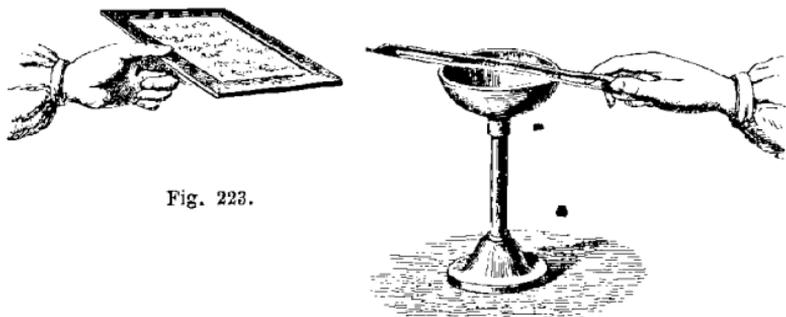


Fig. 223.

fin répandu sur la membrane montre la formation des nœuds et des ventres, de même que sur les plaques.

* CHAPITRE VII

ANALYSE ET SYNTHÈSE DES SONS, TIMBRE

263. **Sons simples et sons composés.** — On nomme sons *simples* ceux produits par une seule espèce de vibrations, sans mélange d'harmoniques, et sons *composés* ceux qui résultent de plusieurs sons superposés. On peut obtenir des sons simples avec un diapason monté sur une caisse renforçante, avec les tuyaux fermés, avec la voix humaine quand on chante la syllabe *ou*; mais les sons simples sont rares, et ceux que nous percevons habituellement sont composés.

Avec les cordes vibrantes qui se subdivisent en parties aliquotes de leur longueur totale (244), la corde entière rend le son fondamental, ou le plus grave, et les parties aliquotes donnent ses harmoniques. Le son composé ainsi formé est harmonieux; mais tout son composé qui ne résulte pas de la réunion du son fondamental et d'un ou plusieurs de ses harmoniques est discordant.

264. **Analyse des sons par les résonateurs.** — C'est Helmholtz qui, en 1863, a fait voir que la plupart des sons regardés comme simples sont composés. Sa méthode est fondée sur la résonance, c'est-à-dire sur la propriété qu'ont les caisses sonores, quand elles sont de dimensions convenables, de vibrer spontanément à l'unisson d'un son donné, et de le renforcer (207,5°). Les caisses de Helmholtz sont des globes creux, de laiton, dont les dimensions varient de ma-

nière à ce qu'ils puissent renforcer toutes les notes de la gamme et leurs harmoniques. Ces globes, qu'on nomme *résonnateurs*, sont percés, aux deux extrémités d'un même diamètre, de deux trous circulaires (fig. 225); à l'un est fixée une tubulure cylindrique *a*, à l'autre une tubulure conique *b*. La hauteur du son avec lequel s'accorde un résonnateur dépend de ses dimensions et de la grandeur de l'ouverture *a*. C'est celle qui reçoit le son, tandis que le cône *b* est introduit dans une oreille, pendant qu'on a soin de boucher l'autre. En expérimentant ainsi, l'oreille est sourde pour tout autre son que celui pour lequel le résonnateur est accordé; mais aussitôt que ce son est produit, quoique faible et mélangé avec d'autres, l'oreille le perçoit distinctement. De là, un procédé très-sensible pour reconnaître un son parmi un grand nombre d'autres. C'est avec des résonnateurs diversement accordés que Helmholtz a décomposé les sons des différents instruments de musique, de la voix humaine et même des bruits.

Kœnig a modifié le résonnateur de Helmholtz en lui donnant la disposition

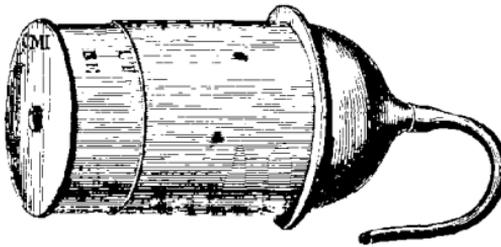


Fig. 224.

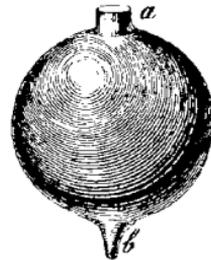


Fig. 225.

représentée dans la figure 224. Ici le résonnateur est cylindrique et à tirage, l'extrémité qui reçoit le son pouvant se tirer plus ou moins, de manière à faire varier le volume à volonté. Le son devenant alors de plus en plus grave, un même résonnateur peut correspondre successivement à plusieurs notes. Sur l'extrémité conique s'applique un tuyau de caoutchouc qui sert à conduire les vibrations de l'air du résonnateur à des flammes manométriques.

265. **Appareil de Kœnig pour l'analyse des sons.** — L'application successive à l'oreille de résonnateurs différents étant lente et pénible, Kœnig a imaginé un appareil dans lequel une série de résonnateurs agissant sur des flammes manométriques (228), les sons deviennent visibles et peuvent être montrés à un nombreux auditoire.

Cet appareil consiste en un châssis de fonte XY (fig. 226) sur lequel sont fixés, en deux séries parallèles, quatorze résonnateurs accordés pour donner toutes les notes de fa_1 à ut_5 , c'est-à-dire quatre octaves et demie, notes dont les plus élevées donnent les harmoniques inférieures des premières. A droite des résonnateurs est une chambre C, qui reçoit le gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc D, et sur laquelle sont montés huit bocs munis chacun d'une capsule manométrique (228). Chaque bec est en communication avec la chambre C par un tuyau de caoutchouc spécial, tandis que, derrière l'appareil, d'autres tuyaux relient chaque bec à un des résonnateurs. Enfin, à droite des bocs est un système de miroirs tournants AB, identique avec celui déjà décrit (fig. 191).

Ces détails connus, soient le plus grand résonnateur à gauche accordé pour résonner avec le son 1, sept autres avec les harmoniques de ce son, et tous les huit en communication chacun avec un bec de gaz. Qu'on produise alors le son 1 devant l'appareil : si ce son est simple, le résonnateur inférieur parle seul, et la flamme correspondante est seule dentelée; mais si le son fondamental est accom-

pagué d'un ou de plusieurs de ses harmoniques, les résonnateurs consonnants parlent en même temps, ce qu'on reconnaît aux dentelures de leurs flammes. Le son produit se trouve donc ainsi analysé.

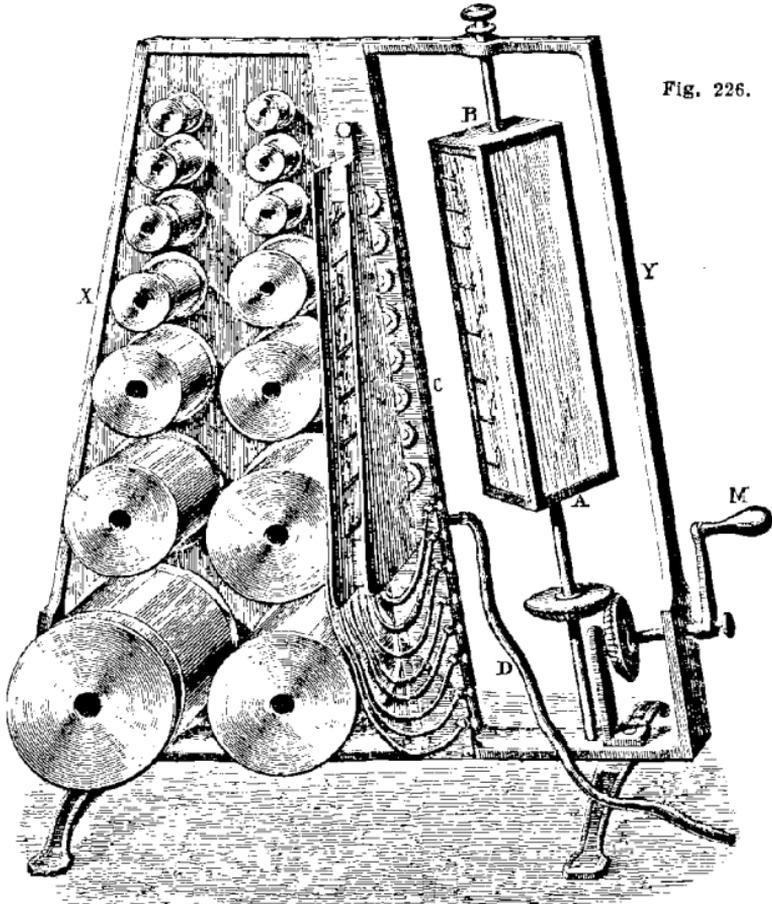


Fig. 226.

206. **Synthèse des sons.** — Helmholtz ne s'est pas borné à décomposer les sons; il a vérifié les résultats de son analyse par la synthèse, c'est-à-dire qu'il a reproduit un son donné, par la réunion des sons simples que lui avaient indiqués ses résonnateurs. L'appareil qu'il a adopté pour cette synthèse se compose de onze diapasons, dont le premier rend le son fondamental de 258 vibrations simples, ou ut_2 , neuf autres ses harmoniques, et le onzième sert d'interrupteur pour faire vibrer les diapasons au moyen d'électro-aimants (296). Chaque diapason a son électro-aimant spécial, et, de plus, un résonnateur qui le renforce.

Tous ces diapasons et leurs accessoires sont disposés en deux rangées parallèles de cinq (fig. 227), la première comprenant le son fondamental 1 et ses harmoniques impairs 3, 5, 7 et 9, la deuxième les harmoniques pairs 2, 4, 6, 8 et 10; au delà est le diapason interrupteur K fixé horizontalement. Une de

ses oranches est armée latéralement d'un fil de platine dont la pointe rase, sans y plonger, la surface d'un bain de mercure contenu dans un petit godet, dont le fond métallique est en communication par un fil de cuivre avec un électro-aimant placé en face du diapason.

L'appareil ainsi disposé, un courant électrique (297) entrant par la borne c passe dans l'électro-aimant E, de là dans ceux des neuf diapasons suivants,

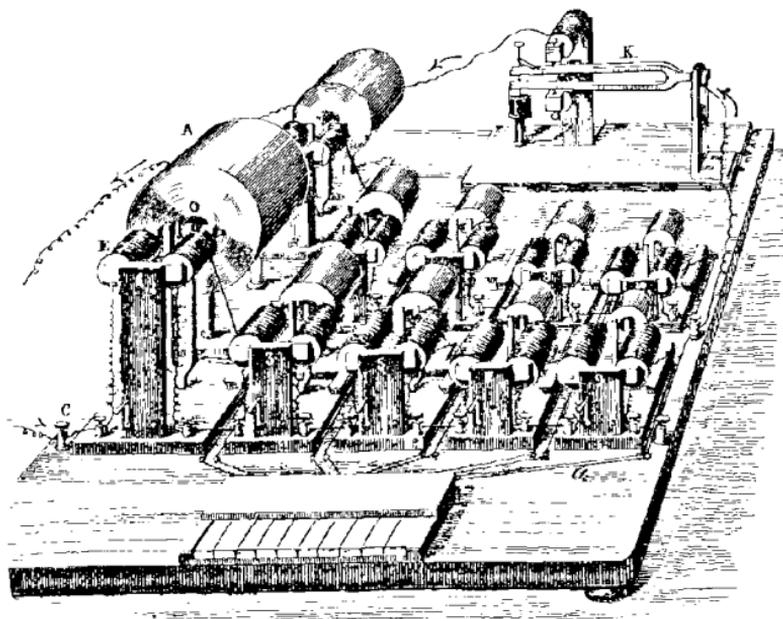


Fig. 227.

puis arrive au diapason K lui-même. Là, le courant se trouve arrêté tant que le diapason ne vibre pas, parce qu'alors le fil de platine ne plonge pas dans le mercure; mais si l'on fait vibrer le diapason en passant dessus un archet, à chaque vibration la pointe plonge, le courant passe dans le mercure, de là à l'électro-aimant, d'où il retourne enfin à la pile. Les branches du diapason revenant aussitôt sur elles-mêmes en vertu de leur élasticité, et la pointe de platine sortant du mercure, le courant s'interrompt, et ainsi de suite à chaque vibration double du diapason K. Or ces intermittences du courant se transmettant à tous les autres électro-aimants, ceux-ci sont alternativement actifs et inactifs. Par suite, ils tendent à communiquer à tous les diapasons, par attraction, le même nombre de vibrations. C'est ce qui a lieu pour le diapason 1, à l'unisson duquel est réglé le diapason interrupteur; mais le diapason 3, étant accordé pour faire un nombre de vibrations trois fois plus grand, fait 3 vibrations doubles à chaque interruption du courant, c'est-à-dire qu'il ne reçoit l'action attractive de son électro-aimant qu'à chaque troisième vibration; de même le diapason 5 ne reçoit une nouvelle impulsion qu'après 5 de ses vibrations; et ainsi de suite.

Ces détails connus, voici comment on fait fonctionner l'appareil. Le résonateur de chaque diapason est fermé par un clapet O (fig. 228) qui le rend sourd, en sorte que les sons rendus par les diapasons sont à peine perceptibles tant que

les clapets sont abaissés; mais chacun de ceux-ci est fixé à l'extrémité d'un levier conché, dont le plus petit bras est sollicité par un cordon α , qui se rend à une des 10 touches d'un clavier placé sur le devant de l'appareil (fig. 227). Lorsqu'on appuie sur la touche qui lui correspond, le cordon entraîne le levier, et, le clapet se soulevant, le résonateur parle et renforce son diapason. On peut donc, en appuyant sur telles ou telles touches, ajouter au son fondamental ceux de ses neuf premiers harmoniques que l'on veut, et reproduire ainsi les sons dont l'analyse a fait connaître la composition. Par exemple, en appuyant sur toutes les touches à la fois, tous les résonateurs parlent, et on obtient le son

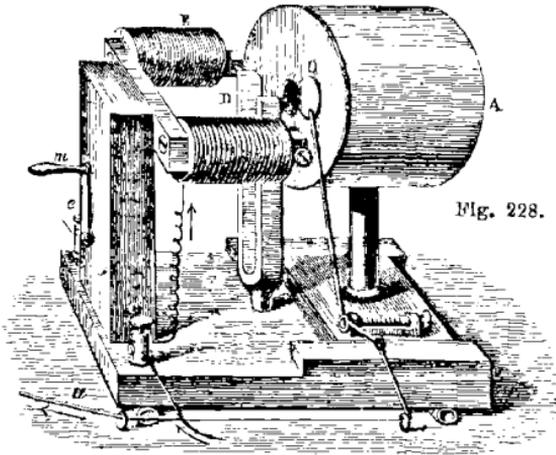


Fig. 228.

d'un tuyau ouvert à l'unisson du diapason le plus grave (253,2°). Si l'on n'appuie que sur la touche du son fondamental et sur celles de ses harmoniques impairs, on a le son d'un tuyau fermé (253, 1°).

267. **Cause du timbre.** — On a vu (229) que le timbre est cette qualité particulière du son qui fait que deux sons de même hauteur et de même intensité se distinguent cependant très-bien l'un de l'autre. On avait ignoré jusqu'ici la véritable cause du timbre; mais les travaux de Helmholtz sur l'analyse et la synthèse des sons, font voir que le timbre particulier à chaque son est dû au cortège des harmoniques qui l'accompagnent.

Les divers instruments de musique ne sont pas également riches en harmoniques. Les plus riches sont la voix humaine, les cordes et les tuyaux sonores; les membranes tendues, les verges, les diapasons sont pauvres. Dans une corde vibrante, une oreille exercée reconnaît très-bien le son fondamental et ses premiers harmoniques.

Koenig rend visible le timbre des voyelles au moyen de son appareil à flammes manométriques décrit plus haut (fig. 191). En chantant dans l'embouchure la voyelle E sur ut_1 puis sur ut_2 , on obtient dans le miroir tournant les flammes dentelées représentées dans les figures 229 et 230; et si l'on chante sur les mêmes notes la voyelle O, on a les figures 231 et 232.

268. **Perception des sons.** — Sans donner ici la description de l'oreille, qui est du domaine de la physiologie, voici comment Helmholtz explique la perception des sons les plus compliqués. M. de Corti ayant fait voir que la membrane intérieure du limaçon, dans l'oreille interne, est tapissée d'environ 3 000 petites fibres, qui sont les terminaisons des filaments du nerf acoustique, Helmholtz

admet que chaque fibre, accordée comme un petit résonateur, pour une note particulière, ne vibre qu'à l'unisson de cette note, et est sourde pour toutes les

Fig. 229.



Fig. 230.

autres. Chaque son simple ne fait donc vibrer qu'une seule fibre, tandis que les sons composés en font vibrer plusieurs. C'est par suite de cette perception

Fig. 231.



Fig. 232.

propre des sons simples par chacune des fibres de Corti, que l'oreille distingue un son entre plusieurs autres.

LIVRE VI

CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS PRÉLIMINAIRES ; THERMOMÈTRES

269. Chaleur, hypothèses sur sa nature, théorie dynamique. — La *chaleur* est la cause qui, suivant son plus ou moins d'énergie, fait naître en nous l'impression du chaud ou du froid ; mais cette cause a des effets plus variés et plus puissants : c'est elle qui fait fondre la glace, bouillir l'eau, rougir le fer.

De nombreuses hypothèses ont été émises sur la cause de la chaleur ; deux surtout ont été soutenues par les physiciens : le système de l'*émission*, et celui des *ondulations*.

Dans le premier système, on a longtemps expliqué les phénomènes de la chaleur par l'hypothèse d'un fluide matériel, impondérable, incoercible, qu'on nommait *calorique*. Dans cette hypothèse, les atomes du calorique, dans un état constant de répulsion, sont projetés dans toutes les directions et à toutes les distances, s'emmagasinant en quantité variable dans les corps, et s'opposant au contact immédiat de leurs molécules.

Cette hypothèse de la matérialité de la cause de la chaleur, soutenue par les savants les plus illustres, les Newton, les Lavoisier, les Laplace, les Gay-Lussac, est abandonnée aujourd'hui, et les physiciens les plus éminents de notre époque sont d'accord pour la remplacer par l'hypothèse des ondulations, suivant laquelle les dernières molécules des corps sont animées d'un mouvement de vibration très-petit, mais très-rapide, qui est cause de la chaleur, et qui est transmis à distance par l'intermédiaire d'un milieu infiniment élastique, l'*éther* (8). Celui-ci, répandu dans tout l'univers, et remplissant les espaces intermoléculaires, aussi bien que les espaces interplanétaires, est choqué par les molécules des corps, et ce choc fait naître dans l'éther des ondulations qui transmettent le mouvement et par suite la chaleur, de même que les ondes sonores de l'air propagent le son. En sorte que dans la

théorie des ondulations, ou *théorie dynamique*, ou *thermodynamique*, tous les phénomènes calorifiques sont ramenés à une cause unique, le mouvement : les corps les plus chauds étant ceux dont les molécules vibrent avec la plus grande vitesse et la plus grande amplitude, et les corps qui s'échauffent ou se refroidissent ne faisant que gagner ou perdre du mouvement.

Tout en adoptant la théorie dynamique, on a conservé le langage usité dans la théorie de l'émission, et l'on dit encore, d'un corps qui s'échauffe ou se refroidit, qu'il gagne ou perd de la chaleur; mais en réalité on doit entendre par là que ses molécules reçoivent ou cèdent du mouvement. En un mot, tous les phénomènes de la chaleur doivent s'expliquer par une communication ou par une transformation de mouvement ¹.

270. Travail interne et travail externe de la chaleur. — Dans la théorie dynamique, les molécules des corps possédant toujours une certaine quantité de force vive, quand celle-ci se communique à un autre corps, elle se partage en deux parties : l'une qui échauffe le corps en augmentant la vitesse et l'amplitude des vibrations moléculaires; l'autre qui disparaît en tant que chaleur sensible et n'échauffe pas le corps, mais le *dilate*, c'est-à-dire écarte ses molécules. Celles-ci se déplaçant alors, et exerçant un effort capable de vaincre les forces qui les lient, il y a un véritable *travail* produit, dans le sens qu'on attache à ce mot en mécanique (39). Or ce travail se divise en travail *interne* et en travail *externe*.

Le travail interne est celui qui est consommé pour vaincre les forces moléculaires qui unissent les dernières particules des corps. Ce travail est très-grand dans les solides, faible dans les liquides, et sensiblement nul dans les gaz.

Le travail externe est celui qui consiste à surmonter les résistances extérieures qui s'exercent sur les corps. Par exemple, pour se dilater, tout corps doit surmonter la pression atmosphérique qui le comprime en tous sens.

En résumé, le mouvement calorifique communiqué à un corps se résout : 1^o en échauffement, ou chaleur sensible au thermomètre; c'est de la chaleur communiquée; 2^o en travail interne, ou écartement des molécules; c'est de la chaleur transformée, in-

¹ Dans leurs écrits, dans leurs cours, dans leurs conférences, les professeurs à la tête de l'enseignement adoptent aujourd'hui la théorie dynamique de la chaleur, non-seulement en mécanique et en physique, mais en chimie et en physiologie; et nous pourrions citer ici les noms les plus sympathiques à la jeunesse des écoles. Il importe donc désormais d'introduire sans hésitation, dans l'enseignement élémentaire, la théorie nouvelle, qui explique d'une façon simple et uniforme tous les phénomènes de la chaleur.

sensible au thermomètre; 3° en travail externe, ou action contre les résistances extérieures; c'est encore de la chaleur transformée.

La portion de chaleur qui produit l'échauffement persiste à l'état de force vive moléculaire. Quant à celle qui disparaît pour produire le travail tant interne qu'externe, elle n'est pas détruite, mais *transformée* en travail; car tout mouvement est indestructible, et ne peut que se modifier, ou se communiquer d'un corps à un autre. Dans tous les cas, la chaleur ainsi transformée en travail est soumise à cette loi qu'on observe dans tous les phénomènes de thermodynamique : *à toute quantité de chaleur disparue correspond un certain travail produit*; et réciproquement, *à tout travail dépensé correspond un dégagement de chaleur déterminé*. On verra, en outre, qu'il y a toujours rapport constant entre les quantités de chaleur et de travail ainsi transformées l'une dans l'autre (408).

271. **Historique de la théorie dynamique de la chaleur.** — La théorie que la chaleur a pour origine un mouvement primordial des molécules de la matière n'est pas nouvelle. Déjà Newton, quoique ayant adopté la théorie de l'émission, avait dit que la chaleur consiste en un mouvement dans les corps. Rumford et Montgolfier développèrent cette théorie, et reconnurent que non-seulement le mouvement se transforme en chaleur, mais la chaleur en mouvement. En 1839, Seguin, dans un ouvrage sur l'influence des chemins de fer, annonçait que la force mécanique développée pendant le refroidissement d'un gaz ou d'une vapeur est la mesure et la représentation de la chaleur perdue. En 1842, le docteur Mayer, à Heilbronn, formulait, le premier, le rapport qui lie entre eux un certain travail mécanique et la chaleur nécessaire pour le produire; mais c'est M. Joule, professeur à Manchester, qui, le premier, en 1843, détermina l'équivalent mécanique de la chaleur (408), c'est-à-dire le rapport entre la quantité de chaleur dépensée et le travail mécanique produit, et réciproquement. Il établit ainsi définitivement la nouvelle théorie, en faisant voir qu'elle était plus qu'une hypothèse. En effet, c'est aujourd'hui un fait acquis à la science que, soit dans les machines, soit dans les phénomènes physiques, soit même dans l'économie animale, toute quantité de force vive qui disparaît comme chaleur, est reproduite en travail mécanique, et réciproquement.

Après Mayer et Joule, les savants qui, par leurs travaux, leurs écrits ou leur enseignement, ont le plus contribué à l'adoption de la théorie dynamique de la chaleur, sont MM. Colding, à Copenhague; Clausius, à Zurich; Macquorn Rankine, à Glasgow; W. Thompson, à Edimbourg; Tyndal, à Londres; Hirn, à Colmar; Dupré, à Rennes; Cazin, à Versailles; Regnault et Verdet, à Paris. Le livre qui a le plus popularisé la théorie dynamique est : *La chaleur considérée comme un mode de mouvement*, par Tyndall.

272. **Effets divers de la chaleur sur les corps.** — Non-seulement, comme on l'a vu ci-dessus, le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur échauffe de plus en plus les corps à mesure que sa vitesse augmente, mais il produit en outre les effets suivants : 1° l'énergie vibratoire croissant, les molécules se repoussent et le volume des corps augmente, ce qu'on exprime en disant qu'ils *se dilatent*; 2° le mouvement continuant à croître, les corps

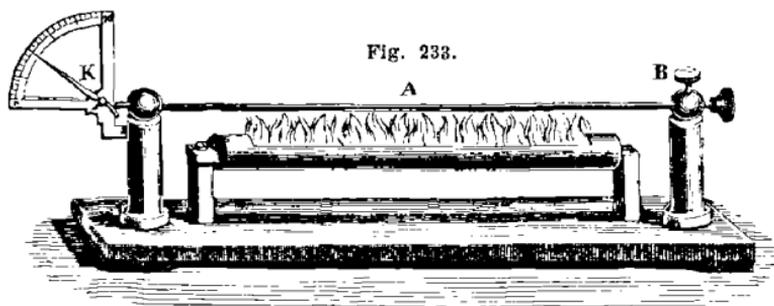
changent d'état, c'est-à-dire passent de l'état solide à l'état liquide, et de celui-ci à l'état aériforme; 3^o enfin, la vitesse de vibration atteint une limite au delà de laquelle l'équilibre moléculaire étant détruit, les corps composés sont *dissociés*; c'est-à-dire que leurs éléments n'obéissant plus à aucune affinité, il y a décomposition (410).

Si la rapidité du mouvement vibratoire décroît, des phénomènes inverses se produisent.

273. **Expériences qui démontrent la dilatation et la contraction.**

— Tous les corps se dilatent par l'effet de la chaleur. Les plus dilatables sont les gaz, puis les liquides et les solides. Dans ces derniers, on distingue la *dilatation linéaire*, c'est-à-dire suivant une seule dimension, et la *dilatation cubique*, c'est-à-dire en volume. Toutefois ces dilatations n'ont jamais lieu l'une sans l'autre. Dans les liquides et dans les gaz, il n'y a lieu de considérer que des dilatations en volume.

La dilatation des solides étant trop faible pour être visible directement, on la rend apparente à l'aide des expériences sui-



vantes. Pour la dilatation linéaire, on prend une tige métallique A (fig. 233), qu'on fixe à l'une de ses extrémités par une vis de pression B, tandis qu'à l'autre elle est libre et en contact avec le plus petit bras d'un levier K, mobile sur un cadran. Au-dessous de la tige est un réservoir dans lequel on brûle de l'alcool. Le levier K est d'abord au zéro du cadran; mais à mesure que la tige A s'échauffe, on le voit monter, ce qui rend sensible l'allongement de la tige.

La dilatation cubique des solides se démontre au moyen de l'*anneau de s'Gravesande*. On nomme ainsi un petit anneau métallique *m* (fig. 234) dans lequel passe librement, à la température ordinaire, une boule de cuivre rouge *a*, ayant à très-peu près le même diamètre que lui. Lorsque cette boule a été chauffée à la flamme d'une lampe à alcool, elle ne peut plus passer à travers l'anneau, ce qui démontre l'accroissement de volume.

Pour constater la dilatation des liquides, on soude à un petit ballon de verre un tube capillaire (fig. 235). Le ballon et une partie du tube étant remplis d'un liquide coloré, aussitôt qu'on l'échauffe, ce liquide s'élève dans le tube, de *a* en *b* par exemple, et la dilatation est toujours beaucoup plus grande que dans les solides.

Le même appareil sert à montrer la dilatation des gaz. Pour cela, on remplit le ballon d'air ou de tout autre gaz, et l'on introduit dans le tube un index de mercure de 1 à 2 centimètres de longueur (fig. 236). Lorsqu'on échauffe le ballon, seulement en approchant la main, l'index est refoulé vers l'extrémité du tube, et finit par en être expulsé; d'où l'on conclut que, même pour un faible accroissement de chaleur, les gaz sont très-dilatables.

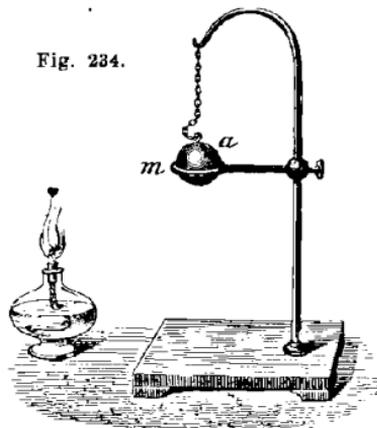


Fig. 235.



Fig. 236.

Fig. 234.



Dans ces diverses expériences, dès que les corps se refroidissent, ils se contractent, et lorsque la chaleur est revenue au même degré, ils reprennent exactement leur volume primitif.

La dilatation et la contraction sont des forces énormes, et il faudrait une force mécanique ordinaire presque incroyable pour augmenter ou réduire le volume des corps dans la même proportion.

274. Travail de la chaleur dans la dilatation. — Les solides étant fort peu dilatables, l'élévation de température n'y produit qu'un très-petit accroissement de volume, et par suite, dans les conditions ordinaires de pression atmosphérique que supportent les corps, le travail extérieur (270) pendant la dilatation est lui-même très-faible. Le contraire a lieu pour le travail intérieur, car la force qui unit les molécules étant considérable, il en est de même de l'effort nécessaire pour les écarter; d'où le travail

intérieur, dans la dilatation des solides, est toujours très-grand par rapport au travail extérieur.

Dans les liquides et dans les gaz, on verra que c'est le travail extérieur qui l'emporte sur le travail intérieur.

MESURE DES TEMPÉRATURES

275. Température. — La *température* d'un corps est l'état actuel de la chaleur sensible dans ce corps, sans augmentation ni diminution. Si cette quantité de chaleur augmente ou diminue, on dit que la température s'élève ou s'abaisse. Dans la théorie dynamique, la température est la représentation de l'énergie de la force vive que possèdent les molécules, et c'est quand cette énergie croît ou décroît, que la température s'élève ou s'abaisse.

276. Thermomètres. — On appelle *thermomètres* des instruments qui servent à mesurer les températures.

L'imperfection de nos sens ne nous permettant pas de mesurer la température des corps d'après les sensations plus ou moins vives de chaleur ou de froid qu'ils excitent en nous, on a dû recourir aux effets physiques que la chaleur produit sur les corps. Ces effets sont de plusieurs sortes. On a adopté les dilatations et les contractions comme les plus simples à observer.

Les solides étant très-peu dilatables, les corps dont on utilise la dilatation dans les thermomètres sont généralement des liquides. Cependant les physiciens font aussi usage de la dilatation des gaz dans un instrument connu sous le nom de *thermomètre à air*, que nous décrirons après la dilatation des gaz (326). Pour le moment, il ne sera question que des thermomètres à liquides. Ceux de ces corps exclusivement employés sont le mercure et l'alcool : le premier parce qu'il est de tous les liquides celui qui se dilate le plus régulièrement, parce qu'il n'entre en ébullition qu'à une température très-élevée, et enfin parce qu'il se met plus promptement que les autres liquides en équilibre de température avec les corps ambiants, le mercure étant beaucoup meilleur conducteur de la chaleur que les autres liquides, et exigeant moins de chaleur pour s'échauffer d'une quantité donnée. Quant au thermomètre à alcool, son usage est fondé sur ce que ce liquide ne se congèle pas par les plus grands froids connus.

L'invention des thermomètres date de la fin du xvi^e siècle. Elle est attribuée, par les uns à Galilée, par les autres à Drebbel, médecin hollandais, ou à Sanctorius, médecin vénitien.

Le thermomètre à mercure est le plus répandu. Il se compose d'un tube capillaire, de verre ou de cristal, soudé à un réservoir

cylindrique ou sphérique de même matière. Le réservoir et une partie du tube sont remplis de mercure, et une échelle, graduée sur le tube même, ou sur une plaque de cuivre qui lui est parallèle, fait connaître la dilatation du liquide (fig. 241 et 242, page 248).

Outre la soudure de la tige au réservoir, laquelle se fait à la lampe d'émailleur, la construction d'un thermomètre comprend trois opérations : la division du tube en parties d'égale capacité, l'introduction du mercure dans le réservoir, et la graduation.

277. Division du tube en parties d'égale capacité. — Les indications du thermomètre n'étant exactes qu'autant que les divisions de l'échelle placée sur le tube correspondent à des dilatations égales du mercure qui est dans le réservoir, il importe que l'échelle soit graduée de manière à indiquer des capacités égales dans l'intérieur du tube. Si celui-ci était parfaitement cylindrique et d'un diamètre constant, il suffirait, pour obtenir des capacités égales, de diviser la longueur du tube en parties égales. Mais le diamètre des tubes de verre étant, en général, plus fort à une extrémité qu'à l'autre, il en résulte que des capacités égales du tube sont représentées, sur l'échelle, par des longueurs inégales. Ce sont ces dernières qu'il s'agit de déterminer.

Pour cela, avant que le tube soit soudé au réservoir, on y introduit une colonne de mercure de 2 à 3 centimètres, qu'on a soin de maintenir à zéro, et qu'on promène dans le tube de manière qu'à chaque déplacement la colonne avance juste d'une quantité égale à sa longueur. Une règle divisée en millimètres, sur laquelle est appliqué le tube, permet d'évaluer, à un dixième de millimètre près, la longueur de la colonne de mercure. Si cette longueur demeure invariable, c'est signe que la capacité du tube est partout la même; si elle décroît, cela montre que le diamètre intérieur augmente. Lorsqu'on observe ainsi que la colonne de mercure éprouve des variations de longueur de plusieurs millimètres, on rejette le tube, et l'on en cherche un plus régulier. Mais si ces variations sont peu sensibles, on colle le long du tube une bande de papier, et l'on marque un trait au crayon en regard des points occupés successivement par les extrémités de la colonne.

Les divisions ainsi formées indiquent nécessairement des capacités égales, puisqu'elles correspondent à un même volume de mercure. Les intervalles de ces divisions étant assez rapprochés pour qu'on puisse regarder le diamètre du tube comme constant dans chacune d'elles, on passe à des divisions plus petites, en partageant les premières en un certain nombre de parties égales; ce qui s'obtient au moyen de la vis micrométrique (13). C'est

ensuite à l'aide de ces divisions qu'on obtient une graduation exacte de l'échelle (282).

278. **Remplissage du thermomètre.** — Pour introduire le mercure dans le thermomètre, on soude, à l'extrémité supérieure de la tige, un entonnoir C (fig. 237), qu'on emplit de mercure; puis, inclinant un peu le tube, on dilate l'air qui est dans le réservoir, en chauffant celui-ci avec une lampe à alcool, ou en le plaçant sur une grille inclinée, comme pour le baromètre (fig. 116), et en l'entourant de charbons incandescents. L'air dilaté sort en partie par l'entonnoir C. Si on laisse refroidir le tube et qu'on le tient dans une position verticale, l'air qui reste se contracte, et la pression atmosphérique force le mercure à passer dans le ré-

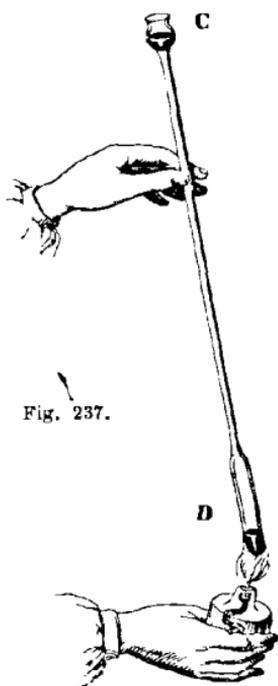


Fig. 237.

servoir D, quelque capillaire que soit le tube. Mais le mercure cesse de pénétrer dans le réservoir lorsque l'air qui s'y trouve encore a pris, par la diminution de volume, une tension capable de faire équilibre au poids de l'atmosphère et à celui de la colonne de mercure qui est dans le tube. Chauffant alors de nouveau et laissant refroidir, il entre une nouvelle quantité de mercure, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne reste plus, dans le réservoir D, qu'un très-petit volume d'air. Pour le chasser, on chauffe jusqu'à ce que le mercure entre en ébullition. Les vapeurs de mercure, en se dégageant, entraînent avec elles l'air et l'humidité qui se trouvaient encore dans le tube et dans le réservoir.

L'instrument étant ainsi rempli de mercure sec et pur, on enlève l'entonnoir C, puis on ferme le tube en en soudant l'extrémité à la lampe. On a soin de chauffer auparavant le réservoir D, de manière à chasser la moitié ou les deux tiers du mercure qui est dans le tube; sinon, ce liquide ne pourrait se dilater sans briser le thermomètre. La quantité de mercure à expulser est d'autant plus grande, que l'instrument est destiné à mesurer des températures plus élevées. On a soin, en outre, au moment où l'on ferme le tube, de chauffer le réservoir D de manière que le liquide dilaté atteigne le sommet du tube. De la sorte, il ne reste

pas d'air dans le thermomètre, ce qui est nécessaire; car l'air comprimé, lorsque le mercure s'élève, pourrait faire éclater le tube.

279. Graduation du thermomètre, points fixes de son échelle.

— Après avoir rempli un thermomètre comme il vient d'être dit, il reste à le graduer, c'est-à-dire à tracer sur la tige une échelle qui serve à mesurer les variations de température. Pour cela, il a fallu se donner, sur cette tige, deux points fixes qui représentassent des températures faciles à reproduire et toujours identiques.

Or l'expérience a fait connaître que la température de fusion de la glace est invariable, quelle que soit la source de chaleur, et que l'eau distillée, sous la même pression et dans un vase de même matière, entre constamment en ébullition à la même température. En conséquence, on a pris pour premier point fixe, c'est-à-dire pour le zéro de l'échelle, la température de la glace fondante, et pour second point fixe, qu'on représente par 100, la température d'ébullition de l'eau distillée, dans un vase de métal, la pression atmosphérique étant $0^m,76$. La graduation du thermomètre comprend donc trois opérations : la détermination du zéro, celle du point 100, et le tracé de l'échelle.

280. Détermination du zéro. — Pour trouver le zéro, on remplit de glace pilée un vase dont le fond est percé d'un trou pour laisser écouler l'eau qui provient de la fusion de la glace (fig. 238). On plonge le réservoir du thermomètre et une partie de la tige dans cette glace, pendant un quart d'heure environ. La colonne de mercure s'abaisse graduellement, puis reste stationnaire. Alors, au point où s'arrête le mercure, on marque un trait au crayon sur une petite bande de papier préalablement collée sur la tige : c'est la place du zéro.

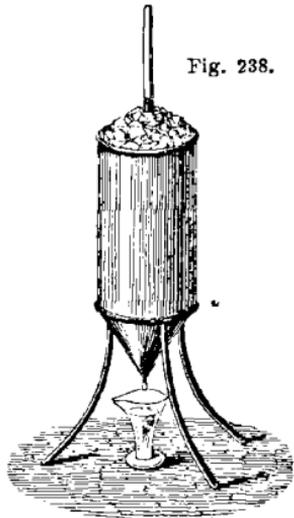


Fig. 238.

Ce zéro est arbitraire. Le *zéro absolu* serait celui qui correspondrait à l'absence de toute chaleur dans les corps, c'est-à-dire au repos absolu des molécules entre elles. On verra plus tard comment on l'évalue théoriquement, et de combien il est au-dessous de la température de la glace fondante (328).

281. Détermination du point 100. — Le second point fixe se détermine au moyen de l'appareil représenté dans les figures 239 et 240; l'une en montre l'ensemble pendant qu'il fonctionne, l'autre

tre une coupe verticale. Tout l'appareil est de cuivre rouge. Une tubulure centrale A, ouverte à ses deux bouts, est fixée sur un vase cylindrique M, contenant de l'eau; une seconde tubulure B, concentrique avec la première, et l'entourant en entier, est fixée sur le même vase M. Cette seconde enveloppe, fermée à ses deux

Fig. 239.

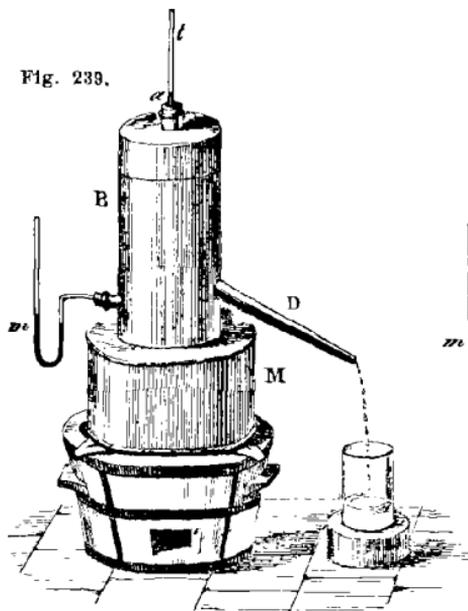
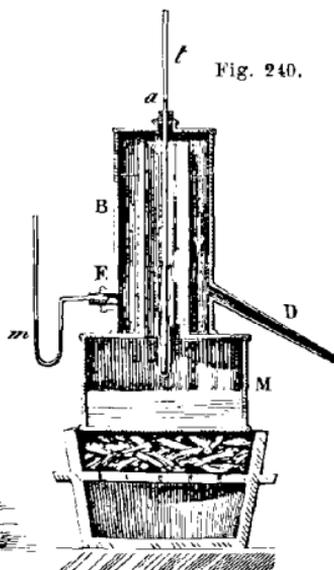


Fig. 240.



extrémités, est munie de trois tubulures *a*, E, D; dans la première est un bouchon au centre duquel passe la tige *t* du thermomètre dont on cherche le point 100; à la seconde est adapté un tube de verre *m*, contenant du mercure, et destiné à servir de manomètre pour mesurer la tension de la vapeur dans l'appareil; enfin, la troisième tubulure D sert de dégagement à la vapeur, après qu'elle a circulé autour du thermomètre.

L'appareil étant placé sur un fourneau et chauffé jusqu'à l'ébullition, la vapeur produite dans le vase M s'élève dans le tube A et se rend entre les deux enveloppes, comme le montrent les flèches, jusqu'à la tubulure D, d'où elle se dégage dans l'atmosphère. Le thermomètre *t* se trouvant ainsi entouré par la vapeur, le mercure qu'il contient se dilate, et lorsqu'il est devenu stationnaire, on marque au point *a*, où il s'arrête, un trait qui est le point 100 cherché. La deuxième enveloppe B empêche le refroidissement de la tubulure centrale par son contact avec l'air.

La détermination du point 100 de l'échelle thermométrique

semble exiger que la hauteur du baromètre soit 0^m,76 pendant l'expérience; car on verra bientôt que, lorsque cette hauteur est plus grande ou plus petite que 0^m,76, non-seulement la température d'ébullition se trouve portée au-dessus ou au-dessous de 100 degrés, mais que la température de la vapeur est elle-même augmentée ou diminuée d'une quantité égale. Toutefois on peut obtenir exactement le point 100, quelle que soit la pression, par la correction suivante. L'expérience a fait voir que, lorsque la colonne barométrique monte ou s'abaisse de 27 millimètres, la température d'ébullition monte ou descend d'un degré, c'est-à-dire de $\frac{1}{27}$ de degré par millimètre. Par conséquent, si la hauteur du baromètre est, par exemple, 766 millimètres au moment où l'on prend le point 100, l'excès de pression au-dessus de 760 étant de 6 millimètres, le nombre de degrés correspondant au sommet de la colonne mercurielle dans le thermomètre n'est pas 100, mais $100 + \frac{1}{27} \times 6 = 100 + \frac{2}{9}$.

Gay-Lussac ayant observé que l'eau entre en ébullition à une température un peu plus haute dans un vase de verre que dans un vase de métal, et, de plus, la température d'ébullition étant élevée par les sels que l'eau tient en dissolution, on a admis d'abord que, pour déterminer le point 100 des thermomètres, il fallait faire usage d'un vase de métal et d'eau distillée. Mais ces deux dernières conditions sont inutiles depuis la découverte de M. Rudberg, physicien suédois. Ce savant a reconnu, en effet, que la nature du vase et les sels en dissolution influent bien sur la température d'ébullition de l'eau, mais *non sur celle de la vapeur qui se produit*. C'est-à-dire que l'eau étant à plus de 100 degrés, par l'une des causes ci-dessus, la vapeur qui s'en dégage est néanmoins à 100 degrés, si la pression est 0^m,76.

Dès lors, pour prendre le point 100, il n'est pas nécessaire de faire usage d'eau distillée, ni d'un vase de métal. Il suffit, la pression étant 0^m,76, ou la correction se faisant comme ci-dessus, que le thermomètre plonge tout entier dans la vapeur et non dans l'eau chaude.

Du reste, même en faisant usage d'eau distillée, le réservoir du thermomètre ne doit pas plonger dans l'eau bouillante; car il n'y a que la surface de celle-ci qui soit réellement à 100 degrés, la température croissant de tranche en tranche vers le fond, à cause de l'excès de pression (360).

282. **Construction de l'échelle.** — Les deux points fixes obtenus, on partage l'intervalle qui les sépare en 100 parties égales, qu'on nomme *degrés*, et l'on continue ces divisions au-dessus du point 100 et au-dessous du zéro, en les inscrivant sur

une planchette de bois ou sur une plaque de métal à laquelle le thermomètre est fixé (fig. 241).

Si le tube du thermomètre avait partout le même diamètre, il suffirait, pour tracer les degrés, de partager l'intervalle entre zéro et 100 en 100 parties égales; mais cette condition n'étant jamais rigoureusement satisfaite, c'est ici qu'il faut faire usage des divisions en parties d'égale capacité qui ont d'abord été tracées sur le tube (277). Pour cela, on compte le nombre de ces divisions comprises entre les deux points fixes, et divisant ce nombre par 100, on a le nombre de divisions et fraction de division qui équivaut à 1 degré; on en déduit ensuite, à partir du zéro, la position de chaque degré.

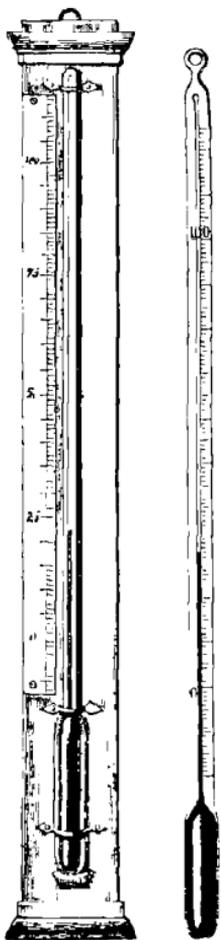


Fig. 241. Fig. 242.

Dans les thermomètres de précision, l'échelle est graduée sur le verre même de la tige (fig. 242). Elle ne peut ainsi se déplacer, et sa longueur reste sensiblement constante, le verre étant très-peu dilatable. Dans ce cas, pour obtenir sur le verre des traits permanents, on recouvre, à chaud, la tige thermométrique d'une légère couche de vernis; puis, avec une pointe d'acier, on marque sur le vernis les traits de l'échelle et les chiffres correspondants. On expose enfin la tige, pendant dix minutes environ, à des vapeurs d'acide fluorhydrique, qui jouit de la propriété d'attaquer le verre, et qui grave les traits en creux partout où le vernis a été enlevé.

Les degrés se désignent par un zéro placé à droite du nombre qui marque la température, et un peu au-dessus. Enfin, pour distinguer les températures au-dessous de zéro de celles qui sont au-dessus, on les fait précéder du signe — (*moins*); 15 degrés au-dessous de zéro se représentent donc par — 15°.

283. Différentes échelles thermométriques. — On distingue, dans la graduation des thermomètres, trois échelles : l'échelle centigrade, l'échelle de Réaumur et l'échelle de Fahrenheit.

L'échelle centigrade est celle dont nous avons indiqué ci-des-

sus la construction, et dont on fait généralement usage en France. Elle est due à Celsius, physicien suédois, mort en 1744.

Dans la seconde échelle, adoptée en 1731 par Réaumur, physicien français, les deux points fixes correspondent encore à la température de la glace fondante et à celle de l'eau bouillante; mais leur intervalle est partagé en 80 degrés. C'est-à-dire que 80 degrés Réaumur équivalent à 100 degrés centigrades; 1 degré R. égale donc $\frac{100}{80}$ ou $\frac{5}{4}$ de degré c.; et réciproquement, 1 degré c. égale $\frac{80}{100}$ ou $\frac{4}{5}$ de degrés R. Donc, pour convertir un nombre de degrés R. en degrés c., 20 degrés, par exemple, il faut multiplier ce nombre par $\frac{5}{4}$; car 1 degré R. égalant $\frac{5}{4}$ de degré c., 20 degrés R. valent en degrés c. 20 fois $\frac{5}{4}$ ou 25. De même, pour convertir les degrés c. en degrés R., il faut les multiplier par $\frac{4}{5}$.

Fahrenheit adopta, en 1714, une échelle dont l'usage s'est répandu depuis en Hollande, en Angleterre et dans l'Amérique du Nord. Le point fixe supérieur de cette échelle correspond encore à la température de l'eau bouillante; mais le zéro correspond au degré de froid qu'on obtient en mélangeant des poids égaux de sel ammoniac pilé et de neige, et l'intervalle des deux points est divisé en 212 degrés. Le thermomètre F., dans la glace fondante, marque 32 degrés; par conséquent, 100 degrés centigrades équivalent, en degrés F., à 212 moins 32, ou 180; 1 degré c. vaut donc $\frac{180}{100}$ ou $\frac{9}{5}$ de degré F., et, réciproquement, 1 degré F. égale $\frac{100}{180}$ ou $\frac{5}{9}$ de degré c.

Cela posé, soit à convertir en degrés c. un certain nombre de degrés F., 95 par exemple. On doit d'abord retrancher 32 du nombre donné, afin de compter les deux sortes de degrés d'un même point de la tige. Le reste est ici 63; or 1 degré F. valant $\frac{5}{9}$ de degré c., 63 degrés F. égalent $\frac{5}{9} \times 63$, ou 35 degrés c.

En représentant par t_f la température donnée en degrés F., et par t_c la température correspondante en degrés c., on a la formule $t_c = (t_f - 32) \frac{5}{9}$ [1], qui indique les calculs à effectuer pour opérer la conversion; de cette égalité on tire $t_f = t_c \times \frac{9}{5} + 32$ [2], formule qui sert à convertir les degrés c. en degrés F.

Ces formules sont générales et s'appliquent à toutes les températures au-dessus ou au-dessous des zéros des échelles à comparer; seulement il faut tenir compte des signes de t_f et de t_c . Par exemple, soit proposé de trouver quelle est la température en degrés c. lorsque le thermomètre F. marque 5°; on a, par la formule [1]: $t_c = (5 - 32) \frac{5}{9} = -\frac{27 \times 5}{9} = -15$.

De même, le thermomètre c. marquant -15 , la formule [2] donne

$$t_f = -15 \times \frac{9}{5} + 32 = -27 + 32 = 5^\circ.$$

Si l'on s'agissait de convertir des degrés F. en degrés R., on trouverait facilement que l'équation [1] ci-dessus prend la forme $t_r = (t_f - 32) \frac{4}{9}$ [3].

284. Déplacement du zéro. — Les thermomètres construits même avec le plus grand soin sont soumis à une cause d'erreur dont il importe de tenir compte : c'est qu'avec le temps, le zéro tend à se relever, le déplacement allant quelquefois jusqu'à deux degrés. C'est-à-dire que, le thermomètre étant plongé dans la glace fondante, le mercure ne descend plus au zéro.

On a d'abord attribué ce phénomène à une diminution du volume du réservoir, laquelle résulterait de la pression extérieure, le vide étant fait dans le thermomètre; mais on a observé que dans les thermomètres qui contiennent de l'air, ou qui sont ouverts à l'extrémité de la tige, le zéro se déplace comme dans ceux qui sont vides. Aujourd'hui, on explique le déplacement du zéro par un travail moléculaire que subit le verre du réservoir lorsque, porté à la température d'ébullition du mercure, il se refroidit rapidement. D'où résulte une espèce de trempe qui augmente le volume du réservoir, et c'est parce que celui-ci revient peu à peu à son volume primitif, que le zéro se trouve relevé. Ce travail est du reste extrêmement lent; car, d'après les expériences de Despretz, le zéro remonte pendant plusieurs années.

Outre le déplacement lent dont on vient de parler, on observe des variations brusques dans la position du zéro, toutes les fois que le thermomètre a été porté à une température élevée. En effet, si on le plonge alors dans la glace fondante, le mercure ne descend pas au zéro, et n'y revient qu'au bout d'un certain temps.

Il importe donc, lorsqu'il s'agit de mesurer une température avec précision, de vérifier d'abord la position du zéro dans le thermomètre dont on veut faire usage.

285. Limites de l'emploi du thermomètre à mercure. — Le mercure entre en ébullition à 350 degrés et se congèle à -39 . Ce sont donc là deux limites qu'on ne peut dépasser dans l'emploi du thermomètre à mercure. Mais l'expérience ayant appris que la dilatation du mercure n'est *régulière*, c'est-à-dire proportionnelle à l'intensité de la chaleur, que de -36 à 100 degrés, et qu'au delà son coefficient de dilatation va en croissant depuis 100 jusqu'à 350 degrés, il s'ensuit que le thermomètre à mercure ne donne des indications précises que de -36 à 100 degrés; pour les températures plus élevées, ses indications ne sont qu'approchées, l'erreur pouvant s'élever à plusieurs degrés.

Du reste, souvent deux thermomètres à mercure, d'accord à zéro et à 100 degrés, ne le sont plus entre ces deux points, quoique

placés dans les mêmes conditions. Cela résulte de ce que tous les verres, n'ayant pas la même composition chimique, ne sont pas également dilatables. Par suite, la dilatation qu'on observe dans le thermomètre étant *apparente* (310), c'est-à-dire l'excès de la dilatation absolue du mercure sur celle du verre, toutes les fois que deux thermomètres ne sont pas formés d'un verre identique, il y a là une cause d'erreur, qui fait qu'ils ne marchent pas ensemble, ce qu'on exprime en disant qu'ils ne sont pas *comparables*.

Ces différentes remarques et celles faites dans le paragraphe précédent montrent combien la détermination des températures présente de chances d'erreur, et les soins qu'elle exige.

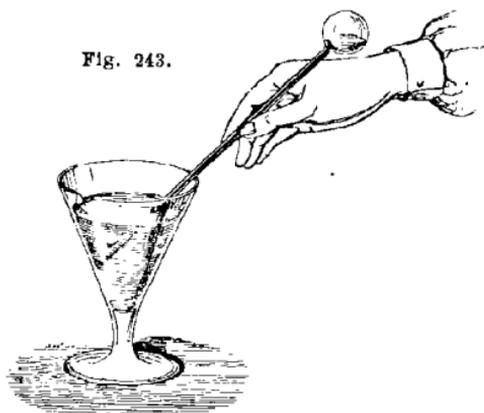
286. Conditions de sensibilité. — On peut considérer la sensibilité d'un thermomètre sous deux points de vue. En effet, un thermomètre est *sensible* : 1° lorsqu'il accuse de très-petites variations de température ; 2° quand il se met promptement en équilibre de température avec les corps ambiants.

On obtient le premier genre de sensibilité en donnant au thermomètre une tige très-capillaire soudée à un réservoir un peu gros. La marche du mercure dans la tige est alors limitée à un petit nombre de degrés, par exemple de 10 à 20, ou de 20 à 30 ; et chaque degré occupe une grande longueur sur la tige ; ce qui donne le moyen d'évaluer des fractions de degré très-petites. Sous le nom de *thermomètre métastatique*, Walferdin a construit un thermomètre qui permet d'apprécier les millièmes de degré.

Le second genre de sensibilité se réalise en donnant au thermomètre un très-petit réservoir ; car moins celui-ci a de masse, plus il prend rapidement la température du milieu dans lequel il est.

287. Thermomètre à alcool. — Le *thermomètre à alcool* ne diffère du thermomètre à mercure que parce qu'il est rempli d'alcool coloré en rouge avec de l'orseille. Son remplissage, par suite de la température peu élevée, 79 degrés, à laquelle l'alcool entre en ébullition, est plus simple que celui du thermomètre à mercure. Après avoir chauffé légèrement le réservoir à la lampe pour faire sortir un peu d'air, on plonge l'extrémité ouverte de la tige dans l'alcool coloré en rouge ; par le refroidissement, l'air qui reste dans le réservoir se contracte, et la pression atmosphérique y fait monter une petite quantité d'alcool (fig. 243). Chauffant alors jusqu'à l'ébullition, les vapeurs d'alcool qui se dégagent entraînent tout l'air qui se trouve dans le réservoir et dans la tige. Il suffit donc, après quelques instants d'ébullition, de retourner brusquement le thermomètre et d'en plonger de nouveau l'extrémité dans l'alcool. Les vapeurs se condensant, le vide se fait à l'intérieur, et par l'effet de la pression de l'atmosphère le réservoir et la tige se

remplissent complètement. Toutefois, l'alcool qui pénètre dans le réservoir s'échauffant, l'air qui y était en dissolution se dégage, et une petite bulle gazeuse apparaît. Pour l'expulser, on fixe le tube à l'extrémité d'une petite corde, et on lui imprime un mouvement de rotation rapide, la boule à l'extérieur. Par l'effet de la force centrifuge, l'alcool, qui a le plus de masse, est refoulé vers la boule et en chasse la bulle d'air. On chauffe enfin doucement jusqu'à faire sortir la moitié ou les deux tiers du liquide contenu



dans la tige, puis on en soude l'extrémité à la lampe, mais en ayant soin d'y laisser de l'air. Celui-ci est destiné, par sa force élastique, à retarder le point d'ébullition de l'alcool, et à s'opposer, lorsqu'on incline le tube, à ce que la colonne liquide se divise en plusieurs parties.

Il reste à graduer le thermomètre : pour cela, on prend le zéro dans la glace fondante, comme pour le thermomètre à mercure ; mais pour point supérieur de l'échelle, on ne peut prendre la température de l'eau bouillante, car l'alcool entrant en ébullition à 79 degrés, bien avant cette température, la dilatation serait très-irrégulière, et, au delà, la vapeur d'alcool acquerrait une tension qui pourrait briser le tube. C'est pourquoi la graduation se fait comparativement avec un thermomètre étalon à mercure, et en prenant seulement pour limite supérieure de l'échelle 60 ou 70 degrés. Pour cela, on chauffe lentement, dans un même bain, le thermomètre à mercure et le thermomètre à alcool, et l'on marque successivement sur ce dernier les températures données par le thermomètre à mercure. Ainsi gradué, le thermomètre à alcool est *comparable* au thermomètre à mercure, c'est-à-dire qu'il donne les mêmes températures, lorsqu'il est placé dans les mêmes conditions. Le thermomètre à alcool est surtout employé pour mesurer les très-basses températures, parce que ce liquide ne se congèle pas par les plus grands froids connus. Toutefois, à de très-basses températures, l'alcool absolu se séparant en partie de l'eau, le liquide devient sirupeux ; de plus, les différents al-

cools n'étant pas identiques, on a vu des thermomètres à alcool, exposés à un refroidissement égal, différer de plusieurs degrés. Pour obvier à ce double inconvénient, on a proposé de remplacer l'alcool par le sulfure de carbone, liquide qui ne contient point d'eau et conserve la même fluidité aux plus basses températures; mais M. J. Pierre a fait voir que les liquides qu'on doit préférer sont l'éther sulfurique et le chlorure d'éthyle.

288. **Thermomètre différentiel de Leslie.** — Leslie, physicien écossais, mort en 1832, a construit un thermomètre à air destiné

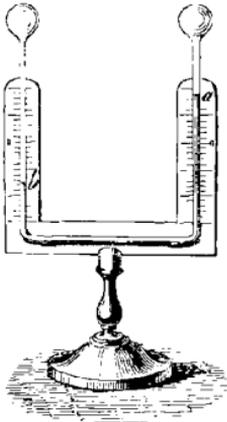


Fig. 244 ($h = 43$).

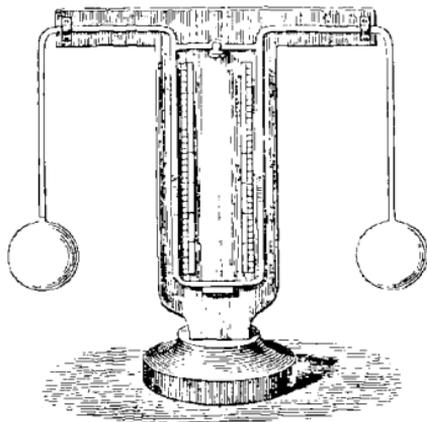


Fig. 245.

à faire connaître la différence de température de deux points voisins; de là le nom de *thermomètre différentiel*. Cet instrument se compose de deux boules de verre égales, remplies d'air et réunies par un tube recourbé, d'un petit diamètre, fixé sur une planchette (fig. 244). Avant que l'appareil soit fermé, on y introduit un liquide coloré, en quantité suffisante pour remplir la branche horizontale du tube et la moitié environ des branches verticales. Il importe de choisir un liquide qui ne donne pas de vapeur aux températures ordinaires; c'est pourquoi on fait usage d'acide sulfurique coloré en rouge. L'appareil étant ensuite fermé, on fait passer de l'air d'une boule dans l'autre, en les chauffant inégalement, jusqu'à ce qu'après quelques tâtonnements, les deux boules étant revenues à la même température, le niveau soit le même dans les branches verticales. On marque alors un zéro à chaque extrémité de la colonne liquide. Pour achever la graduation, on porte l'une des boules à zéro, et l'autre à 10 degrés. L'air de la dernière se dilate et refoule la colonne liquide *ba* qui s'élève dans l'autre branche. Lorsque cette colonne est devenue

stationnaire, on marque 10, de chaque côté, au point où s'arrête le niveau du liquide; puis on partage les intervalles de zéro à 10 en dix parties égales, et l'on continue les divisions au-dessus et au-dessous du zéro, le long de chaque branche.

La figure 245 représente la disposition que Matthiessen a donnée au thermomètre différentiel pour l'appliquer aux liquides.

289. **Thermoscope de Rumford.** — Dans le même temps que Leslie inventait le thermomètre différentiel, Rumford, Américain.

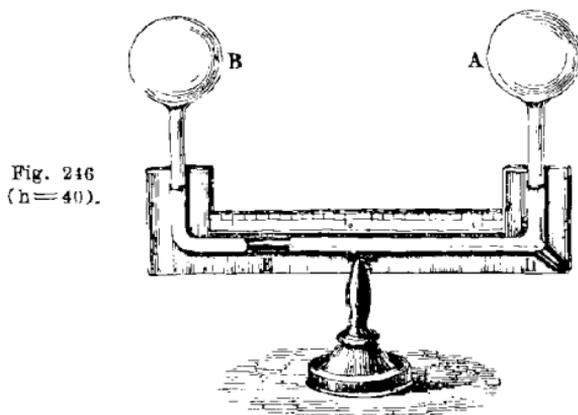


Fig. 246
(n=40).

mort à Paris, en 1814, adoptait un thermomètre analogue, qui a reçu le nom de *thermoscope de Rumford*. Cet instrument diffère peu du précédent; seulement les boules en sont plus grosses, la branche horizontale plus grande, et c'est le long de cette branche qu'est la graduation. L'index E (fig. 246) n'a que deux centimètres de longueur environ, et l'on marque encore un zéro à chaque extrémité, lorsque, les deux boules étant à la même température, l'index occupe le milieu de la branche horizontale. Le reste de la graduation se fait ensuite entièrement comme pour le thermomètre de Leslie. Un appendice D sert à régler l'appareil : lorsqu'il y a trop d'air vers l'une des boules, on fait passer l'index dans l'appendice, ce qui permet à l'air de se rendre dans l'autre boule. Il suffit ensuite d'incliner le thermomètre pour faire sortir l'index et lui faire prendre la position qu'il doit occuper; ce qu'on n'obtient toutefois qu'après quelques essais.

290. **Thermomètre métallique de Bréguet.** — Abraham Bréguet, horloger à Paris, mort en 1823, a imaginé un thermomètre fondé sur l'inégale dilatabilité des métaux, remarquable par sa grande sensibilité. Cet instrument est formé de trois lames superposées, de platine, d'or et d'argent. Soudées ensemble dans toute

leur longueur, elles sont ensuite passées au laminoir de manière à ne former qu'un ruban métallique très-mince. On contourne ce ruban en hélice, puis, ayant fixé l'extrémité supérieure à un support, on suspend à l'autre extrémité une aiguille légère de cuivre, libre de se mouvoir sur un cadran horizontal sur lequel est graduée une échelle centigrade (fig. 247).

L'argent, qui est le plus dilatable des trois métaux, forme la face intérieure de l'hélice; le platine, qui est le moins dilatable, est à l'extérieur, et l'or est entre les deux. Lorsque la température s'élève, l'argent se dilate plus que le platine et l'or, l'hélice se déroule; l'effet contraire a lieu quand la température baisse. L'or est placé entre les deux autres métaux, parce qu'il a une dilatation intermédiaire entre celles de l'argent et du platine. En n'employant que ces deux derniers métaux, leur différence de dilatation pourrait occasionner une rupture. Ce thermomètre se gradue comparativement à un thermomètre étalon à mercure.

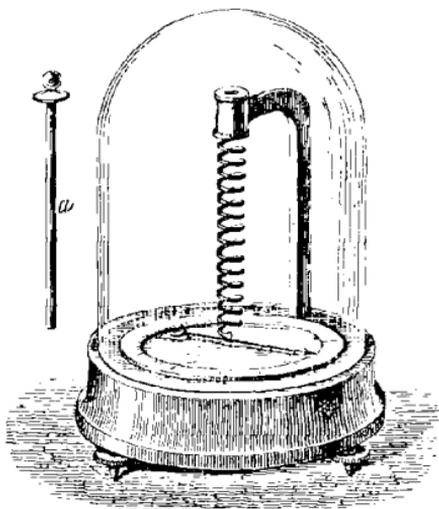


Fig. 247 (h = 10).

Une tige métallique *a*, représentée sur la gauche de la figure, se met dans l'axe de l'hélice, pour la soutenir et l'empêcher de se déformer lorsqu'on déplace l'instrument.

291. **Thermomètre à maxima et à minima de Rutherford.** — Dans les observations météorologiques, il est nécessaire de connaître la plus haute température du jour et la plus basse température de la nuit. Les thermomètres ordinaires ne pourraient conduire à la connaissance de ces températures que par une observation continue, ce qui serait tout à fait impraticable. Aussi a-t-on imaginé, à cet effet, un assez grand nombre d'instruments. Le plus simple est celui de Rutherford. Sur une glace sont fixés deux thermomètres dont les tiges sont recourbées horizontalement. Dans le premier, qui est à mercure, est un petit cylindre de fer A (fig. 248), qui peut glisser librement dans le tube. Ce cylindre, qui sert d'index, étant mis en contact avec l'extrémité de la co-

lonne de mercure, et l'instrument étant disposé horizontalement, lorsque la température s'élève, le mercure se dilate et pousse devant lui l'index. Celui-ci s'arrête aussitôt que le mercure cesse de se dilater; mais il demeure au même point de la tige lorsque le mercure se contracte, parce qu'il n'y a pas adhérence entre ce liquide et le fer. Le point où s'arrête l'index marque donc la plus

Fig. 248.

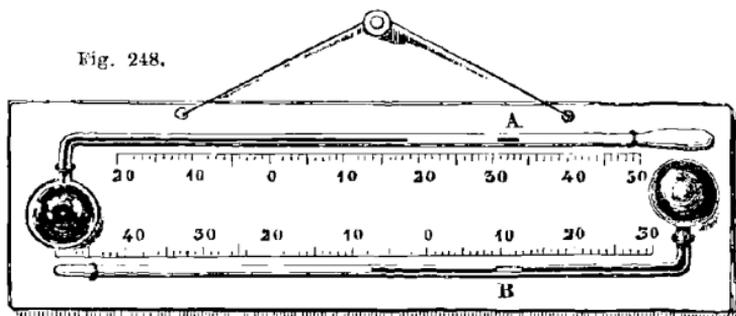


Fig. 249.

haute température qui s'est produite; sur le dessin, l'index marque un peu plus de 30 degrés.

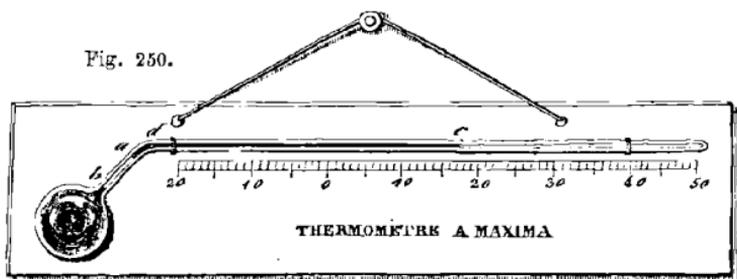
Dans le thermomètre à minima, le liquide est de l'alcool dans lequel plonge entièrement un petit cylindre d'émail B destiné à servir d'index (fig. 249). Si la température baisse tandis que le cylindre est à l'extrémité de la colonne liquide, celle-ci, en se contractant, l'entraîne avec elle par un effet d'adhésion, et l'index avance ainsi jusqu'au point où a lieu le maximum de contraction du liquide. Quand la température s'élève, l'alcool se dilate et passe entre la paroi du tube et l'index, sans que celui-ci se déplace. Par conséquent, l'extrémité de l'index opposée au réservoir indique la plus basse température à laquelle a été porté l'instrument : — $9^{\circ}\frac{1}{2}$ dans le dessin ci-dessus.

* 292. **Thermomètre à maxima de Negretti et Zambra.** — Le thermomètre à maxima de Rutherford présente l'inconvénient de n'être pas portatif, car si on le meut trop brusquement, le petit index de fer s'engage dans le mercure, et alors, quand ce liquide se dilate, il ne chasse plus devant lui l'index, mais passe dans l'intervalle qui existe entre celui-ci et le verre. L'index reste alors immobile, et le thermomètre ne fonctionne plus.

Pour obvier à cet inconvénient, Negretti et Zambra ont modifié cet instrument. Ayant introduit dans le tube du thermomètre un petit index de verre *ad* (fig. 250), ils chauffent à la lampe et courbent le tube, là même où est l'index, de manière que celui-ci soit

fixe, mais cependant n'obstrue pas le tube et ne s'oppose pas à la dilatation du mercure qui est dans le réservoir.

Le thermomètre étant placé horizontalement, lorsque la température s'élève, le mercure du réservoir se dilate, passe entre l'index et les parois du tube, et avance, par exemple, jusqu'en *c*; mais lorsqu'il y a ensuite abaissement de température, et contraction du



mercure, la résistance que celui-ci éprouve pour repasser entre l'index et le tube l'emportant sur la cohésion des molécules de mercure entre elles, la colonne *dc* reste en place, et le vide se fait de *a* en *b*. On a donc en *c* la température maxima à laquelle l'instrument a été porté. Pour ramener ensuite le mercure au-dessous de l'index, il n'y a qu'à tenir un instant le tube dans une position verticale, le mercure passe en vertu de son poids.

Quant à l'erreur qui peut résulter du refroidissement de la colonne de mercure *cd*, au moment où on consulte le thermomètre, elle peut être négligée; car en appliquant les formules sur les dilatations (306 et 312), on trouve que, pour un refroidissement de 25 degrés, cette erreur ne peut dépasser 1 dixième de degré.

* 293. **Thermomètre à maxima de Walferdin.** — Ce thermomètre, qui est à déversement, a la forme d'un thermomètre à mercure ordinaire. Seulement, à la partie supérieure, il est terminé par un petit réservoir ou *panse*, où pénètre la tige, qui se termine en pointe effilée et ouverte (fig. 251). Dans cette panse est du mercure destiné à *amorcer* l'instrument, c'est-à-dire à remplir la tige complètement à chaque observation. Pour cela, on chauffe le réservoir inférieur jusqu'à ce que le mercure, se dilatant, commence à sortir par la pointe effilée qui termine la tige. Retournant alors l'instrument, le mercure qui est dans la panse descend vers la pointe, et celle-ci se trouve y plonger en entier. On laisse ensuite le thermomètre se refroidir lentement, en ayant soin de le tenir toujours renversé. Par le refroidissement, le mercure du réservoir se contractant, une certaine quantité passe,

par un effet de cohésion, de la panse dans la tige, et celle-ci se trouve complètement remplie.

Pour faire usage de cet instrument, on commence par l'amorcer à une température inférieure à celle qu'il s'agit d'observer, puis on le place dans le lieu dont on veut connaître le maximum de température. S'il vient d'abord à se refroidir, il n'y a aucun inconvénient, puisqu'il n'entre ni ne sort de mercure. Mais si la température s'élève, le mercure se dilate, une partie se déverse dans la panse sans pouvoir rentrer dans le thermomètre, parce qu'alors celui-ci est dans la position représentée dans la figure ci-contre. Pour déterminer ensuite la plus haute température à laquelle l'instrument a été porté, il suffit de le comparer à un thermomètre étalon, en les chauffant tous les deux graduellement dans un bain, jusqu'à ce que le mercure, dans le thermomètre à déversement, remonte au sommet de la tige et soit prêt à en sortir. Consultant alors le thermomètre étalon, la température qu'il indique est très-approximativement la plus haute à laquelle a été porté le thermomètre à maxima.



Fig. 251
(h = 26).

Walferdin a aussi construit un thermomètre à minima; il est encore à déversement, mais à deux liquides et d'un usage moins facile que le précédent. Ces thermomètres sont surtout utilisés pour prendre les plus hautes ou les plus basses températures du fond des lacs, des mers ou des puits. Toutefois il faut alors les renfermer dans un tube de verre qu'on soude ensuite à la lampe, afin de les soustraire à la pression extérieure, qui diminuerait le volume du réservoir et en ferait sortir un excès de mercure.

294. **Pyromètres.** — On nomme *pyromètres* des instruments propres à mesurer les hautes températures. On donne quelquefois le nom de pyromètre à l'appareil de la figure 233; mais de la manière dont il est construit, ce n'est réellement qu'un *pyroscope*.

Brongniart, à Sèvres, avait fait construire, pour la fabrique de porcelaine, un pyromètre qui avait du rapport avec l'appareil de la figure 233. Abandonné à Sèvres, même du vivant de son auteur, cet instrument ne peut donner d'indications précises.

On a longtemps décrit, dans les traités de physique, le pyromètre de Wedgwood, fondé sur la propriété qu'a l'argile de se contracter lorsqu'elle est portée à une température élevée. Mais cet instrument manque de précision, et n'est pas comparable.

Les seuls pyromètres qui présentent de la précision sont le *pyromètre à air* (326) et le *pyromètre électrique* (812).

295. **Thermomètre électrique.** — Les différents thermomètres décrits jusqu'ici sont fondés sur la dilatation des corps; mais la chaleur donne naissance à des phénomènes électriques à l'aide desquels on peut aussi déterminer les températures. Nous allons décrire, sous le nom de *thermo-multiplicateur*, un instrument de ce genre extrêmement sensible. Toutefois, comme sa théorie repose sur des phénomènes magnétiques et sur des phénomènes électriques qui ne sont pas encore connus du lecteur, il nous faut donner ici quelques notions sur le magnétisme et l'électricité, mais très-succinctes, ces matières devant être traitées plus loin avec les développements qu'elles comportent.

NOTIONS SUR LES AIMANTS ET SUR LES PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

296. **Aimant et aiguille aimantée.** — On nomme *aimant* un oxyde de fer qui, à distance, attire le fer et quelques autres sub-



Fig. 252.

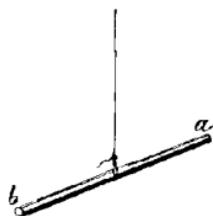


Fig. 253.

stances. Cette propriété pouvant, par friction contre un aimant, être communiquée à l'acier trempé, on appelle *aiguille aimantée* un petit barreau d'acier trempé auquel on a communiqué la vertu magnétique, et qui, en son milieu, repose sur un pivot (fig. 252), ou est suspendu à un fil de cocon (fig. 253).

Ainsi libre de s'orienter vers tel ou tel point de l'horizon, l'aiguille aimantée subit, de la part du globe terrestre, une action directrice, en vertu de laquelle elle se place toujours d'elle-même sensiblement dans la direction du nord au sud, et y revient toutes les fois qu'on l'en écarte. L'extrémité qui se tourne vers le nord est toujours la même, on la nomme *pôle austral*; celle qui regarde le sud est le *pôle boréal*. Dans l'étude du magnétisme, nous dirons d'où viennent ces dénominations, qui paraissent en opposition avec l'orientation des pôles.

On construit aussi des *électro-aimants*, qui sont beaucoup plus puissants que les aimants naturels. Ils consistent en barreaux de fer doux autour desquels s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie. Tant qu'un courant électrique (297) passe dans le fil, le barreau est fortement aimanté, mais revient à l'état naturel aussitôt que le courant est interrompu.

297. **Piles et courants thermo-électriques.** — On verra plus tard que l'électricité est un agent puissant, qui se développe dans les corps par le frottement, par les actions chimiques et aussi par l'influence de la chaleur. Les appareils qui dégagent de l'électricité par les actions chimiques sont connus sous le nom de *piles hydro-électriques*, et ceux qui en produisent par l'effet de la chaleur, sous le nom de *piles thermo-électriques*.

On ignore ce que c'est que l'électricité; mais, en général, on admet qu'elle consiste en un fluide spécial, qui existe dans tous les corps; mis en liberté par une des trois causes énoncées ci-dessus, ce fluide se propage, probablement sous la forme d'ondes, de *flux*, avec une vitesse qui, dans certains corps qu'on appelle *bons conducteurs*, s'élève à 160 000 kilomètres par seconde. Dans les corps *mauvais conducteurs*, la propagation est beaucoup plus lente et même nulle. Les meilleurs conducteurs sont les métaux.

On nomme *courant* le flux électrique qui se propage dans un corps conducteur. Lorsqu'on réunit les deux extrémités d'une pile par un fil métallique, un courant se propage dans ce fil, et l'on nomme *pôle positif* de la pile l'extrémité d'où part le courant; l'autre extrémité est le *pôle négatif*.

Les courants engendrés par la chaleur sont dits *courants thermo-électriques*. Leur intensité est faible comparativement à celle des courants hydro-électriques. Pour qu'un courant thermo-électrique se produise, il faut un circuit métallique composé de métaux différents, dont les points de contact soient, de deux en deux, à des températures inégales. C'est la non-homogénéité du circuit métallique dans lequel la chaleur se propage qui donne naissance à un courant. Les métaux qui fournissent ainsi le plus grand dégagement d'électricité sont le bismuth et l'antimoine.

La pile thermo-électrique la plus simple se compose d'un barreau de bismuth B soudé en C à un barreau d'antimoine A (fig. 254). Les deux extrémités libres étant réunies par un fil de cuivre, on a un circuit complet dans lequel il ne se propage aucun courant tant que les diverses parties en sont à la même température; mais si l'on chauffe la soudure C, un courant prend aussitôt naissance, allant, dans le fil, de l'antimoine vers le bismuth; c'est-à-dire qu'à l'antimoine correspond le pôle positif, et au bismuth le pôle

négatif. Si, au lieu de chauffer la soudure C, on la refroidit, il y a encore courant, mais de sens contraire. Dans les deux cas, le courant est d'autant plus intense, que l'échauffement ou le refroidissement est plus considérable.

Le système d'un barreau de bismuth et d'un barreau d'antimoine soudés ensemble forme un *couple* thermo-électrique. Un

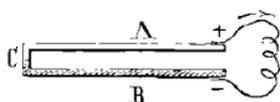


Fig. 254.

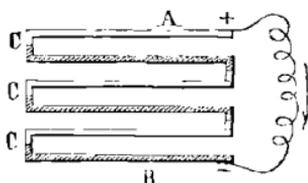


Fig. 255.

seul couple ne fournit qu'un courant très-faible ; mais si l'on soude entre eux plusieurs couples à la suite les uns des autres, de manière que toutes les soudures de rang impair soient à une même extrémité, et les soudures de rang pair à l'autre, on a, sous un petit volume, une pile d'autant plus intense, que les couples sont plus nombreux (fig. 255). On réduit encore le volume de la pile en disposant parallèlement, les unes à côté des autres (fig. 256),

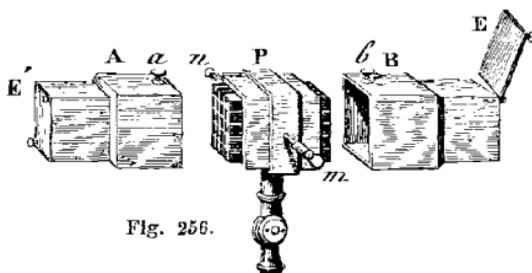


Fig. 256.

plusieurs séries de couples semblables à celle de la figure 255 ; le dernier bismuth de la première série se soude latéralement au premier antimoine de la deuxième, et ainsi de suite, au nombre de cinq ou six séries, de manière à former un ensemble de 25 ou 30 couples, dont les barreaux ont environ 30 millimètres de longueur. La pile ainsi disposée est maintenue dans une monture de cuivre P supportée par un pied à charnière, ce qui permet de lui donner différentes inclinaisons. Les couples sont isolés les uns des autres et de la monture par des bandes de papier verni. Enfin, sur les côtés de l'appareil sont fixées deux bornes *m*, *n*, qui communiquent, l'une avec le premier antimoine, l'autre avec le dernier bismuth : ce sont les deux pôles de la pile. Pour protéger les deux

faces de celle-ci, deux étuis rectangulaires A et B se fixent par des vis de pression *a* et *b* sur la pièce P. Enfin, deux écrans E et E', qu'on élève ou qu'on abaisse à volonté, permettent de ne laisser arriver la chaleur que sur une des faces de la pile.

298. **Action directrice des courants sur les aimants.** — Lorsqu'un courant parcourt un fil métallique *mn* placé près d'une aiguille aimantée *ab* (fig. 257), le courant agit à distance sur l'aiguille pour lui imprimer les déviations suivantes.

Si le courant passe au-dessus de l'aiguille, du sud au nord

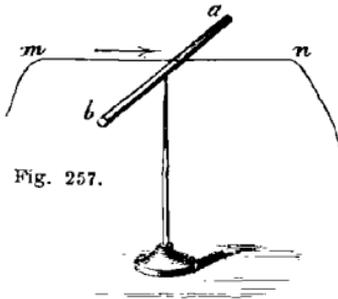


Fig. 257.

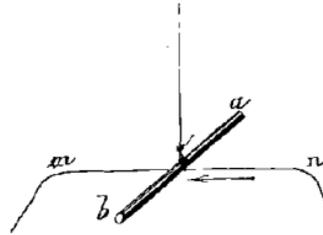


Fig. 258.

(fig. 257), ou au-dessous, du nord au sud (fig. 258), dans les deux cas, le pôle austral de l'aiguille, c'est-à-dire celui qui regarde le nord, *dévie vers l'ouest*.

Si le courant se dirige en sens contraire, c'est-à-dire du nord au sud dans le premier cas, et du sud au nord dans le second, le pôle austral *dévie vers l'est*.

Dans tous les cas, le courant tend à placer l'aiguille perpendiculairement à la direction du fil qu'il parcourt; mais cette perpendicularité n'est jamais atteinte, à cause de l'influence de la terre, qui agit pour maintenir l'aiguille dans sa position première. Toutefois, si l'on combine deux aiguilles d'égale force, l'une au-dessus, l'autre au-dessous du courant, les pôles contraires en regard, l'action de la terre se trouvant équilibrée, le système des deux aiguilles se met rigoureusement en croix avec le courant. Ce système constitue ce qu'on appelle une *aiguille astatique* (671).

299. **Galvanomètre.** — On vient de voir qu'un courant qui passe au-dessus de l'aiguille aimantée, du sud au nord, fait dévier le pôle austral vers l'ouest, et qu'un courant qui passe au-dessous, du nord au sud, produit la même déviation; par suite, si le même fil qui va au-dessus de l'aiguille, du sud au nord, revient au-dessous, du nord au sud (fig. 259), les deux effets s'ajoutent, et la déviation est plus grande. Par la même raison, si l'on continue d'enrouler le fil autour de l'aiguille, dans le sens de sa longueur,

un grand nombre de fois (fig. 260), 200 fois par exemple, on multiplie considérablement l'action du courant, et on a un instrument dans lequel l'aiguille dévie pour les courants les plus faibles : c'est le *multiplificateur* ou *galvanomètre*. Il est nécessaire que le fil qui s'enroule autour de l'aiguille soit recouvert de soie qui en isole les circuits ; sinon, ceux-ci se touchant, il n'y aurait qu'un circuit unique, et l'effet ne serait pas *multiplié*. Pour préserver l'appareil des agitations de l'air, on le recouvre d'une cage de verre en dehors de laquelle sont deux bornes de cuivre, aux-

Fig. 259.

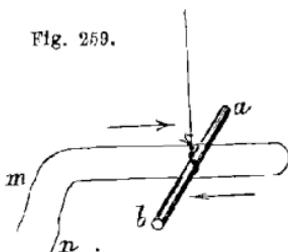
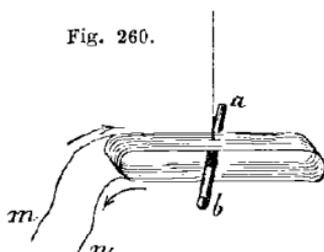


Fig. 260.



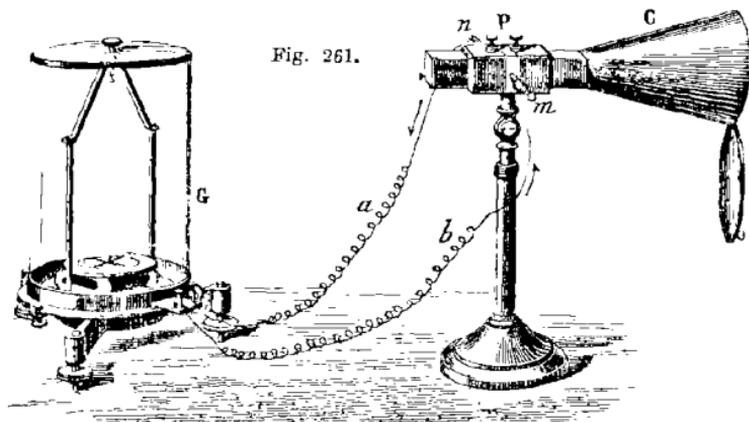
quelles aboutissent les bouts du fil galvanométrique (fig. 261). Au-dessus du circuit, on fixe un disque de cuivre gradué jusqu'à 90 degrés, à droite et à gauche du diamètre parallèle à l'enroulement du fil, et destiné à mesurer les déviations de l'aiguille ; enfin, celle-ci est astatique et suspendue à un fil de cocon, un barreau dans le circuit, l'autre au-dessus.

300. **Thermo-multiplificateur.** — Le *thermo-multiplificateur* est un appareil thermométrique extrêmement sensible qui consiste dans la réunion du galvanomètre avec la pile thermo-électrique (fig. 261). Des pôles *m* et *n* de la pile partent deux fils de cuivre, qui se rendent à deux bornes fixées en dehors de la cage du galvanomètre, lesquelles sont en contact chacune avec un des bouts du circuit galvanométrique. Par suite, dès qu'un courant thermo-électrique prend naissance dans la pile, il se rend au galvanomètre par un des fils *a* ou *b*, et revient par l'autre. Avant de faire passer le courant dans le circuit galvanométrique, on a soin d'orienter l'appareil de manière que les fils du circuit soient parallèles à la direction de l'aiguille. C'est ensuite la déviation du pôle austral à l'ouest ou à l'est qui fait connaître la direction du courant, et s'il y a eu échauffement ou refroidissement (298).

Quant à la quantité de chaleur reçue ou perdue par la pile, on la mesure par le nombre de degrés dont l'aiguille s'est écartée, dans un sens ou dans l'autre, de sa position première. En effet, l'expérience a appris que, jusqu'à 20 degrés du galvanomètre, les déviations de l'aiguille sont proportionnelles à la quantité de cha-

leur qui tombe sur la pile. Pour des déviations plus grandes, nous dirons, en traitant spécialement du galvanomètre, comment on construit des tables qui donnent l'intensité de la chaleur correspondante aux différents angles d'écart de l'aiguille.

Afin d'arrêter les rayons calorifiques autres que ceux qu'on veut



étudier, on place, sur la face de la pile exposée à la source de chaleur ou de froid, un cône de cuivre C noirci à l'intérieur. Un écran circulaire, qu'on abaisse ou qu'on élève à volonté, sert à laisser passer ou à intercepter la chaleur.

Pour faciliter l'étude du rayonnement (448) et du pouvoir diathermane des corps (439), Melloni, physicien italien, mort en 1849, a ajouté à l'instrument que nous venons de décrire plusieurs pièces accessoires, et l'a disposé comme le montrent les figures 337 et 348 ci-après. C'est sous cette forme que l'appareil prend le nom de *thermo-multiplicateur de Melloni*.

Enfin, remarquons, en terminant, que le thermo-multiplicateur est un véritable thermomètre différentiel (288); car il ne donne point la température des soudures qui reçoivent les rayons calorifiques, mais la différence entre leur température et celle des autres soudures.

CHAPITRE II

DILATATION DES SOLIDES

301. **Dilatation linéaire et dilatation cubique, coefficient de dilatation.** — On a déjà vu (273) qu'on distingue, dans les corps solides, deux sortes de dilatations : la *dilatation linéaire*, c'est-

à-dire suivant une seule dimension, et la *dilatation cubique*, c'est-à-dire en volume.

On nomme *coefficient de dilatation linéaire* l'allongement que prend l'unité de longueur d'un corps, lorsque sa température s'élève de zéro à 1 degré, et *coefficient de dilatation cubique* l'accroissement que prend, dans le même cas, l'unité de volume.

Ces coefficients varient d'un corps à l'autre; mais, pour un même corps, il existe entre eux cette relation simple, que *le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire*. On peut donc, en multipliant ou en divisant par 3, trouver l'un de ces coefficients lorsque l'autre est connu.

Pour démontrer que le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire, soit un cube dont le côté égale 1 à zéro. Si l'on représente par k l'allongement que prend ce côté en passant de zéro à 1 degré, sa longueur à 1 degré sera $1+k$, et le volume du cube, qui était 1 à zéro, sera actuellement $(1+k)^3$, c'est-à-dire $1+3k+3k^2+k^3$. Or l'allongement k étant toujours une fraction très-petite (page 268), son carré k^2 et son cube k^3 sont des fractions assez petites pour ne pas influencer sur la dernière décimale des nombres qui représentent les coefficients de dilatation cubique. On peut donc négliger les termes en k^2 et en k^3 , et le volume à 1 degré devient très-approximativement $1+3k$. L'accroissement de l'unité de volume est donc $3k$, c'est-à-dire triple du coefficient de dilatation linéaire.

On démontrerait de même que le coefficient de dilatation superficielle est double du coefficient de dilatation linéaire.

302. Mesure des coefficients de dilatation linéaire, méthode de Lavoisier et Laplace. — De nombreux expérimentateurs se sont occupés de mesurer les coefficients de dilatation linéaire, et ont imaginé divers appareils à cet usage. Nous décrirons d'abord celui dont se servirent Lavoisier et Laplace, en 1782.

Représenté en perspective dans la figure 262, et en coupe dans la figure 263, il se compose d'une cuve de cuivre placée sur un fourneau entre quatre piliers de pierre. Dans la cuve est la substance dont on cherche le coefficient de dilatation, réduite en barre de deux mètres de long. D'un bout, la barre appuie contre une lame de verre v , maintenue entre les deux piliers qui occupent la gauche du dessin; de l'autre, elle peut s'allonger librement, étant seulement en contact avec une deuxième lame de verre v , fixée à un axe horizontal d'acier, qui tourne dans deux coussinets sur les piliers à droite. A son extrémité antérieure, cet axe est terminé par une pièce en équerre sur laquelle est maintenue une lunette L, qui suit tous les mouvements de l'axe et de la lame v . En O, sont deux barres de fer qui supportent, à leur partie inférieure, un rouleau de verre sur lequel repose d'un bout la barre qui est dans la cuve; à l'autre bout, en t , est un pareil mode de suspension, en sorte que la barre ne rencontre

à son allongement qu'une résistance extrêmement faible. Enfin, dans la lunette est un fil micrométrique horizontal qui, lorsqu'elle tourne d'un certain angle, parcourt un nombre de divisions correspondant sur une échelle verticale AB placée à 200 mètres de distance.

Ces détails connus, on mettait d'abord de la glace dans la cuve,

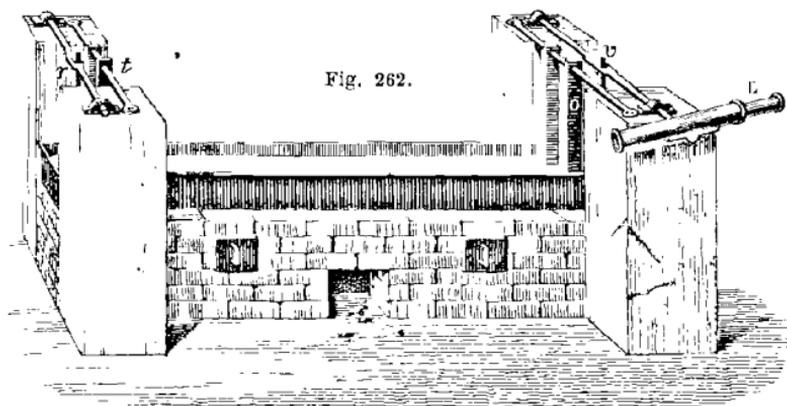
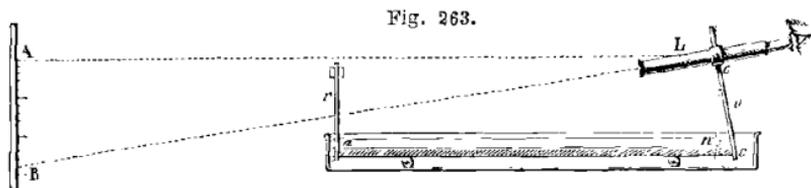


Fig. 262.

et la barre étant à zéro, les deux lames v et r en contact avec elle, et la lunette dans une direction horizontale, on observait à quelle division correspondait le fil de la lunette sur l'échelle AB; puis on retirait la glace, on remplissait la cuve d'eau ou d'huile, et on chauffait. La barre se dilatait, et lorsque la température était devenue stationnaire, d'un côté on notait la température du bain à l'aide de thermomètres qui y étaient plongés, et de l'autre à quelle division de l'échelle correspondait le fil micrométrique de la lunette.

De ces données, on déduit ensuite l'allongement de la barre. En effet, celle-ci s'étant allongée d'une quantité nc , la règle v est repoussée, et entraînant avec elle l'axe et la lunette, celle-ci est inclinée dans la direction oB . Or les deux triangles onc et oAB sont semblables comme ayant les côtés perpendiculaires chacun à chacun, ce qui donne $\frac{nc}{AB} = \frac{on}{oA}$. De même, si l'on représente par nc' un autre allongement, et par AB' la déviation correspondante, on a $\frac{nc'}{AB'} = \frac{on}{oA}$. Donc le rapport de l'allongement de la barre à la déviation de la lunette est constant, puisqu'il est toujours égal à $\frac{on}{oA}$. Or, par une expérience préliminaire

faite avec une seconde barre plus longue que la première d'une quantité connue, on avait constaté que ce rapport était $\frac{1}{744}$. On avait donc $\frac{nc}{AB} = \frac{1}{744}$, d'où $nc = \frac{AB}{744}$; c'est-à-dire que l'allongement total de la barre s'obtenait en divisant par 744 la distance parcourue sur l'échelle par le fil micrométrique de la lunette. Une fois cet allongement connu, en le divisant par la longueur de la barre à zéro et par la température du bain, on avait la dilatation



pour une seule unité de longueur et pour un seul degré, c'est-à-dire le coefficient de dilatation linéaire.

303. **Méthode de Roy et Ramsden.** — Le major Roy, à Londres, en 1787, a mesuré les coefficients de dilatation linéaire avec l'appareil suivant, construit par Ramsden, et consistant en trois cuves parallèles, de deux mètres de long (fig. 264). Dans celle du milieu est, en forme de barre prismatique, le corps dont on cherche le coefficient de dilatation; dans les deux autres sont des barres de fonte exactement de même longueur que la première. Aux extrémités de ces trois barres sont adaptées des tiges verticales. Dans les cuves A et B, ces tiges portent de petits disques percés de trous circulaires sur lesquels sont tendus en croix des fils micrométriques, comme des réticules de lunette (578); mais, dans la cuve C, les tiges portent des tubes renfermant un objectif et un oculaire de microscope, munis aussi de réticules.

Les cuves étant remplies de glace, et les trois barres à zéro, les points de croisement des fils sur les disques et dans les tubes sont exactement en ligne droite à chaque extrémité. On retire alors la glace de la cuve centrale seule, et l'on y verse de l'eau qu'on porte à 100 degrés, au moyen de lampes à alcool placées au-dessous de la cuve. La barre qui y est contenue se dilate; mais comme elle bute contre une pièce fixe en B, tout l'allongement se fait dans le sens mn . Le réticule m reste donc en ligne, tandis que le réticule n avance vers la gauche. Pour qu'on puisse le ramener dans son premier alignement, sa tige n'est point fixée à la barre, mais se déplace, dans le sens de la longueur, à l'aide d'une vis de rappel

α à laquelle elle est liée. En tournant lentement la vis de gauche à droite, on fait avancer la tige jusqu'à ce que le réticule n se retrouve de nouveau en ligne. Or, à cet instant, la vis a avancé d'une longueur précisément égale à l'allongement de la barre, et comme la longueur dont la vis a avancé se déduit avec une grande

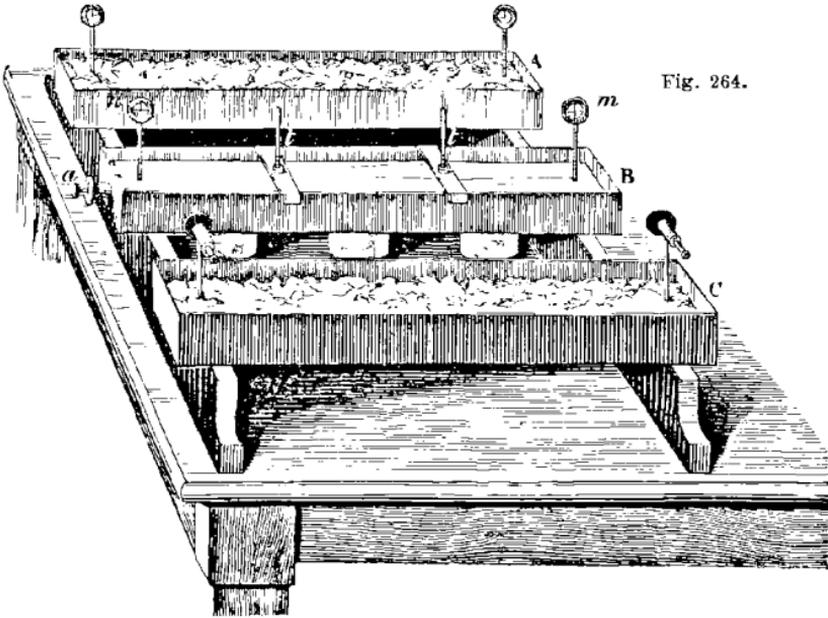


Fig. 264.

précision du nombre de tours qu'elle a faits et de son *pas*, on a ainsi la dilatation totale de la barre, d'où l'on déduit ensuite son coefficient de dilatation en divisant par la température du bain et par la longueur de la barre à zéro.

Ce coefficient est le *coefficient moyen* de dilatation entre les deux températures extrêmes auxquelles la barre a été portée.

Coefficients moyens de dilatation linéaire, entre zéro et 100 degrés, des corps les plus employés dans les arts.

Verre blanc	0,000008613	Cuivre rouge	0,000017182
Platine	0,000008842	Bronze	0,000018167
Acier non trempé	0,000010788	Cuivre jaune (laiton)	0,000018782
Fonte	0,000011250	Argent de coupelle	0,000019097
Fer doux forgé	0,000012204	Étain	0,000021730
Acier trempé	0,000012395	Plomb	0,000028575
Or de départ	0,000014660	Zinc	0,000029417

Quant à la détermination des coefficients de dilatation cubique, d'après la relation qu'on a vue exister entre eux et les coefficients

de dilatation linéaire (301), ils se déduisent immédiatement des nombres ci-dessus en les multipliant par 3. Cependant, en traitant ci-après du *thermomètre à poids*, nous ferons connaître une méthode suivie par Dulong et Petit pour déterminer directement les coefficients de dilatation cubique (316).

304. **Les coefficients de dilatation augmentent avec la température.** — L'expérience montre que les coefficients de dilatation linéaire des métaux sont sensiblement constants entre zéro et 100 degrés; c'est-à-dire que, pour un même nombre de degrés, on peut admettre sans erreur sensible que la longueur augmente constamment de la même fraction de ce qu'elle était à zéro. Mais, d'après les recherches de Dulong et Petit, le coefficient devient plus grand entre 100 et 200 degrés, et croît encore entre 200 et 300 degrés, et ainsi de suite jusqu'au point de fusion. L'acier trempé fait exception : son coefficient décroît lorsque la température dépasse une certaine limite.

305. **Formules relatives aux dilatations des solides.** — Soient l la longueur d'une barre à zéro, l' sa longueur à la température t , et k son coefficient de dilatation linéaire. La relation qui existe entre ces diverses quantités s'exprime par les formules suivantes.

Pour l'unité de longueur, l'allongement correspondant à 1 degré étant k , celui qui correspond à t degrés est t fois k ou kt ; d'où il est t fois kt , ou ktl pour l unités. La longueur de la barre, qui était l à zéro, est donc $l + ktl$ à t degrés, d'où $l' = l + ktl$ [1].

En mettant l en facteur commun dans le second membre, on tire de cette formule

$$l' = l(1 + kt) [2].$$

La formule [2] sert à trouver la longueur l' à t° , lorsqu'on connaît la longueur l à zéro. En divisant les deux membres par $(1 + kt)$, on en déduit

$$l = \frac{l'}{1 + kt} [3].$$

Cette dernière formule sert à trouver la longueur à zéro, lorsqu'on connaît la longueur l' à t .

Enfin, si dans l'égalité [1] on transpose l dans le premier membre, et si l'on divise des deux côtés par tl , on a $k = \frac{l' - l}{tl}$ [4], équation qui sert à calculer le coefficient de dilatation k quand l' , l et t sont connus.

Si, au lieu de considérer les dilatations linéaires, on considère les dilatations cubiques, on trouve des formules analogues à celles qui précèdent. Pour cela, soient V le volume d'un corps à zéro, V' son volume à t degrés, et D son coefficient de dilatation cubique, lequel, comme on sait (301), est triple de k ; on trouve, par le même raisonnement que ci-dessus,

$$V' = V(1 + Dt) [5], \text{ et } V = \frac{V'}{1 + Dt} [6],$$

formules qui servent à passer du volume à zéro au volume à t degrés, et réciproquement. En remplaçant D par $3k$, on peut aussi les écrire sous la forme

$$V' = V(1 + 3kt) [7], \text{ et } V = \frac{V'}{1 + 3kt} [8].$$

Les binômes $1+kt$ et $1+Dt$ se désignent sous les noms, l'un de *binôme de dilatation linéaire*, l'autre de *binôme de dilatation cubique*. Les formules [2] et [5] font voir que les longueurs et les volumes à t degrés sont directement proportionnels aux binômes de dilatation.

306. **Problèmes sur les dilatations.** — I. Une barre de fer a $2^m,6$ de long à zéro; quelle sera sa longueur à 80 degrés, le coefficient de dilatation du fer étant 0,0000122?

Ce problème se résout par la formule [2] ci-dessus, en y faisant

$$l = 2^m,6, \quad t = 80, \quad k = 0,0000122.$$

Ce qui donne $l' = 2^m,6(1 + 0,0000122 \times 80) = 2^m,6025$.

C'est-à-dire que la longueur cherchée est $2^m,6025$, ce qui fait 2 millimètres et demi d'allongement.

II. A 90 degrés, une barre de cuivre a $3^m,4$ de long; quelle sera sa longueur à zéro, le coefficient de dilatation du cuivre étant 0,0000172?

Il faut ici faire usage de la formule [3] du paragraphe précédent, en y faisant $l' = 3^m,4, t = 90, k = 0,0000172$; d'où l'on déduit

$$l = \frac{3,4}{1 + 0,0000172 \times 90} = \frac{3,4}{1,001548} = 3^m,395.$$

III. Une barre métallique a une longueur l' à t degrés, quelle sera sa longueur L à t' degrés, son coefficient de dilatation étant k ?

Ce problème se résout en cherchant la longueur de la barre à zéro, laquelle est $\frac{l'}{1+kt}$, d'après la formule [3] (305); puis de la longueur à zéro on passe à la longueur à t' au moyen de la formule [2], c'est-à-dire en multipliant par

$$1 + kt', \quad \text{ce qui donne enfin } L = \frac{l'(1+kt')}{1+kt}.$$

IV. A la température de t degrés on mesure une longueur donnée avec une règle métallique divisée en millimètres, et l'on trouve que cette longueur contient n divisions de la règle. Celle-ci ayant été divisée à la température de zéro, on demande la correction à faire pour tenir compte de sa dilatation de zéro à t degrés.

Pour cela, remarquons que c'est seulement à zéro que les divisions de la règle valent 1 millimètre; à t degrés, chacune d'elles vaut $1+kt$, k étant le coefficient de dilatation de la règle. Donc, les n divisions obtenues représentent, non pas n millimètres, mais $n(1+kt)$. Tel est donc le nombre réel de millimètres correspondant à la longueur qu'on a mesurée.

V. La densité d'un corps étant d à zéro, calculer sa densité d' à t degrés.

Si l'on représente par v le volume du corps à zéro, et par D son coefficient de dilatation cubique, le volume à t degrés sera $1+Dt$; et comme la densité d'un corps est en raison inverse du volume qu'il prend en se dilatant, on a

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{1+Dt}, \quad \text{d'où } d' = \frac{d}{1+Dt}.$$

Donc, lorsqu'un corps s'échauffe de zéro à t degrés, sa densité et par suite son poids, à volume égal, varient en raison inverse du binôme de dilatation $1+Dt$.

VI. Le volume d'un ballon de verre est V' à t degrés; quel sera son volume V à zéro?

Pour résoudre cette question, on admet qu'un ballon de verre se dilate, pour une variation de température déterminée, de la même quantité que se dilaterait une masse de verre pleine, de même volume. Si l'on représente alors par δ le coefficient de dilatation cubique du verre, et par V le volume du ballon à zéro, on aura, d'après la formule [5] (305),

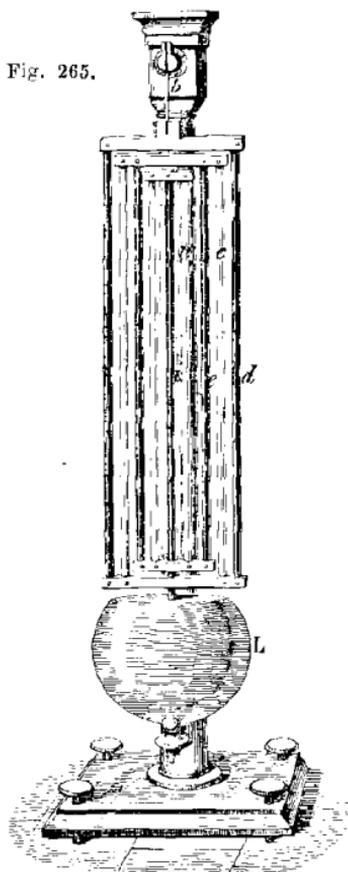
$$V' = V + \delta Vt = V(1 + \delta t); \quad \text{d'où } V = \frac{V'}{1 + \delta t}.$$

307. **Applications de la dilatation des solides.** — La dilatation des solides offre de nombreuses applications dans les arts. Les grilles des fourneaux, par exemple, ne doivent pas être encastées trop juste à leurs extrémités, mais libres au moins à l'une, sinon elles descendent les pierres du foyer en se dilatant. Sur les chemins de fer, si les rails se touchaient, la force de dilatation les courberait de distance en distance, ou briserait leurs coussinets. Lorsqu'on chauffe ou refroidit trop brusquement un vase de verre, il éclate; cela est dû à ce que, le verre étant mauvais conducteur de la chaleur, les parois s'échauffent inégalement, et par suite se dilatent de même, ce qui amène la rupture.

308. **Pendule compensateur.** — L'inégale dilatation des métaux a reçu une importante application dans le *pendule compensateur*. On nomme ainsi un pendule dans lequel l'allongement de la tige, lorsque la température s'élève, est compensé de manière que la distance entre le centre de suspension et le centre d'oscillation demeure constante (65); ce qui est nécessaire, d'après les lois du pendule (64, 3^e), pour que l'isochronisme persiste et pour que le pendule puisse servir de régulateur aux horloges (67). De nombreux systèmes ont été proposés pour compenser les pendules. Le suivant, dû à Leroy, est généralement adopté.

Dans ce système, la lentille L (fig. 265), au lieu d'être soutenue par une seule tige, l'est par une suite de châssis dont les verges verticales sont alternativement d'acier et de laiton. Dans le dessin ci-dessus, les tiges d'acier sont représentées plus colorées : elles sont au nombre de cinq, plus une lame d'acier b, qui porte tout le pendule et se courbe à chaque oscillation; les autres, au nombre de quatre, sont de cuivre jaune. La tige r,

Fig. 265.



qui porte la lentille L , est fixée, à sa partie supérieure, à une traverse horizontale; mais, à sa partie inférieure, elle est libre, passant dans deux trous cylindriques pratiqués dans les traverses inférieures.

De la manière dont les tiges verticales sont liées entre elles par des traverses horizontales, l'allongement des tiges d'acier ne peut s'effectuer que de haut en bas, et, au contraire, celui des tiges de cuivre, de bas en haut. Par conséquent, pour que la longueur du pendule reste constante, il faut que l'allongement des tiges de cuivre relève constamment la lentille juste de la même quantité dont l'allongement des tiges d'acier tend à l'abaisser.

Pour arriver à cette condition de compensation, remarquons que toutes les tiges d'acier ne s'ajoutent pas pour l'abaissement de la lentille, mais seulement la lame b et les tiges d , e , i . Pour celles-ci, en effet, les allongements s'ajoutent; tandis que les deux tiges d'acier, sur la gauche de la figure, étant liées respectivement aux tiges d et e par des traverses, leurs allongements sont parallèles à ceux de ces tiges sans s'ajouter pour l'abaissement de la lentille. La même remarque s'appliquant aux tiges de laiton, on n'a à considérer que les tiges c et n .

Cela posé, représentant par a , a' , a'' , a''' les longueurs des pièces d'acier b , d , e , i , et par c et c' celles des tiges de laiton c , n , posons $a + a' + a'' + a''' = l$, et $c + c' = l'$; ce qui veut dire que l est la longueur réelle d'acier utilisée pour la descente de la lentille, et l' la longueur de laiton utilisée pour son ascension. Par suite, si l'on représente par L la longueur du pendule, c'est-à-dire la distance du point de suspension au centre d'oscillation (65), on a $L = l - l'$ [1].

Or, K et K' étant les coefficients de dilatation linéaire de l'acier et du cuivre jaune, les allongements des deux métaux, à t degrés, sont respectivement Kt et $K't$. Pour que la longueur L reste constante, il faut donc qu'on ait $Kt = K't$, ou $K = K'$ [2].

De cette dernière égalité on tire que, dans le pendule compensateur, les longueurs de l'acier et du cuivre sont en raison inverse des coefficients de dilatation de ces métaux. De plus, cette égalité ne contenant pas t , on en conclut que la compensation a lieu à toutes les températures.

Les pendules des horloges étant ordinairement astreints à battre la seconde, L est connue et égale à $0^m,993866$ (65). Les équations [1] et [2] ci-dessus font donc

connaître l et l' . En les résolvant, on trouve $l = \frac{L}{1 - \frac{K}{K'}}$, et $l' = \frac{L}{\frac{K}{K'} - 1}$.

Ces formules font voir que l et l' sont plus grands que L ; c'est pour satisfaire à cette condition qu'on est forcé, pour le pendule à seconde, de faire usage de plusieurs châssis d'acier et de laiton.

309. Lames compensatrices. — On arrive encore à compenser l'allongement de la tige des pendules au moyen de *lames compensatrices*. On nomme ainsi deux lames de cuivre et de fer soudées ensemble et fixées à la tige du pendule (fig. 266). La lame de cuivre, qui est plus dilatable, est au-dessous de la lame de fer. Lorsque la température baisse, la tige du pendule se raccourcit et la lentille se relève; mais alors les lames compensatrices se recourbent (fig. 267), ce qui est dû à ce que le cuivre se contracte plus

que le fer. De la sorte, deux boules métalliques placées à l'extrémité des lames s'abaissent, et, si elles ont une masse convenable, il s'établit une compensation entre les points qui se rapprochent du centre de suspension et ceux qui s'en écartent, ce qui fait que

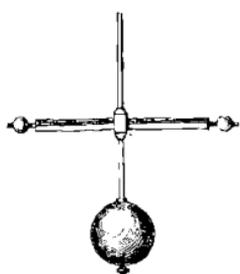


Fig. 266.

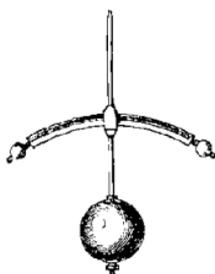


Fig. 267.

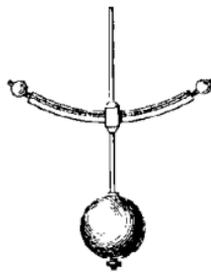


Fig. 268.

le centre d'oscillation n'est pas déplacé. Si la température s'élève, la lentille descend, mais les boules remontent (fig. 268), et il y a encore compensation.

CHAPITRE III

DILATATION DES LIQUIDES

310. **Dilatation apparente et dilatation absolue, travail pendant la dilatation.** — Dans les liquides, il n'y a lieu de considérer que des dilatations cubiques, qu'on divise en *dilatation absolue* et en *dilatation apparente*. Cette dernière est l'accroissement de volume que prend un liquide dans une enveloppe qui se dilate moins que lui. Telle est, dans les thermomètres, la dilatation du mercure et de l'alcool. La dilatation absolue est l'augmentation réelle de volume, abstraction faite de toute dilatation de l'enveloppe.

La dilatation apparente est plus petite que la dilatation absolue de toute celle de l'enveloppe. On rend sensible l'influence de la dilatation de celle-ci en plongeant dans l'eau chaude un thermomètre à gros réservoir, rempli, jusqu'à la moitié de sa tige, d'alcool coloré (fig. 269). Au moment où le réservoir entre dans l'eau, l'alcool baisse dans le tube de *b* en *a*, ce qui provient évidemment de la dilatation des parois; mais si le réservoir continue à plonger, l'alcool s'échauffe et monte d'une quantité égale à sa dilatation absolue, diminuée de celle de l'enveloppe.

De même que pour les solides, on nomme *coefficient de dila-*

tation d'un liquide l'accroissement que prend l'unité de volume lorsque la température s'élève de zéro à 1 degré; mais on distingue alors le *coefficient de dilatation apparente* et le *coefficient de dilatation absolue*. Plusieurs procédés ont été employés pour déterminer ces deux coefficients. Nous donnerons celui dont ont fait usage Dulong et Petit.

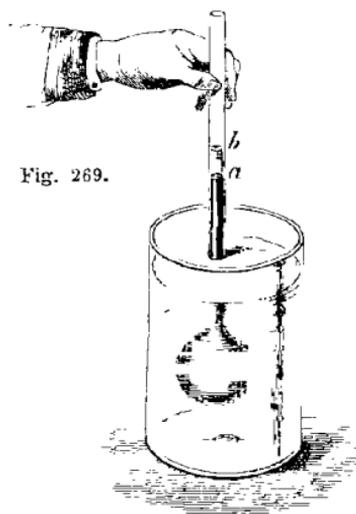


Fig. 269.

La force de cohésion entre les molécules des liquides étant très-faible, le travail intérieur de dilatation y est beaucoup moindre que dans les solides. Au contraire, le travail extérieur y est bien plus considérable; car, pour un même accroissement de température, les liquides se dilatent beaucoup plus que les solides.

311. Coefficient de dilatation absolue du mercure. — Pour déterminer le coefficient de dilatation absolue du mercure, il fallait éviter l'influence de la dilatation de l'enveloppe; c'est à quoi sont arrivés Dulong et Petit en s'appuyant sur ce principe d'hydrostatique que, dans deux vases communicants, les hauteurs de deux liquides qui se font équilibre sont en raison inverse de leurs densités (91), principe qui est indépendant du diamètre des vases, et, par conséquent, de leur dilatation.

L'appareil des deux physiciens se composait de deux tubes de verre A et B (fig. 270) réunis par un tube capillaire, et maintenus verticalement sur un support de fer KM, qu'on disposait horizontalement à l'aide de vis calantes et de deux niveaux à bulle d'air *m* et *n*. Les deux tubes étaient enveloppés chacun d'un manchon métallique dont le plus petit, D, était rempli de glace pilée, et l'autre, E, d'huile qu'on chauffait graduellement au moyen d'un fourneau que la figure représente ouvert pour laisser voir le manchon. Enfin les tubes A et B étaient remplis de mercure qui se mettait de niveau quand ils étaient à la même température, mais qui s'élevait dans le tube B à mesure qu'on chauffait.

Cela posé, soit à zéro, dans le tube A, *h* la hauteur du mercure au-dessus de l'axe du tube horizontal, et *d* sa densité, et soient *h'* et *d'* les mêmes quantités pour le tube B à la température *t*. D'après le principe hydrostatique rappelé ci-dessus, on a $h'd' = hd$. Or $d' = \frac{d}{1 + \Delta t}$ (306, prob. v), Δ étant le coefficient de dilatation absolue du mercure; remplaçant *d'* par sa valeur dans l'égalité ci-dessus, on trouve $\frac{h'd}{1 + \Delta t} = hd$; d'où l'on déduit $\Delta = \frac{h' - h}{ht}$.

Cette dernière formule fait trouver le coefficient de dilatation absolue du mercure, lorsqu'on a mesuré les hauteurs *h* et *h'* de ce liquide dans les deux tubes, ainsi que la température *t* du bain où plonge le tube B. Dans l'expérience de Dulong et Petit, cette température était mesurée par un thermomètre à poids P (313), dont le mercure se déversait dans une capsule C, et par un thermomètre à

air T. Celui-ci consiste en un long réservoir T rempli d'air sec, et terminé par un tube capillaire qui va plonger dans une cuvette R pleine de mercure. A mesure que la température du bain d'huile s'élève, l'air se dilate dans ce thermomètre et s'échappe par le tube. Puis, quand on cesse de chauffer, l'air se contractant,

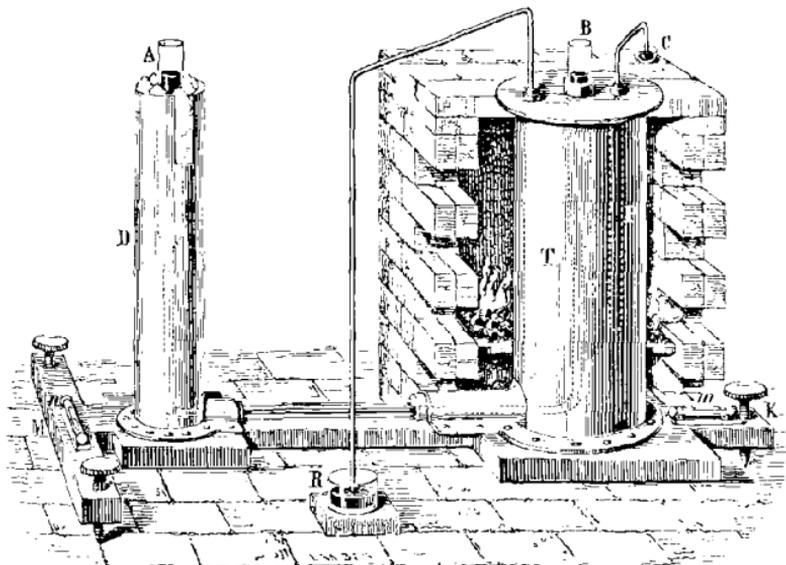


Fig. 270.

le mercure de la cuvette est refoulé dans le réservoir, et si l'on refroidit celui-ci jusqu'à zéro dans la glace, le poids du mercure qui y pénètre fait connaître le volume d'air sorti; d'où l'on déduit ensuite la température à laquelle a été porté le thermomètre, à l'aide de la formule $V' = V(1 + \alpha t)$ (321). Quant aux hauteurs h et h' , elles se mesuraient au moyen du cathétomètre.

Par ce procédé, Dulong et Petit ont trouvé que le coefficient de dilatation absolue du mercure entre zéro et 100 degrés est $\frac{1}{5550}$. Mais ils ont observé que ce coefficient croît avec la température. Entre 100 et 200 degrés, le coefficient moyen est $\frac{1}{5425}$; entre 200 et 300 degrés, il égale $\frac{1}{5300}$. Le même phénomène se remarque pour les autres liquides, ce qui fait voir que ces corps ne se dilatent pas régulièrement. On a constaté que leur dilatation est d'autant plus irrégulière, qu'ils sont plus près de leur température de congélation ou d'ébullition. Quant au mercure, Dulong et Petit ont constaté que, de -36 à 100 degrés, sa dilatation est très-sensiblement régulière.

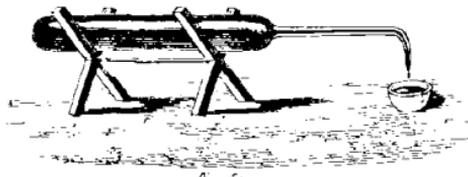
312. Coefficient de dilatation apparente du mercure. — Le coefficient de dilatation apparente d'un liquide varie avec la nature de l'enveloppe. Celui du mercure, dans le verre, a été déterminé par Dulong et Petit, au moyen d'un réservoir cylindrique de verre auquel est soudé un tube capillaire recourbé à angle droit et ouvert à son extrémité (fig. 271).

Pour faire l'expérience, on pèse l'instrument vide, puis rempli de mercure à

zéro; la différence des deux pesées donne le poids P du mercure contenu dans l'appareil. Le portant ensuite à une température connue t , le mercure se dilate, et il en sort une certaine quantité qu'on recueille dans une petite capsule et qu'on pèse. Si l'on représente par p le poids du mercure sorti, celui du mercure resté dans l'appareil l'est par $P - p$.

Lorsque l'instrument revient à zéro, le mercure se refroidissant, il se produit dans le réservoir un vide qui représente la contraction que subit le mercure $P - p$ lorsqu'il se refroidit de t à zéro; ou, ce qui est évidemment la même chose, sa dilatation de zéro à t ; c'est-à-dire que le poids p représente la dilatation pour t degrés du poids $P - p$. Or, si le poids $P - p$, pris à zéro, se dilate, dans le verre, d'une quantité p jusqu'à t degrés, une seule unité de poids se dilate, dans les mêmes conditions, de $\frac{p}{P - p}$ pour t degrés, et de $\frac{p}{(P - p)t}$ pour un seul degré; donc $\frac{p}{(P - p)t}$ représente le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre. Donc, Δ' étant ce coefficient, on a $\Delta' = \frac{p}{(P - p)t}$.

Fig. 271.



Dulong et Petit ont ainsi trouvé que le coefficient de dilatation apparente du mercure, dans le verre, est $\frac{1}{6480}$.

313. **Thermomètre à poids.** — L'appareil représenté dans la figure 271 a reçu le nom de *thermomètre à poids*, parce que du poids du mercure sorti on peut déduire la température à laquelle l'instrument a été porté. En effet, l'expérience ci-dessus ayant conduit à la formule $\frac{p}{(P - p)t} = \frac{1}{6480}$, on en tire

$$p \times 6480 = (P - p)t, \text{ d'où } t = \frac{p \times 6480}{(P - p)},$$

formule d'où l'on déduit t , lorsque P et p sont connus.

314. **Coefficient de dilatation du verre.** — La dilatation absolue d'un liquide étant égale à sa dilatation apparente, augmentée de la dilatation de l'enveloppe, on a obtenu le coefficient de dilatation cubique du verre en prenant la différence entre le coefficient de la dilatation absolue du mercure et celui de sa dilatation apparente, c'est-à-dire que le coefficient de dilatation cubique du verre égale $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480} = \frac{1}{38671} = 0,00002585$.

M. Regnault a constaté que le coefficient de dilatation varie avec les différentes espèces de verre, et, en outre, suivant la forme des enveloppes. Pour le verre ordinaire des tubes de chimie, ce savant a trouvé que le coefficient est 0,0000254.

315. **Coefficient de dilatation des divers liquides.** — Le coefficient de dilatation apparente des liquides peut se déterminer par le procédé du thermomètre à poids (312). Pour avoir ensuite le coefficient de dilatation absolue, on augmente le coefficient de dilatation apparente du coefficient du verre, ce qui déconle de la relation qui existe entre les trois coefficients (314).

Dilatations apparentes de quelques liquides, de zéro à 100 degrés, d'après Dalton.

Mercure	0,01543	Essence de térébenthine	0,07 .
Eau distillée	0,0466 .	Éther sulfurique	0,07 .
Eau saturée de sel marin	0,05 . . .	Huiles fixes	0,08 .
Acide sulfurique	0,06 . . .	Alcool	0,116
Acide chlorhydrique	0,06 . . .	Acide azotique	0,11 .

Ces nombres représentant la dilatation totale de zéro à 100 degrés, il faudrait les diviser par 100 pour obtenir la dilatation pour un seul degré, ou le coefficient de dilatation; mais les résultats ainsi obtenus ne représenteraient pas le coefficient de dilatation moyen des liquides, parce que, ces corps se dilatant très-irrégulièrement, leur coefficient va toujours croissant à partir de zéro; il y a exception pour le mercure, dont la dilatation, comme on l'a vu ci-dessus, est régulière de - 36 à 100 degrés.

316. **Application du thermomètre à poids à la mesure des dilatations cubiques.** — Dulong et Petit ont appliqué la méthode du thermomètre à poids à la recherche des coefficients de dilatation cubique. Pour cela, ils prenaient un

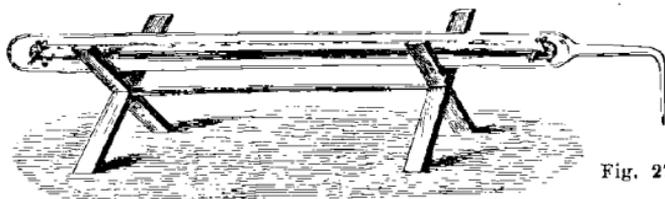


Fig. 272.

tube de verre un peu gros, et y introduisaient, en forme de prisme allongé, la substance dont ils cherchaient le coefficient, après en avoir déterminé le poids et la densité, et par suite le volume. Puis ils étiraient l'extrémité du tube à la lampe et la recourbaient de manière à lui donner la forme d'un thermomètre à poids (fig. 272). Ils rempissaient ensuite de mercure l'espace resté libre dans le tube, et déterminaient le poids de ce liquide qui y était contenu à zéro. Cela fait, expérimentant comme avec le thermomètre à poids, on portait l'appareil à une température connue t ; le mercure et le corps contenus dans le tube se dilatant alors plus que le verre, il sortait un poids p de mercure qu'on pesait, et il ne restait plus qu'à exprimer, par une équation facile à trouver, que le volume du mercure sorti égalait la dilatation du corps, plus celle du mercure, moins celle du verre. Comme les dilatations du mercure et du verre étaient connues, on en déduisait celle du corps contenu dans le tube.

317. **Correction de la hauteur barométrique.** — On a déjà indiqué, à l'article *Baromètre* (150), que pour que les indications de cet instrument soient comparables entre elles, en différents lieux et à différentes saisons, il importe de ramener toujours la colonne de mercure à une température constante, qui est celle de la glace fondante. Cette correction se fait par le calcul suivant.

La hauteur du baromètre étant H à t degrés, soit h sa hauteur à zéro. Si l'on représente par d la densité du mercure à zéro, et par d' sa densité à t degrés, on sait (144) que les hauteurs H et h sont en raison inverse des densités d et d' , c'est-à-dire qu'on a $\frac{h}{H} = \frac{d'}{d}$ [1]. Mais si l'on représente par v le volume du mercure à zéro, son volume à t degrés le sera par $1 + Dt$, D étant le coefficient de dilatation absolue du mercure. Or on a vu (306, prob. v) que le rapport des volumes v et $1 + Dt$ est égal au rapport inverse des densités d et d' , c'est-à-dire qu'on a $\frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + Dt}$ [2]. Cela posé, des égalités [1] et [2] on tire $\frac{h}{H} = \frac{1}{1 + Dt}$,

d'où $h = \frac{H}{1 + Dt}$. En remplaçant D par sa valeur $\frac{1}{5550}$, on a

$$h = \frac{H}{1 + \frac{t}{5550}} = \frac{H \times 5550}{5550 + t} \quad [3].$$

Dans ce calcul on doit prendre le coefficient de dilatation absolue du mercure, et non le coefficient de dilatation apparente, parce que la valeur de H est la même que si le verre ne se dilatait pas, la hauteur du baromètre étant indépendante du diamètre du tube (84), et, par conséquent, de sa dilatation.

Comme application de la formule ci-dessus, soit proposé, la température étant de 25 degrés et la hauteur du baromètre de 0^m,75, de calculer la hauteur à zéro.

$$\text{On a } h = \frac{0^m,75 \times 5550}{5550 + 25} = \frac{4162,5}{5575} = 0^m,746.$$

Dans la formule [3] ci-dessus, on a négligé la dilatation de l'échelle du baromètre. Pour faire cette correction on a vu (306, prob. iv) qu'il faut multiplier le nombre n de divisions observé sur l'échelle par le binôme de dilatation $(1 + kt)$. Donc la vraie hauteur du baromètre ramené à zéro est

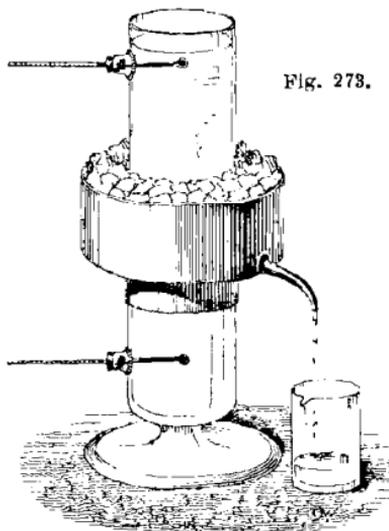
$$h = \frac{H(1 + kt)}{1 + Dt}, \text{ ou } h = \frac{H \times 5550(1 + kt)}{5550 + t},$$

k étant le coefficient de dilatation linéaire de l'échelle.

318. Maximum de densité de l'eau. — L'eau offre ce phénomène

remarquable que, lorsque sa température s'abaisse, elle ne se contracte que jusqu'à 4 degrés; au-dessous de ce point, quoique le refroidissement continue, non-seulement la contraction cesse, mais le liquide se dilate jusqu'au point de congélation, qui a lieu à zéro; en sorte qu'à 4 degrés l'eau éprouve un maximum de contraction.

Pour le vérifier expérimentalement, on fait usage de l'appareil suivant, dû à Hope, physicien écossais. Une éprouvette à pied est percée latéralement de deux trous, l'un à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure, dans lesquels sont fixés



deux thermomètres (fig. 273); un manchon plein de glace, ou d'un mélange réfrigérant, entoure la partie moyenne de l'éprouvette. Or, celle-ci ayant été remplie d'eau à 10 ou 12 degrés, on remarque que, le thermomètre supérieur restant à peu près stationnaire, le thermomètre inférieur s'abaisse rapidement jusqu'à 4 degrés; puis devenant stationnaire à son tour, c'est maintenant

le thermomètre supérieur qui descend, non-seulement à 4 degrés, mais jusqu'à zéro, l'autre étant toujours à 4. On conclut de là que, tant que l'eau se refroidit jusqu'à 4 degrés, elle va en augmentant de densité, puisqu'elle se rend à la partie inférieure de l'éprouvette; mais qu'en se refroidissant davantage, elle se dilate, puisqu'elle s'élève alors vers la partie supérieure. Donc c'est à 4 degrés qu'elle atteint son maximum de densité.

Plus tard, Hallström pesa successivement, dans de l'eau à différentes températures, une boule de verre lestée avec du sable, et, en tenant compte de la dilatation du verre, il trouva que c'était dans de l'eau à 4°,1 que la boule perdait davantage de son poids; d'où, suivant lui, c'était à cette température qu'avait lieu le maximum de contraction de l'eau.

Despretz, par une autre méthode, s'est assuré que c'est exactement à 4 degrés que se produit ce phénomène. Il a fait usage d'un thermomètre à eau, c'est-à-dire contenant de l'eau au lieu de mercure. En le refroidissant graduellement dans un bain dont la température était donnée par un thermomètre à mercure, et en tenant compte de la contraction de l'enveloppe, il a trouvé que c'est à 4 degrés qu'a lieu, dans le thermomètre à eau, le maximum de contraction, et, par suite, le maximum de densité de l'eau.

Despretz a construit une table des densités de l'eau de — 9 jusqu'à 100, celle de l'eau à 4 degrés étant prise pour unité. Nous extrayons de cette table les nombres ci-après, qui suffisent dans les limites de température où l'on expérimente dans les laboratoires.

Densités de l'eau de 0 à 30 degrés, la densité à 4 degrés étant prise pour unité.

TEMPÉ- RATURES	DENSITÉS	TEMPÉ- RATURES	DENSITÉS	TEMPÉ- RATURES	DENSITÉS
0	0,999873	11	0,999640	22	0,997784
1	0,999927	12	0,999527	23	0,997566
2	0,999966	13	0,999414	24	0,997297
3	0,999999	14	0,999285	25	0,997078
4	1	15	0,999125	26	0,996800
5	0,999999	16	0,998978	27	0,996562
6	0,999969	17	0,998794	28	0,996274
7	0,999929	18	0,998612	29	0,995986
8	0,999878	19	0,998422	30	0,995688
9	0,999812	20	0,998213	50	0,988093
10	0,999731	21	0,998004	100	0,958654

Cette table fait voir que la densité de l'eau décroît très-irrégulièrement de 4 à 100 degrés, et que, par suite, il en est de même, en sens inverse, de son

coefficient de dilatation. C'est pourquoi il n'y aurait aucune rigueur, dans les calculs, à faire usage du coefficient de dilatation moyen de l'eau entre 0 et 100 degrés; et Δ étant ce coefficient, on ne peut davantage faire entrer dans les calculs le binôme $1 + \Delta t$. Mais la densité de l'eau à t degrés étant donnée par la table ci-dessus, on pourra toujours faire usage directement de la formule $P = VD$, pour calculer soit le poids à t degrés d'une masse d'eau dont le volume est connu, soit le volume, si c'est le poids qui est donné.

Par exemple, si l'on veut calculer le poids P d'un volume d'eau V à t degrés, on cherchera dans la table ci-dessus la densité d' de l'eau à t degrés, et le poids, qui serait V à 4 degrés, sera Vd' à t degrés. On a donc $P = Vd'$, V étant exprimé en décimètres cubes, et P en kilogrammes.

319. Correction des poids spécifiques des solides et des liquides. — Dans les différentes méthodes qui ont été données pour la détermination des poids spécifiques (105 à 107), on a supposé les corps solides ou liquides à la température de zéro, et l'eau à celle de 4 degrés. Or, en général, ces conditions n'étant pas satisfaites, on a plusieurs corrections à effectuer. Pour cela, considérons le cas où l'on fait usage de la balance hydrostatique, et admettons qu'on fasse la correction de pesées dans l'air (174).

Soient p le poids réel du corps dont on cherche le poids spécifique, d celui-ci à zéro, K le coefficient de dilatation cubique du corps, t la température de l'air ambiant, et par suite celle du corps et de l'eau distillée sur lesquels on expérimente.

Ayant placé le corps dans l'un des plateaux de la balance hydrostatique, et lui ayant fait équilibre par une tare, soient P les poids gradués qui font équilibre à cette tare, et P' ceux qui font équilibre à la tare quand le corps est suspendu à la balance et plongé dans l'eau.

Le volume du corps à zéro étant $\frac{p}{d}$, son volume à t degrés est $\frac{p}{d}(1 + Kt)$; en supposant les poids p , P et P' mesurés en kilogrammes ou fractions de kilogramme, si a est le poids d'un litre d'air à t degrés et à la pression barométrique pendant les pesées, la perte de poids du corps dans l'air est $\frac{p}{d}(1 + Kt)a$, et son poids apparent est $p - \frac{p}{d}(1 + Kt)a$, ou $p \left[1 - \frac{(1 + Kt)a}{d} \right]$ [A].

Or, si l'on représente par D le poids spécifique et par K' le coefficient de dilatation cubique du métal dont les poids P et P' sont formés, on trouve que le poids apparent du corps dont on cherche le poids spécifique est de même représenté par $P \left[1 - \frac{(1 + K't)a}{D} \right]$ [B].

Égalant les expressions [A] et [B], on a pour première équation

$$p \left[1 - \frac{(1 + Kt)a}{d} \right] = P \left[1 - \frac{(1 + K't)a}{D} \right] \quad [1].$$

Passant à la deuxième pesée, celle dans l'eau, on a vu ci-dessus que le volume du corps et par suite celui de l'eau déplacée est, à t degrés, $\frac{p}{d}(1 + Kt)$. Cherchant dans la table de Despretz la densité d' de l'eau à t degrés, le produit $\frac{p}{d}(1 + Kt)d'$ est le poids réel de l'eau déplacée, et son poids apparent est

$$\frac{p}{d}(1 + Kt)d' - \frac{p}{d}(1 + Kt)a, \text{ ou } \frac{p}{d}(1 + Kt)(d' - a) \quad [C].$$

Mais le poids P' de l'eau déplacée, étant diminué de sa perte de poids dans l'air, devient $P' \left[1 - \frac{(1+K't)a}{D} \right]$ [D]; formule qui représente, sous une autre forme, le poids apparent de l'eau. Égalant donc les expressions [C] et [D], on a pour deuxième équation

$$\frac{p}{a} (1+Kt)(a'-a) = P' \left[1 - \frac{(1+K't)a}{D} \right] \quad [2].$$

Divisant membre à membre l'équation [1] par l'équation [2], afin d'éliminer p , qui est inconnu, et supprimant le facteur commun $\left[1 - \frac{(1+K't)a}{D} \right]$, il vient

$$\frac{a - (1+Kt)a}{(1+Kt)(a'-a)} = \frac{P}{P'}, \quad \text{d'où} \quad a = (1+Kt) \left(\frac{P a' - (P - P') a}{P'} \right).$$

Quant à a , on verra que, pour le déterminer rigoureusement, il faut tenir compte non-seulement de la température et de la pression, mais de la vapeur d'eau contenue dans l'air (392, prob. II).

Si, au lieu de la balance hydrostatique, on faisait usage du flacon, ou des aréomètres, la marche à suivre pour les corrections serait la même.

CHAPITRE IV

DILATATION ET DENSITÉ DES GAZ

320. Méthode de Gay-Lussac pour la dilatation des gaz; sa loi.

— Les gaz sont les corps les plus dilatables, et en même temps ceux dont la dilatation présente le plus de régularité. De plus, en prenant pour coefficient de dilatation des gaz, de même que pour les solides et les liquides, l'accroissement de l'unité de volume de zéro à 1 degré, on trouve que les coefficients de dilatation des divers gaz ne diffèrent entre eux que de quantités extrêmement petites. On a même longtemps admis que tous les gaz se dilataient également pour une même variation de température.

C'est Gay-Lussac qui, le premier, posa la loi que *tous les gaz, simples ou composés, ont le même coefficient de dilatation*. Dalton, de son côté, arrivait à la même loi; mais on va voir qu'elle n'est qu'approchée.

La figure 274 représente l'appareil dont Gay-Lussac fit usage dans ses expériences. C'est un tube thermométrique AB, dont la tige est partagée en parties d'égale capacité (277). En pesant successivement le mercure contenu dans la boule A, et celui contenu dans la tige, on déterminait le nombre des divisions de celle-ci contenues dans la boule. Pour remplir d'air sec la tige et la boule, Gay-Lussac les remplissait d'abord de mercure qu'il faisait bouillir pour chasser l'humidité. Il fixait ensuite l'extrémité de la tige, au moyen d'un bouchon, à un tube plus gros C, rempli de chlorure

de calcium, substance très-avide d'eau. Tenant le système des tubes AB et C dans une direction verticale, le tube C en bas, on introduisait dans celui-ci et dans la tige un fil fin de platine. En l'agitant légèrement, ce fil entraînait des gouttelettes de mercure, lesquelles étaient remplacées par des bulles d'air qui rentraient par le tube C après s'être desséchées sur le chlorure de calcium. La boule et la tige une fois remplies d'air sec, on retirait le fil de platine, en

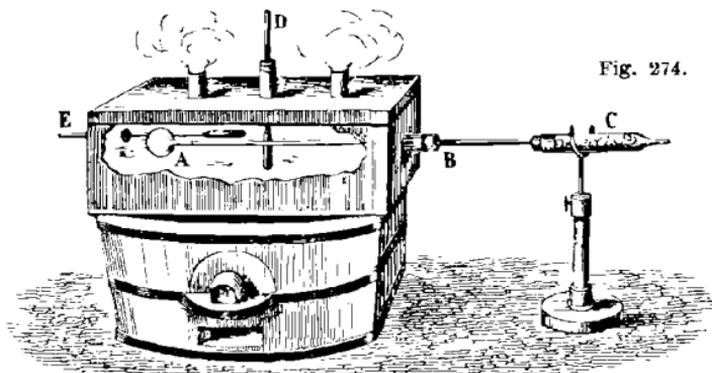


Fig. 274.

ayant soin de conserver dans la tige une petite colonne de mercure destinée à servir d'index, comme on va le voir ci-après.

On plaçait alors le tube, comme le montre la figure, dans une caisse de fer-blanc, en faisant passer la tige dans un bouchon adapté à une tubulure latérale, et en conservant le tube à chlorure de calcium pour empêcher la rentrée de l'humidité. La caisse étant d'abord remplie de glace pilée, l'air contenu dans l'appareil se contractait, et l'index de mercure avançait de B vers A. Notant la division de la tige où s'arrêtait l'index lorsqu'il devenait stationnaire, on avait le volume d'air à zéro contenu dans l'appareil. Quant à la pression du gaz, elle était celle marquée par le baromètre au moment de l'expérience. Enfin, retirant la glace et la remplaçant par de l'eau, on plaçait la caisse sur un fourneau, et l'on chauffait graduellement; des thermomètres D, E, plongés dans le bain, en donnaient la température. L'air contenu dans l'appareil s'échauffait alors lentement, l'index avançait de A vers B, et l'on avait soin, pour que tout l'air fût bien à la température du bain, d'enfoncer de plus en plus le tube dans la caisse, à mesure que l'index tendait à sortir de celle-ci. Lorsqu'on arrêtait le feu, en fermant les portes du fourneau, l'index restait stationnaire quelques instants. On notait alors la division correspondante de la tige, et l'on avait ainsi le volume qu'avait pris l'air à la température donnée par les ther-

momètres, et à la pression marquée par le baromètre dans le même moment. En admettant que la hauteur du baromètre soit restée la même pendant toute l'expérience, et en négligeant la dilatation du verre, on a le coefficient de dilatation de l'air par le calcul suivant :

Soient V le volume de l'air contenu dans l'appareil à zéro, et V' ce que devient ce volume à la température t du bain; $V' - V$ représente évidemment l'accroissement total du volume d'air V lorsqu'il s'échauffe de zéro à t degrés. L'accroissement de volume, pour un seul degré et pour une seule unité de volume, est donc

$V' - V$ divisé par t et par V , c'est-à-dire $\frac{V' - V}{V \times t}$. En représentant par α le coefficient de dilatation de l'air, on a donc $\alpha = \frac{V' - V}{Vt}$ [1].

Si la pression atmosphérique a changé, et si l'on tient compte de la dilatation du verre, il y a à faire les corrections indiquées précédemment (159 et 306, prob. vi). Pour cela, soient H la pression à zéro, et H' la pression à t degrés, pour ramener le volume V' à la pression H , il faut, d'après la loi de Mariotte,

le multiplier par $\frac{H'}{H}$, et la formule ci-dessus devient $\alpha = \frac{V' \frac{H'}{H} - V}{Vt}$ [2]. Or V'

n'est pas le volume réel du gaz à t degrés, il n'est que le volume apparent. Le volume réel est $V'(1 + \delta t)$, δ étant le coefficient de dilatation cubique du verre. Portant cette valeur dans la formule [2], il vient enfin

$$\alpha = \frac{V'(1 + \delta t) \frac{H'}{H} - V}{Vt}.$$

Par le procédé ci-dessus, Gay-Lussac avait trouvé, pour coefficient de dilatation de l'air, le nombre 0,00375. De plus, comme il a été dit ci-dessus, ses expériences l'avaient conduit à admettre que ce nombre représentait le coefficient de dilatation de tous les gaz. Mais cette loi, remarquable par sa simplicité, n'est pas absolue comme le croyait Gay-Lussac; toutefois elle est assez approchée pour qu'on puisse l'admettre dans beaucoup de cas, surtout pour des variations de température peu considérables.

Rudberg, M. Regnault et Magnus ont successivement constaté que le nombre de Gay-Lussac est trop grand, et que la vraie valeur du coefficient de dilatation de l'air est 0,003665, ou plus simplement 0,00367. Dans l'expérience de Gay-Lussac il y avait deux causes d'erreur : 1^o le gaz n'était pas complètement desséché; 2^o l'index de mercure qui se déplaçait dans le tube ne le fermant pas hermétiquement, l'air extérieur pénétrait dans l'appareil. Nous donnons ci-après (322 et 323) deux méthodes employées par M. Regnault pour déterminer les coefficients de dilatation des gaz, dans lesquelles ces causes d'erreur sont évitées.

321. Formules et problèmes sur la dilatation des gaz. — I. Le volume d'un gaz à zéro est V ; quel sera son volume à t degrés, le coefficient de dilatation étant α et la pression étant constante ?

Soit V' le volume cherché; si l'on répète ici le même raisonnement que pour la dilatation linéaire (305), on trouve

$$V' = V + \alpha Vt, \text{ ou } V' = V(1 + \alpha t) \text{ [1].}$$

II. Le volume d'un gaz est V' à t degrés, quel sera son volume V à zéro, la pression restant constante, et le coefficient de dilatation étant α ?

Cette question se résout au moyen de la formule [1] ci-dessus, de laquelle on tire, en divisant les deux membres par $1 + \alpha t$,

$$V = \frac{V'}{1 + \alpha t} \text{ [2].}$$

III. Connaissant le volume V' d'un gaz à t degrés, calculer son volume V'' à t' degrés, la pression étant la même.

Il faut d'abord réduire le volume à zéro par la formule [2], ce qui donne

$$\frac{V'}{1 + \alpha t}.$$

Puis on ramène ce dernier volume de zéro à t' degrés au moyen de la formule [1], et l'on a enfin

$$V'' = \frac{V'(1 + \alpha t')}{1 + \alpha t} \text{ [3].}$$

IV. Le volume d'un gaz, à t degrés et à la pression H , est V' ; quel sera le volume V de la même masse de gaz à zéro et à la pression $0^m,76$?

Il y a à faire ici deux corrections, l'une relative à la température, l'autre à la pression. Il est indifférent de commencer par l'une ou par l'autre. Si l'on fait d'abord la correction de température, le volume à zéro sera, d'après la formule [2],

$\frac{V'}{1 + \alpha t}$, mais encore à la pression H . On le ramène de cette pression à la pression $0^m,76$, en posant, d'après la loi de Mariotte (156),

$$V \times 0,76 = \frac{V'}{1 + \alpha t} \times H, \text{ d'où } V = \frac{V'H}{(1 + \alpha t) 0,76} \text{ [4].}$$

Comme application numérique, soit à résoudre la question suivante. Étant donnés 8 litres d'air à 25 degrés et à la pression $0^m,74$, quel sera le volume à zéro et à la pression $0^m,76$?

Si l'on fait d'abord la correction de pression, on a $\frac{x}{8} = \frac{74}{76}$;

$$\text{d'où } x = \frac{74 \times 8}{76} = 7^m,789.$$

Le volume ainsi obtenu est à la pression $0^m,76$, mais encore à 25 degrés; il reste à le ramener à zéro. Pour cela, on fait usage de la formule [2] ci-dessus, ce qui donne pour le volume cherché,

$$V = \frac{7,789}{1 + 0,00367 \times 25} = \frac{7,789}{1,0917} = 7^m,135.$$

On pourrait aussi directement faire usage de la formule [4], en remplaçant H , V' , α et t par leurs valeurs.

V. La densité ou le poids spécifique d'un gaz étant d à zéro, on demande sa densité à t degrés.

Soit d' la densité du gaz à t degrés; si l'on représente par 1 un certain volume de ce gaz à zéro, le volume à t degrés sera $1 + \alpha t$. Or les densités étant, à masse égale, en raison inverse des volumes (45), on a

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + \alpha t}, \text{ d'où } d' = \frac{d}{1 + \alpha t} \text{ [5], et } d = d'(1 + \alpha t) \text{ [6].}$$

La formule [5] fait voir que la densité à t degrés est en raison inverse du binôme de dilatation $1 + \alpha t$. Quant à la formule [6], elle sert à calculer la densité à zéro, quand on connaît la densité à t degrés.

VI. Un certain volume de gaz à t degrés pèse P' , quel sera le poids du même volume de ce gaz à zéro ?

Soient P le poids cherché, α le coefficient de dilatation du gaz, d' sa densité à t degrés, et d sa densité à zéro. Les poids étant proportionnels aux densités, on a l'égalité

$$\frac{P'}{P} = \frac{d'}{d}. \text{ Or on a vu ci-dessus (prob. v) que } \frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + \alpha t}; \text{ donc}$$

$$\frac{P'}{P} = \frac{1}{1 + \alpha t}, \text{ d'où } P = P'(1 + \alpha t).$$

De cette dernière égalité on tire aussi $P' = \frac{P}{1 + \alpha t}$, formule qui fait trouver le poids à t degrés quand on connaît le poids à zéro, et qui montre que le poids P' est en raison inverse du binôme de dilatation $1 + \alpha t$.

VII. Calculer le poids P d'azote qui serait contenu à 32°, dans un ballon de verre dont le volume, à zéro, est 12^{lit},3, le coefficient de dilatation de l'azote étant 0,003668, le coefficient de dilatation linéaire du verre 0,0000861, et le poids spécifique de l'azote 0,9714; on suppose que la pression atmosphérique égale 0^m,76.

Soient k le coefficient de dilatation linéaire du verre et V le volume du ballon à zéro, son volume à t degrés sera $V(1 + 3kt)$ (306, prob. vi). Pour trouver le poids d'azote contenu dans ce ballon, observons qu'un litre d'air à zéro et à la pression 0^m,76 pesant 1^{gr},3, un litre d'azote, à la même température et à la même pression, pèse 1^{gr},3 \times 0,9714, puisque le nombre 0,9714 est le poids spécifique de l'azote par rapport à l'air; par conséquent, à t degrés, un litre d'azote pèse $\frac{1\text{gr},3 \times 0,9714}{1 + \alpha t}$

(prob. vi), α étant le coefficient de dilatation de l'azote. Donc, enfin, le poids demandé est $\frac{1\text{gr},3 \times 0,9714}{1 + \alpha t} \times V(1 + 3kt)$. Substituant à la place de V , k , t et α leurs valeurs, on trouve $P = 13\text{gr},911$.

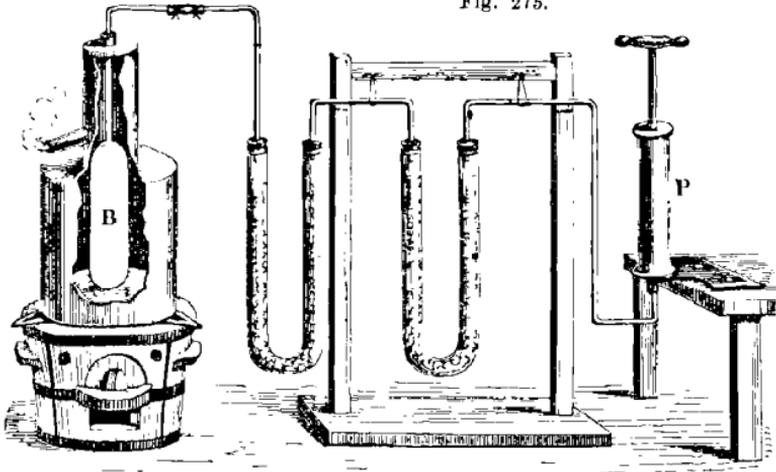
322. Méthode de M. Regnault pour la dilatation des gaz à volume et à pression variables. — M. Regnault a successivement fait usage de plusieurs procédés pour déterminer le coefficient de dilatation des gaz : la force élastique du gaz et son volume étaient variables, ou la force élastique était constante et le volume variable, ou le volume était constant et la pression variable.

Dans la première méthode, la même dont s'était servi Rudberg, mais perfectionnée par M. Regnault, l'appareil se compose d'un réservoir de verre B (fig. 275), dont on a mesuré la capacité en le pesant plein de mercure, et dont on a d'avance déterminé le coefficient de dilatation cubique (314). Un tube de verre à petit diamètre est soudé au réservoir B. Pour remplir ce réservoir d'air parfaitement sec, on le dispose, comme le montre la figure, dans un vase semblable à celui qui sert à prendre le point 100 des thermomètres; puis, au moyen d'un tuyau de caoutchouc, on raccorde le tube capillaire à une suite de tubes en U remplis de fragments de pierre ponce imbibés d'acide sulfurique concentré. Ces tubes vont aboutir à une pompe à main P (188), au moyen de laquelle on fait le vide dans les tubes et dans le réservoir, pendant que celui-ci est enveloppé de vapeur d'eau à la température de l'eau

bouillante. On laisse ensuite rentrer l'air lentement par les tubes desséchants, puis on fait le vide de nouveau, et ainsi de suite une trentaine de fois. De la sorte, on arrive à dessécher complètement le réservoir et à le remplir d'air parfaitement sec.

Cela fait, on laisse, pendant environ une demi-heure, l'air du

Fig. 275.



réservoir prendre la température de la vapeur, puis on enlève les tubes desséchants, et on ferme à la lampe l'extrémité du tube capillaire, en ayant soin de noter en même temps la hauteur H du baromètre. Le réservoir B étant refroidi, on le place dans l'appareil que représente la figure 276. On l'entoure alors complètement de glace pour amener à zéro l'air qu'il contient, et l'on plonge l'extrémité du tube dans une cuvette C remplie de mercure. Lorsque le réservoir B est à zéro, on casse avec une petite pince la pointe b ; l'air intérieur s'étant condensé, le mercure de la cuvette pénètre dans le réservoir par l'effet de la pression atmosphérique, et s'élève à une hauteur oG telle, qu'ajoutée à la force élastique de l'air dans l'appareil, elle fasse équilibre à la pression atmosphérique. Pour éviter que de l'air, passant entre le mercure et la paroi extérieure du tube, ne soit entraîné avec le mercure et ne pénètre dans le réservoir, $M.$ Regnault verse sur le mercure de la cuvette une légère couche d'acide sulfurique, et de plus il engage la pointe effilée b dans de petits disques de laiton percés à leur centre. Ces disques, étant attaqués par le mercure, en sont mouillés, et ferment ainsi le passage à l'air.

Pour mesurer la hauteur h de la colonne de mercure Go , on abaisse, au moyen d'une vis de pression m , une petite tige go ,

jusqu'à ce que la pointe *o* affleure avec la surface du mercure dans la cuvette; puis on mesure, au cathétomètre, la différence de hauteur entre la pointe *g* et le niveau du mercure en *G*. Ajoutant à cette différence la longueur de la tige *go*, qui est connue, on a la hauteur *h*. Enfin, on ferme la pointe effilée *b* au moyen d'une petite cuiller *a*, qui d'avance a été remplie de cire molle, et qu'on peut à volonté faire avancer vers la pointe *b* jusqu'à ce que celle-ci s'engage dans la cire et se bouche. A ce moment, on note la pression indiquée par le baromètre, en la représentant par *H'*, la pression, dans le réservoir *B*, l'est par *H' - h*.

Ces mesures prises, on retire le réservoir de la glace, on l'essuie et on le pèse pour obtenir le poids et par suite le volume du mercure qui s'y est introduit; ce volume connu, on en déduit celui de l'air à zéro, et le calcul suivant donne alors le coefficient de dilatation de l'air.

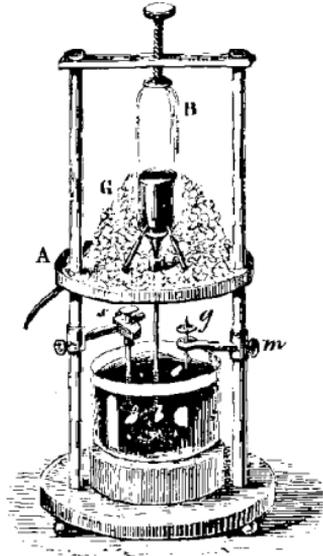


Fig. 276.

Soient, à zéro, *P* le poids du mercure qui passe dans le réservoir et dans le tube quand on casse la pointe *b*, *P'* le poids du mercure qu'ils contiennent, à zéro, lorsqu'ils sont pleins, *D* la densité du mercure, δ le coefficient de dilatation cubique du verre dont le réservoir est formé, et α le coefficient de dilatation de l'air; soient, en outre, *H'* la hauteur du baromètre au moment où l'on bouche avec de la cire la pointe *b* du tube capillaire, *H* la hauteur du baromètre quand on ferme l'appareil à la lampe, et *t* la température du réservoir *B* au même instant. La capacité de ce réservoir et du tube à zéro est $\frac{P'}{D}$, et à *t* degrés elle est $\frac{P'}{D} (1 + \delta t)$ (306, prob. vi).

Tel était donc aussi le volume d'air à *t* degrés et à la pression *H* quand on a fermé l'appareil; ramené à la pression 76, ce volume est enfin $\frac{P' (1 + \delta t) H}{D \cdot 76}$ [1]. D'un

autre côté, le volume d'air dans le réservoir refroidi à zéro est $\frac{P' - P}{D}$ à la pression *H' - h*. A la pression 76 et à *t* degrés, ce volume devient

$$\frac{(P' - P)(1 + \alpha t)(H' - h)}{D \cdot 76} [2].$$

Mais les volumes représentés par les formules [1] et [2] ne sont autre chose que le volume de l'air contenu dans le réservoir et dans le tube à *t* degrés et à la pression 76; ils sont donc égaux. Par conséquent, en supprimant le dénominateur commun, on a l'équation

$$P' (1 + \delta t) H = (P' - P) (1 + \alpha t) (H' - h) [3],$$

d'où l'on déduit la valeur de α .

323. **Méthode de M. Regnault pour la dilatation des gaz à volume constant.** — Dans cette méthode, le volume du gaz n'éprouve de variation que celle qui résulte de la dilatation du verre, mais sa pression varie avec la température. Le gaz est contenu dans un ballon de verre A de près d'un litre de capacité (fig. 277). Au col du ballon est soudé un tube à petit diamètre *b*, qui va s'engager

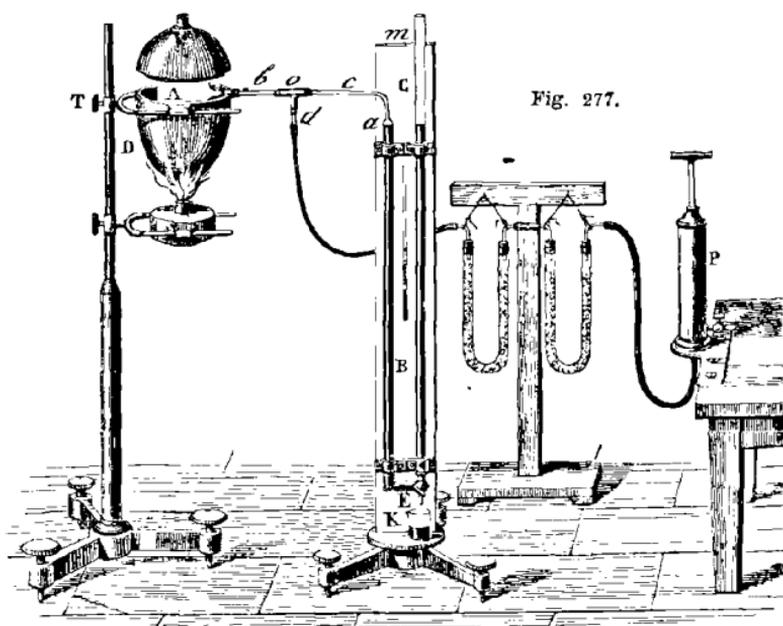


Fig. 277.

dans une tubulure métallique à trois branches *o*. Dans la seconde branche est mastiqué un tube de verre *d*, sur lequel est appliqué un tuyau de caoutchouc qui met le ballon en communication avec des tubes desséchants et avec une pompe à main P; à la troisième branche est adapté un tube de verre *c*, qui va se souder à un manomètre à air libre BC. Celui-ci est formé de deux tubes de verre, l'un C ouvert à son sommet, l'autre B en communication par les tubes *b* et *c* avec le ballon. Tous les deux sont mastiqués, à leur extrémité inférieure, dans une double tubulure de fer, munie d'un robinet à trois voies E. Les tubes B et C ayant été desséchés d'avance avec soin, on les remplit de mercure bouilli. En tournant convenablement le robinet E, on fait communiquer à volonté les tubes B et C entre eux, ou séparément avec le vase K, de manière à faire écouler dans celui-ci le mercure contenu dans le tube B.

ou celui contenu dans le tube C. En a , sur le tube B, est un trait de repère auquel on a soin de faire correspondre le niveau du mercure dans les deux tubes, soit en en versant dans le tube C, soit en en faisant écouler par le robinet E.

Le ballon A est placé dans une petite chaudière de laiton D, qu'on peut élever ou abaisser plus ou moins par une vis de pression T, et faire glisser latéralement sur deux supports horizontaux pour raccorder le tube b avec le manomètre.

L'appareil ainsi disposé, il s'agit de remplir le ballon A d'air sec. Pour cela, ayant tourné le robinet E de manière à fermer la branche B du manomètre, on porte le ballon à la température de 100 degrés en faisant bouillir, à l'aide d'une lampe à alcool, de l'eau placée dans la chaudière. Celle-ci est alors fermée par un double couvercle entre les parois duquel circule la vapeur avant de se dégager par une tubulure placée au sommet. On achève ensuite l'opération entièrement comme dans l'expérience précédente (322) ; c'est-à-dire qu'on fait le vide un grand nombre de fois à l'aide de la pompe à main P, et qu'on laisse rentrer l'air chaque fois par les tubes desséchants.

Une fois le ballon rempli d'air sec, on retire l'eau de la chaudière, on laisse refroidir celle-ci, puis on la remplit de glace pilée. Le ballon se refroidissant jusqu'à zéro, le gaz se contracte, et une nouvelle quantité d'air sec entre par les tubes desséchants. L'air du ballon étant alors à zéro, l'air contenu dans les tubes b et c à la température ambiante t , donnée par un thermomètre fixé sur l'appareil, et le mercure toujours au niveau a dans les tubes, on enlève le tube de caoutchouc, et l'on ferme à la lampe le tube d . Observant la pression H marquée alors par le baromètre, cette pression est celle de l'air qu'on vient de renfermer dans l'appareil.

Cette première partie de l'expérience terminée, on retire la glace de la chaudière, et l'on y remet de l'eau distillée qu'on porte encore à l'ébullition, en ayant soin de tourner le robinet E de façon que les tubes manométriques B et C communiquent alors entre eux. La force élastique de l'air dans l'appareil augmentant avec la température, le niveau du mercure tend à baisser dans le tube B et à monter dans le tube C; mais si, dans celui-ci, on verse graduellement du mercure, l'excès de pression qui en résulte fait équilibre à l'accroissement de la force élastique de l'air, et le niveau se maintient constant dans la branche B, au point de repère a . Lorsque le gaz cesse de se dilater, on mesure la hauteur du mercure qu'on a versé dans le tube C. En la représentant par h , et par H' la hauteur barométrique au même moment, la masse d'air qui était d'abord à la pression H, est maintenant à la pression

$H' + h$. Quant à la température T , à laquelle est le ballon, elle n'est pas donnée directement par l'appareil, mais elle est celle de la vapeur dans la chaudière. Or on verra bientôt qu'au moyen des tables des forces élastiques de la vapeur d'eau (350), on déduit de la pression qu'elle supporte sa température. Par conséquent, la hauteur H' du baromètre à la fin de l'expérience fait connaître la valeur de T . Ayant trouvé les forces élastiques du gaz, à volume égal, à zéro et à T degrés, on obtient son coefficient de dilatation par le calcul suivant.

Le ballon ainsi que les tubes b et c ayant été jaugés d'avance en les pesant pleins de mercure, soit V la capacité du ballon à zéro, v celle des tubes b et c à la température ambiante t pendant la première partie de l'expérience, δ le coefficient de dilatation du verre, et α celui de l'air. Le volume d'air v ramené à zéro devient $\frac{v}{1 + \alpha t}$, en négligeant la dilatation du verre, ce qui n'altère pas le résultat, v étant très-petit. Le volume total de l'air, dans la première partie de l'expérience, est donc, à zéro et à la pression H , $V + \frac{v}{1 + \alpha t}$.

À la fin de la seconde partie de l'expérience, l'air du ballon étant à T degrés, son volume est $V(1 + \delta T)$ à cause de la dilatation du verre, et ramené à zéro ce volume est $\frac{V(1 + \delta T)}{1 + \alpha T}$. Quant au volume v , en supposant que la température ambiante a changé et est maintenant t' , il est, à zéro, $\frac{v}{1 + \alpha t'}$. Le volume total de l'air à zéro et à la pression $H' + h$, est donc, dans le second cas,

$$\frac{V(1 + \delta T)}{1 + \alpha T} + \frac{v}{1 + \alpha t'}$$

Or on a vu (158) que pour une même masse de gaz, à température égale, le produit du volume par la pression est constant. On a donc

$$\left\{ \frac{V(1 + \delta T)}{1 + \alpha T} + \frac{v}{1 + \alpha t'} \right\} (H' + h) = \left(V + \frac{v}{1 + \alpha t} \right) H.$$

Cette équation a été résolue par la méthode des *approximations successives*.

C'est-à-dire que, substituant d'abord à α , dans les deux fractions $\frac{v}{1 + \alpha t}$ et $\frac{v}{1 + \alpha t'}$, la valeur approchée, déjà connue, du coefficient de dilatation de l'air, et résolvant par rapport au binôme $1 + \alpha T$, on en déduisait une seconde valeur de α plus approchée que la première; puis, portant de même cette valeur dans les fractions ci-dessus, on tirait de l'équation une troisième valeur de α plus approchée que la deuxième, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la valeur de α devint constante.

324. Dilatation des gaz à pression constante et à volume variable. — À l'aide d'un appareil qui diffère peu du précédent, M. Regnault a aussi cherché le coefficient de dilatation des gaz à pression constante et à volume variable. Or il a constaté qu'alors la dilatation est toujours un peu plus grande qu'à pression variable et à volume constant.

Le même savant a en outre constaté qu'à une même tempéra-

ture et pour un même gaz, la dilatation, sauf celle de l'hydrogène, est d'autant plus grande, que la pression est plus forte, ce qui fait voir que la loi qu'avait donnée Davy, que *le coefficient de dilatation des gaz est le même à toutes les pressions*, n'est pas exacte.

Enfin, M. Regnault a observé que la différence entre la dilatation à pression constante et celle à pression variable, à peine sensible pour l'air, diminue pour les autres gaz à mesure que la température est plus élevée.

On conclut de là et de ce qui a été dit sur la loi de Mariotte (157) que, à mesure que la température s'élève et que la pression diminue, les gaz approchent d'un *état gazeux parfait*, auquel correspondent, pour tous, les mêmes coefficients de dilatation et de compressibilité; en sorte que la loi de Mariotte (156) et celle de Gay-Lussac (320) sont d'autant plus rigoureusement applicables, que la température est plus élevée et la pression plus faible.

Coefficients obtenus par M. Regnault, entre 0 et 100 degrés, pour une variation de température de 1 degré, et sous des pressions constantes, comprises entre 0^m,30 et 0^m,50.

Hydrogène.	0,003661
Oxyde de carbone.	0,003669
Air.	0,003670
Acide carbonique	0,003710
Protoxyde d'azote.	0,003719
Cyanogène.	0,003877
Acide sulfureux	0,003903

325. Travail de la chaleur dans la dilatation des gaz. — Dans les gaz, où les molécules sont libres et indépendantes les unes des autres, la dilatation n'est accompagnée d'aucun travail intérieur. Quant au travail extérieur, il se présente deux cas : 1^o celui où les gaz sont chauffés sous une pression constante, dans un vase à parois extensibles, comme le tube à index mobile représenté dans la figure 274; 2^o celui où ils sont chauffés en vase clos et résistant, sous une pression croissante.

1^{er} Cas. — Dans le premier cas, une portion de la chaleur communiquée est transformée en travail extérieur pour refouler la paroi mobile et vaincre la pression atmosphérique, tandis que l'autre portion, augmentant la force vive des molécules, se manifeste par une élévation de température.

2^e Cas. — Lorsque l'échauffement s'effectue en vase clos et inextensible, tout accroissement de volume étant impossible, il ne se produit aucun travail extérieur. Il n'y a pas non plus travail intérieur, car l'expérience fait voir que la chaleur communiquée au gaz se retrouve tout entière à l'état sensible dans la masse échauffée. La force qui tend à écarter les molécules, la

tension, est bien augmentée, mais sans aucune résistance vaincue. En un mot, lorsqu'on chauffe un gaz en vase clos, la température et la tension augmentent, mais sans dépense d'aucun travail; d'où l'on conclut que pour échauffer, dans ce cas, un poids donné de gaz, d'un nombre de degrés déterminé, il doit falloir moins de chaleur que pour l'échauffer en vase ouvert, ce que l'expérience vérifie.

* 326. **Thermomètre à air.** — Le *thermomètre à air*, ainsi que son nom l'indique, est fondé sur la dilatation de l'air. Le plus simple serait le tube capillaire à boule dont s'est servi Gay-Lussac pour mesurer le coefficient de dilatation des gaz (fig. 274). En effet, de même que, la température étant connue, on a déduit du déplacement de l'index dans le tube le coefficient de dilatation de l'air, réciproquement, une fois celui-ci connu, il est facile de calculer la température correspondante à chaque déplacement de l'index. Mais la marche de cet index entraînerait toujours la même cause d'erreur qui a fait trouver à Gay-Lussac un coefficient de dilatation trop grand, et l'on obtiendrait des températures trop élevées. C'est pourquoi on prend de préférence pour thermomètre à air un tube semblable à celui qui a servi à mesurer le coefficient de dilatation des gaz dans l'appareil de M. Regnault (fig. 275 et 276). Opérant avec ce tube comme dans l'expérience du paragraphe 322, on détermine les quantités P, P', H, H' et h qui entrent dans l'équation [3], et comme α et δ sont connus, on déduit de cette équation la température t à laquelle le tube a été porté.

Mais l'emploi de ce thermomètre exige beaucoup de temps et de soins. Aussi le thermomètre à mercure, à tige ou à poids, lui est-il généralement préféré. Cependant on ne doit pas perdre de vue que les thermomètres à air présentent sur ceux à mercure deux avantages importants. 1° Ils sont beaucoup plus sensibles, l'air étant vingt fois plus dilatable que le mercure. 2° Tandis que deux thermomètres à mercure sont rarement concordants, sauf de -36 à 100 degrés (285), deux thermomètres à air sont toujours comparables entre eux, ce qui découle de la grande dilatation des gaz, devant laquelle disparaît la faible différence de dilatation des diverses espèces de verre dont les thermomètres sont construits.

D'après M. Regnault, les thermomètres à air et à mercure sont sensiblement d'accord jusqu'à 240 degrés, quand ils sont construits avec du verre vert ordinaire; avec le cristal, la discordance est plus grande, et quand le thermomètre à air marque 350 degrés, le thermomètre à mercure marque $360^{\circ},5$.

* 327. **Pyromètre à air.** — Par leur dilatation régulière, les gaz sont les corps qu'on doit préférer pour la mesure des hautes températures; mais pour les appliquer à la construction des pyromètres (294), il est nécessaire que les vases qui les contiennent soient infusibles aux températures que l'on veut mesurer. Pouillet, en 1836, avait adopté pour pyromètre un thermomètre à air dont le réservoir était de platine. Or M. H. Sainte-Claire Deville ayant constaté (168) que ce métal, dans les hautes températures, devient perméable aux gaz, on ne peut en faire usage dans la construction des pyromètres à air. C'est pourquoi le même savant a adopté la porcelaine de Bayeux vernissée, après en avoir déterminé le coefficient de dilatation cubique, lequel il a trouvé être $0,0000165$ entre 1000 et 1400 degrés, et s'élever à $0,0000200$ en approchant de 1500 degrés.

Ainsi modifié, l'appareil de M. Regnault, décrit ci-dessus (fig. 277), devient un pyromètre à air avec lequel on expérimente identiquement comme on l'a fait (323) pour la détermination de α en fonction de T ; seulement ici c'est T qu'on détermine en fonction de α , en admettant que ce coefficient reste constant à toutes les températures.

* 328. **Zéro absolu.** — On a vu (280) que le *zéro absolu* est celui qui correspond à l'absence complète de chaleur dans les corps, c'est-à-dire à la cessation complète

de tout mouvement vibratoire des molécules. Pour déterminer à quel nombre de degrés centigrades correspond le zéro absolu, remarquons que le coefficient de dilatation de l'air, 0,00366, équivaut sensiblement à la fraction $\frac{1}{273}$. Cela posé, soient, à la température de zéro centigrade, un volume d'air V et F sa force élastique; à t degrés, ce volume sera $V(1 + \alpha t)$, et sa force élastique deviendra $F(1 + \alpha t)$, les forces élastiques croissant, à volume égal, dans le rapport de 1 à $1 + \alpha t$.

Si l'on admet qu'à la température du zéro absolu, l'air soit encore un gaz parfait, c'est-à-dire qu'il ne soit pas liquéfié et soit toujours soumis à la loi de Mariotte, la formule $F(1 + \alpha t)$ représente encore sa force élastique. Or celle-ci doit alors être nulle, puisque tout mouvement vibratoire des molécules a cessé. Il

faut donc qu'on ait $F(1 + \alpha t) = 0$; d'où $t = -\frac{1}{\alpha} = -273$, en remplaçant α par sa valeur. C'est donc à 273 degrés au-dessous du zéro centigrade que serait placé le zéro absolu, si alors la loi de Mariotte est encore applicable. Les températures comptées de ce point sont des *températures absolues*.

329. Poids spécifiques des gaz par rapport à l'air. — *Le poids spécifique ou la densité d'un gaz par rapport à l'air est le rapport du poids de ce gaz à celui de l'air à volume égal, le gaz et l'air étant tous les deux à zéro et à la pression 0^m,76.*

D'où, pour trouver la densité d'un gaz, il faut chercher le poids d'un certain volume de ce gaz à zéro et à la pression 0^m,76, puis celui d'un même volume d'air à la même température et à la même pression, et diviser le premier poids par le second. A cet effet, on fait usage d'un ballon de verre de 8 à 10 litres de capacité, dont le col porte un robinet qui peut se visser sur la machine pneumatique (fig. 100, page 108). On pèse ce ballon successivement vide, plein d'air et plein du gaz dont on cherche la densité, l'air et le gaz étant desséchés par le procédé décrit plus haut, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 275. En soustrayant du poids obtenu dans les deux dernières pesées celui du ballon, on a le poids de l'air et le poids du gaz sous le même volume. Dans le cas où, durant ces différentes pesées, la température aurait été constamment zéro, et la pression 0^m,76, il n'y aurait qu'à diviser le poids du gaz par le poids de l'air, et le quotient serait la densité cherchée. Mais le procédé que nous venons de faire connaître nécessite, en général, plusieurs corrections pour ramener les poids des deux gaz à zéro et à la pression 0^m,76, ainsi que pour réduire à zéro le volume du ballon.

Pour faire ces corrections, on doit d'abord avoir soin d'opérer sur des gaz secs, ce qu'on obtient en les faisant passer sur des matières desséchantes avant de les introduire dans le ballon. L'air doit en outre passer sur de la potasse caustique pour perdre l'acide carbonique qu'il contient. De plus, comme les meilleures machines pneumatiques ne font jamais le vide parfait, afin de ne pas tenir compte, dans les pesées, du gaz qui reste dans le ballon, on fera le vide à chaque fois jusqu'à ce que l'éprouvette marque la même tension e .

Cela posé, on fait le vide dans le ballon, puis on y laisse rentrer de l'air sec; et ainsi de suite plusieurs fois jusqu'à ce que le ballon soit parfaitement dessé-

ché. Faisant alors le vide une dernière fois jusqu'à ce que l'éprouvette marque la tension e , on pèse, et l'on a le poids p' du ballon lorsqu'il ne contient plus que de l'air à la tension e . On laisse alors rentrer l'air lentement à travers des tubes contenant, les uns du chlorure de calcium, les autres de la potasse; on pèse de nouveau et on trouve que le poids du ballon plein est P' . En appelant H' la hauteur barométrique et t' la température au moment de la pesée, $P' - p'$ est donc le poids de l'air contenu dans le ballon à la température t' et à la pression $H' - e$.

Pour ramener ce poids à la pression 760 et à la température de zéro, soient α' le coefficient de dilatation de l'air et δ le coefficient de dilatation cubique du verre. D'après la loi de Mariotte, le poids, qui est $P' - p'$ à la pression $H' - e$, sera, à la pression 760, $(P' - p') \frac{760}{H' - e}$, la température étant toujours t' . Or, si celle-ci devient zéro, la capacité du ballon diminue dans le rapport $1 + \delta t'$ à 1, tandis que le poids du gaz augmente dans le rapport de 1 à $1 + \alpha' t'$, ainsi que cela découle des problèmes vi (306) et v (321). Donc, le poids de l'air contenu dans le ballon à zéro et à la pression 760 est

$$(P' - p') \frac{760}{H' - e} \cdot \frac{1 + \alpha' t'}{1 + \delta t'} \quad [1].$$

Soient de même α le coefficient de dilatation du gaz dont on cherche la densité, P le poids du ballon plein de ce gaz, à la température t et à la pression barométrique H , et enfin p le poids du ballon quand on en a retiré le gaz jusqu'à la tension e ; le poids du gaz contenu dans le ballon, à la pression 760 et à la température de zéro, sera représenté par

$$(P - p) \frac{760}{H - e} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \delta t} \quad [2].$$

Divisant la formule [2] par la formule [1], on a, pour la densité cherchée,

$$D = \frac{(P - p) (H' - e) (1 + \alpha t) (1 + \delta t')}{(P' - p') (H - e) (1 + \alpha' t') (1 + \delta t)}$$

valeur qui est indépendante du volume du ballon.

Si la température et la pression ne varient pas, on a $H = H'$, et $t = t'$; d'où

$$D = \frac{(P - p) (1 + \alpha t)}{(P' - p') (1 + \alpha' t)}; \text{ et si enfin on suppose } \alpha = \alpha', \text{ il vient } D = \frac{P - p}{P' - p'}$$

330. Méthode de M. Regnault pour trouver la densité des gaz.
— Dans la méthode ci-dessus, il y a à effectuer de nombreuses corrections; M. Regnault les fait disparaître en partie par le procédé suivant. On prend deux ballons à long col, identiquement de même verre et approximativement de volumes extérieurs égaux; puis on ferme le plus grand par une tubulure à robinet, et le plus petit par une tubulure simplement à crochet. Pour achever de rendre les volumes des ballons identiques, on les remplit d'eau et on les suspend aux plateaux d'une balance, en ayant soin d'établir l'équilibre au moyen d'une tare. Les faisant plonger dans une cuve remplie d'eau, l'équilibre est rompu, et le nombre de grammes q qu'il faut ajouter pour le rétablir représente, en centimètres cubes, la différence des volumes des ballons (98). Construisant alors un tube de verre fermé dont le volume extérieur soit de q centimètres, on le suspend au crochet du plus petit ballon.

Après s'être ainsi procuré un système rigoureusement de même volume que le ballon dont on doit faire usage, on expérimente sur celui-ci comme il a été dit plus haut (329), en le pesant successivement vide, plein d'air, et plein du gaz dont on cherche la densité; mais on a soin, dans chaque pesée, de lui faire équilibre avec

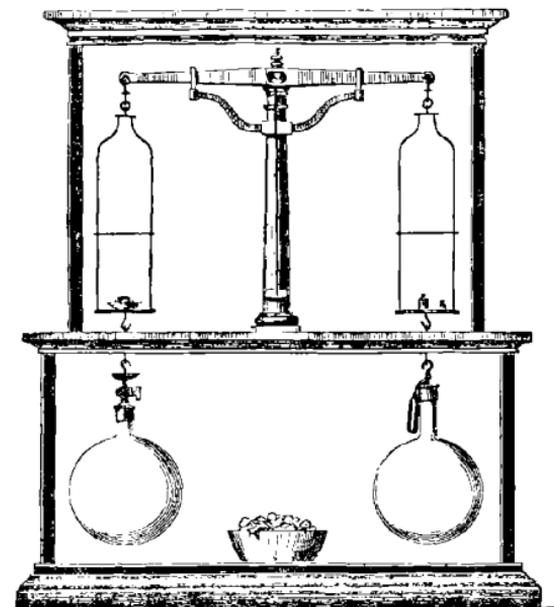


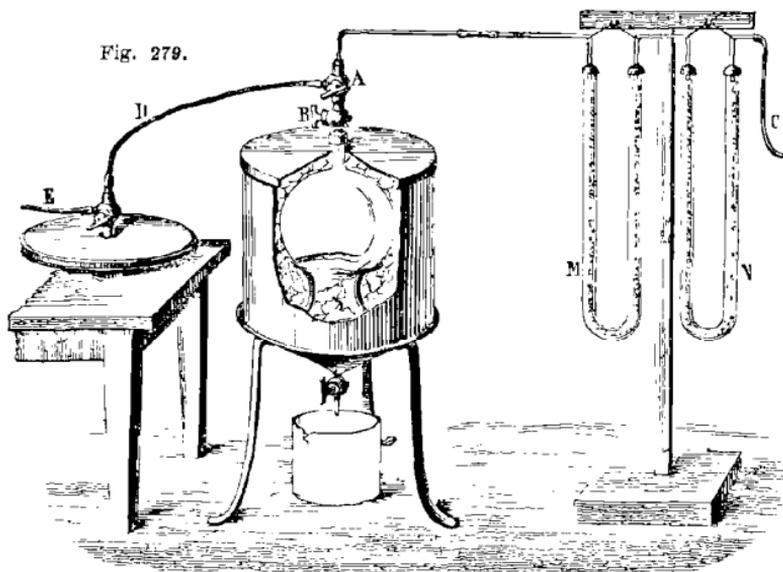
Fig. 278.

le deuxième ballon, comme le montre la figure 278. De plus, les deux ballons sont renfermés dans une cage vitrée dont on dessèche l'air avec de la chaux vive. Par cette disposition, les pertes de poids dans l'air étant égales des deux côtés, on n'a à faire aucune correction pour les pesées dans l'air.

Afin d'éviter les corrections de dilatation du verre et des gaz sur lesquels on expérimente, on a soin de remplir le ballon à robinet successivement de gaz et d'air à zéro. Pour cela, le ballon est placé dans un vase plein de glace (fig. 279). Là, on visse sur le robinet B un second robinet A, à trois voies, lequel donne le moyen de faire communiquer à volonté le ballon avec une machine pneumatique par un tube de caoutchouc D, ou avec des tubes M, N, dans lesquels le gaz est amené par un tube C. Les tubes M, N contiennent différentes substances destinées, les unes à dessécher le gaz, les autres à le purifier, c'est-à-dire à retenir les gaz qui pourraient être mélangés avec lui.

Cela fait, le robinet A étant tourné de manière qu'il n'y ait com-

munication qu'avec la machine pneumatique, on fait le vide dans le ballon ; puis, à l'aide du même robinet, la communication étant interrompue avec la machine, mais établie avec les tubes M, N, le gaz arrive et remplit le ballon. Toutefois, comme on ne peut faire le vide absolu dans celui-ci, et qu'il y reste toujours un peu d'air,



on recommence à faire le vide et à laisser rentrer le gaz, et cela plusieurs fois jusqu'à ce qu'on juge que tout l'air est expulsé. Faisant enfin le vide une dernière fois, un baromètre différentiel (fig. 128, page 139), qui communique avec l'appareil par le tube E, fait connaître la force élastique e du gaz raréfié qui reste encore dans le ballon. Fermant alors le robinet B et dévissant le robinet A, on retire le ballon de la glace, on l'essuie avec soin, et on le pèse dans la balance décrite ci-dessus (fig. 278).

Ayant obtenu dans cette première pesée un poids p , on place de nouveau le ballon dans la glace, on remet en place le robinet A, et on fait arriver le gaz, en ayant soin de laisser les robinets ouverts assez longtemps pour qu'il prenne dans le ballon la pression extérieure H , marquée par le baromètre. Si l'on ferme alors le robinet B, qu'on enlève A, qu'on retire le ballon de la glace avec les mêmes précautions que la première fois, et qu'on pèse de nouveau, on trouve un poids P , en sorte que la différence $P - p$ des deux pesées est le poids du gaz contenu dans le ballon à zéro et à la pression $H - e$. Nous disons à la pression $H - e$ et non à la pression H , parce que, dans la première pesée, le ballon contenait déjà le même gaz à la pression e , ainsi qu'on a vu ci-dessus.

Pour déterminer le poids x du même volume du même gaz à la pression 760, les poids étant proportionnels aux pressions, on a

$$\frac{x}{P-p} = \frac{760}{H-e}, \text{ d'où } x = \frac{760(P-p)}{H-e}$$

Enfin, en recommençant les mêmes pesées avec l'air, c'est-à-dire pesant d'abord le ballon vide, puis plein d'air sec à zéro, et représentant par p' le poids du ballon quand on y a fait le vide jusqu'à la pression e' , par P' son poids après qu'on a laissé rentrer l'air, et par H' la hauteur du baromètre à l'instant où l'on ferme le ballon, on trouve que le poids de l'air qui y est contenu, à zéro et à la pression 760, est donné par la formule $x' = \frac{760(P'-p')}{H'-e'}$.

Si l'on divise le poids du gaz par le poids de l'air, on obtient pour le poids spécifique cherché

$$D = \frac{x}{x'} = \frac{(P-p)(H'-e')}{(P'-p')(H-e)}$$

Si la hauteur du baromètre n'a pas varié, et si dans les deux cas on a fait le vide au même degré, c'est-à-dire si $e=e'$, on a $D = \frac{P-p}{P'-p'}$.

331. Densité des gaz qui attaquent le cuivre. — Pour les gaz qui attaquent le cuivre, comme le chlore, on ne peut se servir d'un ballon à robinet. On fait alors usage d'un flacon à l'émeri, dont on détermine d'avance la capacité en le pesant plein d'eau, et dans lequel on fait arriver le gaz par un tube recourbé qui plonge jusqu'au fond du flacon, celui-ci étant droit ou renversé, selon que le gaz est plus dense que l'air, ou moins dense. Lorsqu'on juge que tout l'air est expulsé, on retire le tube et l'on ferme le flacon. Pesant alors ce dernier plein de chlore, soit P le poids qu'on obtient; soit de même p le poids du flacon plein d'air. La différence $P-p$ est évidemment l'excès du poids du chlore sur celui de l'air à volume égal. Or la capacité du flacon étant connue, on en déduit le poids de l'air qu'il contient, et ce poids, ajouté à la différence $P-p$, est le poids du chlore. Il ne reste donc plus qu'à diviser ce poids par celui de l'air, en ayant soin toutefois de faire les corrections de température et de pression nécessaires pour ramener les deux poids au même volume, à la température de zéro et à la pression 760.

Densités des gaz à zéro et à la pression 0^m,760, celle de l'air étant prise pour unité.

Air	1,0000	Acide sulfhydrique	1,1912
Hydrogène	0,0693	Acide chlorhydrique	1,2472
Hydrogène protocarboné	0,559.	Protoxyde d'azote	1,5289
Gaz ammoniac	0,5967	Acide carbonique	1,5290
Oxyde de carbone	0,9569	Cyanogène	1,8064
Azote	0,9714	Acide sulfureux	2,2474
Bioxyde d'azote	1,0388	Chlore	3,4216
Oxygène	1,1056	Acide iodhydrique	4,443.

332. Poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau. — On sait (133) que le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau est le quotient du poids d'un litre d'air à zéro et à la pression 760 par le

poids d'un litre d'eau à 4 degrés, c'est-à-dire $\frac{1^{\text{sr}},293}{1\ 000} = 0,001293$.

Quant aux poids spécifiques des autres gaz par rapport à l'eau, on les détermine en multipliant les densités obtenues ci-dessus par le nombre 0,001293. En effet, soient a le poids d'un litre d'air à zéro et à la pression 760, et a' le poids d'un litre d'hydrogène, dans les mêmes conditions de température et de pression; le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau est $\frac{a}{1\ 000}$, et celui de l'hydrogène par rapport à l'air $\frac{a'}{a}$, c'est-à-dire le nombre 0,0693 contenu dans le tableau ci-dessus. Or le produit de $\frac{a}{1\ 000}$ par $\frac{a'}{a}$ est $\frac{a'}{1\ 000}$, qui est bien le poids spécifique de l'hydrogène par rapport à l'eau.

L'emploi, dans les calculs, du poids spécifique des gaz par rapport à l'eau, offre l'avantage de donner immédiatement en kilogrammes le poids du litre du gaz que l'on considère. Par exemple, dans le calcul ci-dessus, si l'on multiplie le nombre 0,0693, qui représente le poids spécifique de l'hydrogène par rapport à l'air, par le nombre 0,001293, qui est le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, le produit $0^{\text{kil}},0000896$, ou $0^{\text{sr}},0896$, est le poids d'un litre d'hydrogène à zéro et à la pression 760 millimètres.

CHAPITRE V

CHANGEMENTS D'ÉTAT, VAPEURS

333. **Fusion, ses lois.** — Des divers phénomènes que présentent les corps sous l'influence de la chaleur, il n'a été question jusqu'ici que de leur dilatation. Or, en ne considérant d'abord que les solides, leur dilatation a une limite. En effet, l'expérience fait voir qu'un corps s'échauffant graduellement, il arrive un moment où la cohésion entre les molécules est vaincue par le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur, et alors un nouveau phénomène se produit : la *fusion*, c'est-à-dire le passage de l'état solide à l'état liquide.

Toutefois, un grand nombre de substances, comme le papier, le bois, la laine, certains sels, ne fondent pas sous l'action d'une température élevée, mais sont décomposées. De tous les corps simples, un seul n'a pu être fondu jusqu'ici par l'action des sources

de chaleur les plus intenses : c'est le carbone. Cependant, en le soumettant à l'action d'un courant électrique très-puissant, Despretz est parvenu à ramollir ce corps jusqu'à le rendre flexible, ce qui indique un état voisin de la fusion.

L'expérience fait voir que la fusion des corps est constamment soumise aux deux lois suivantes :

1^o *A pression constante, tout corps entre en fusion à une température déterminée, invariable pour chaque substance.*

2^o *Quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, du moment que la fusion commence, la température cesse de s'élever et reste égale à celle du point de fusion, jusqu'à ce que celle-ci soit complète.*

Températures de fusion de diverses substances.

Protoxyde d'azote	— 100°	Soufre	+ 111°
Acide carbonique	— 58	Étain	228
Mercure	— 39	Bismuth	264
Brome	— 20	Plomb	326
Glace	0	Zinc	360
Chlorure de calcium hydraté . +	29	Antimoine	432
Sulf	33	Bronze	900
Phosphore	44	Argent	1000
Acide margarique	57	Fonte blanche	1100
Potassium	58	Fonte grise	1200
Stéarine	60	Palladium	1200
Cire jaune	61	Or	1250
Cire blanche	69	Acier	1350
Acide stéarique	70	Fer doux	1500
Sodium	90	Platine	1910 à 2000
Alliage de Darcet (1 de plomb, 1 d'étain, 4 de bismuth) . . .	94	Iridium	2500

M. Hopkins, en Angleterre, a constaté que la température de fusion s'élève à mesure que la pression augmente. Les corps sur lesquels il a expérimenté sont le soufre, la cire, la stéarine et le spermaceti. M. W. Thomson a observé le contraire pour la glace, dont le point de fusion s'abaisse lorsque la pression croît. D'où l'on conclut que *la température de fusion, pour un même corps, varie avec la pression.*

334. **Chaleur de fusion, travail consommé.** — On a vu ci-dessus que lorsqu'un corps passe de l'état solide à l'état liquide, sa température reste constante et égale à celle du point de fusion pendant toute la durée du phénomène, et cela quelle que soit l'intensité de la source de chaleur. Toute la chaleur communiquée pendant la fusion disparaît donc comme chaleur sensible; d'où l'on conclut qu'elle est consommée par le travail intérieur nécessaire à l'état moléculaire qui constitue la fluidité. Cette

quantité de chaleur transformée en travail a été désignée longtemps sous le nom de *chaleur latente*; on lui donne aujourd'hui celui de *chaleur de fusion*, qui exprime mieux la nature du phénomène.

L'expérience suivante est propre à donner une idée exacte de ce qu'il faut entendre par *chaleur de fusion*. Si l'on mélange d'abord 1 kilogramme d'eau à zéro avec le même poids d'eau à 79 degrés, on a immédiatement 2 kilogrammes d'eau à 39 degrés $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire à une température moyenne entre celle des deux liquides mélangés; ce qu'il était facile de prévoir, puisque tous les deux étaient de même nature et en quantité égale. Mais si l'on mélange 1 kilogramme de glace pilée avec un égal poids d'eau à 79 degrés, la glace se fond aussitôt, et l'on obtient 2 kilogrammes d'eau à zéro. On voit par là que, sans changer de température, et uniquement pour se fondre, 1 kilogramme de glace absorbe la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 79 degrés 1 kilogramme d'eau. Cette quantité de chaleur représente donc la chaleur de fusion de la glace, ou la chaleur latente de l'eau.

Chaque liquide a une chaleur latente propre; on verra bientôt comment on la détermine par l'expérience (403).

335. Dissolution. — Un corps se *dissout* lorsqu'il se liquéfie par l'effet de l'attraction qui s'exerce entre ses molécules et celles d'un liquide. La gomme arabique, le sucre, la plupart des sels, se dissolvent dans l'eau.

Pendant la dissolution, de même que pendant la fusion, il y a disparition d'une quantité plus ou moins considérable de chaleur à l'état latent. C'est pourquoi la dissolution d'un sel détermine, en général, un abaissement de température. Cependant, pour certaines dissolutions, la température ne s'abaisse pas, et même s'élève. On s'en rend compte en observant qu'il se produit ici deux effets simultanés et contraires. Le premier est le passage de l'état solide à l'état liquide, effet qui entraîne un abaissement de température; le second est la combinaison du corps dissous avec le liquide. Or toute combinaison chimique se fait avec dégagement de chaleur. Par suite, suivant que c'est l'un des deux effets qui prédomine, ou suivant qu'ils sont égaux, il y a production de froid ou de chaleur, ou la température reste constante.

336. Solidification, ses lois, travail produit. — La *solidification*, ou *congélation*, est le passage de l'état liquide à l'état solide. Ce phénomène est toujours soumis aux deux lois suivantes, qui sont les réciproques de celles de la fusion, et qui se constatent par l'expérience:

1^o *La solidification se produit, pour chaque corps, à une tem-*

pérature fixe, qui est précisément celle de la fusion. Toutefois on verra ci-après (340) que plusieurs causes peuvent abaisser la température de solidification.

2° *Du moment que la solidification commence, jusqu'à ce qu'elle soit complète, la température reste constante.*

Dans la fusion, la cohésion est vaincue par la chaleur et il y a travail effectué par cette dernière. L'inverse a lieu dans la solidification : c'est la cohésion qui l'emporte et produit du travail, et c'est celui-ci qui se résout en chaleur et entretient la température constante pendant toute la solidification. En effet, l'expérience fait voir que la chaleur qui revient sensible pendant la solidification est rigoureusement égale à celle qui disparaît pendant la fusion.

Il est des liquides, comme l'alcool, l'éther, qui ne se solidifient pas par les plus grands froids auxquels on ait pu les soumettre. Cependant, par un froid produit à l'aide d'un mélange de protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide et d'éther, Despretz a vu l'alcool prendre une consistance telle, que le vase qui le contenait a pu être renversé sans que le liquide s'écoulât.

337. Cristallisation. — Généralement, les corps qui passent lentement de l'état liquide à l'état solide affectent des formes géométriques déterminées qu'on nomme *cristaux*, telles que celles de tétraèdres, de cubes, de prismes, de rhomboèdres. Si c'est un corps en fusion, comme le soufre, le bismuth, qui se solidifie, on dit que la cristallisation se fait par *voie sèche*; mais si c'est un corps tenu en dissolution dans un liquide, on dit que la cristallisation se fait par *voie humide*. C'est en laissant évaporer lentement les liquides qui tiennent des sels en dissolution que ceux-ci cristallisent. La neige, la glace naissante, les sels, nous offrent des exemples de cristallisation.

338. Formation de la glace. — L'eau distillée se solidifie à zéro, et prend alors le nom de *glace*; toutefois plusieurs causes peuvent retarder la congélation de l'eau (340).

La glace offre ce phénomène remarquable, qu'elle est moins dense que l'eau. On a déjà vu, en effet, que, par le refroidissement, l'eau ne se contracte que jusqu'à 4 degrés (318); à partir de ce point jusqu'à zéro, elle se dilate. Or cet accroissement de volume persiste et augmente encore au moment de la congélation; et l'on trouve que le volume de la glace à zéro est 1,075 fois celui de l'eau à 4 degrés. Par le fait de cette dilatation, la densité de la glace n'est que 0,930 de celle de l'eau; c'est pourquoi elle flotte à la surface de ce liquide.

L'accroissement de volume que prend la glace en se formant

est accompagné d'une force expansive considérable qui fait éclater les vases qui la contiennent. Les pierres gélives, qui se délitent après la gelée, ne doivent cet effet qu'à l'eau qui a pénétré dans leurs pores et s'y est congelée.

Williams, en Angleterre, pour démontrer la force expansive de la glace, plaça dans une atmosphère à plusieurs degrés au-dessous de zéro une bombe remplie d'eau, après en avoir fermé solidement la lumière au moyen d'un tampon de bois. Au moment de la congélation, ce tampon fut lancé avec force à une grande distance, et un bourrelet de glace s'accumula sur les bords de l'orifice.

L'eau n'est pas la seule substance qui augmente de volume en se solidifiant. La fonte de fer, le bismuth, l'antimoine, présentent le même phénomène. Au contraire, d'autres substances, comme le mercure, le phosphore, le soufre, la stéarine, la cire, se contractent au moment de la solidification.

339. Régélation de la glace. — La *régélation* de la glace est le phénomène que présentent deux morceaux de glace de se souder l'un à l'autre, dès qu'on les met en contact, même lorsqu'ils flottent dans de l'eau assez chaude pour qu'on ne puisse y tenir la main. Faraday, le premier, en 1850, signala la régélation de la glace. Depuis, elle a été étudiée par Forbes, Thomson, Tyndall, et différentes hypothèses ont été proposées pour l'expliquer.

M. Tyndall observe qu'un morceau de glace étant en fusion, les molécules de sa surface, d'un côté, sont libres et en dehors de l'action coercitive des molécules voisines; mais si l'on met en contact deux surfaces en fusion, ces surfaces se trouvant transportées virtuellement au centre de la glace, leurs molécules, qui perdent la liberté de passer à l'état liquide, se mettent en équilibre de mouvement avec les molécules environnantes, et de là régélation.

La facilité et la promptitude avec lesquelles deux fragments de glace se soudent ensemble permettent de mouler une masse donnée de glace sous telle forme que l'on veut par une pression plus ou moins forte. Par exemple, si on la comprime entre deux moules hémisphériques, il y a d'abord rupture en fragments plus petits, qui se soudent aussitôt les uns aux autres; forçant la pression, il y a de nouveau fracture en parties encore plus petites, puis régélation; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive, si la pression est suffisante, à une boule de glace compacte et translucide.

M. Tyndall a donné, de la formation des glaciers dans les Alpes, une théorie fondée sur le moulage de la glace par pression.

340. Surfusion, causes qui la produisent. — On donne le nom de *surfusion* au phénomène de l'abaissement du point de solidification des liquides au-dessous de leur température normale de

congélation. C'est dans l'eau qu'on l'a d'abord observé, mais il se rencontre aussi dans d'autres liquides. Les causes qui le produisent sont : les substances dissoutes, la privation d'air ou d'autres gaz en dissolution, une complète immobilité, une vive agitation, et un excès de pression.

1° L'influence des sels en dissolution se manifeste dans l'eau de mer, qui ne se congèle qu'à $-2^{\circ},5$. De même, si l'on fait bouillir une dissolution saturée de sulfate de soude dans un tube de verre effilé, afin d'en chasser l'air, puis qu'on ferme à la lampe pour empêcher la rentrée de l'air, la dissolution se refroidissant, le sel ne cristallise pas, quoiqu'il y ait saturation. Mais si l'on brise la pointe du tube, l'air rentre, et aussitôt le sel cristallise.

2° Dans l'expérience ci-dessus, il y a, à la fois, influence de la substance dissoute et de la privation d'air. Or il suffit que l'eau soit purgée d'air et complètement immobile, pour que son point de congélation soit abaissé de plusieurs degrés. En effet, Gay-Lussac ayant mis une éprouvette remplie d'eau distillée dans un mélange réfrigérant, et ayant placé le tout sous le récipient de la machine pneumatique, afin que l'air se dégagât, vit l'eau descendre jusqu'à -12 degrés et même au delà sans se solidifier. Mais si alors on imprime à sa masse un léger ébranlement, une partie du liquide se congèle aussitôt, et l'on observe ce phénomène remarquable, que la masse restée liquide remonte subitement à zéro. Cette élévation de température fait voir que la force vive communiquée aux molécules dans le passage de l'état solide à l'état liquide, se transforme en chaleur dans le passage inverse.

3° Le soufre, qui fond et se congèle à 111 degrés, reste liquide jusqu'à la température ordinaire, lorsqu'il se refroidit lentement et en repos. De même, le phosphore, qui se solidifie à 44 degrés, reste liquide jusqu'à 22 degrés dans de l'eau parfaitement tranquille. A cet état, si l'on touche le phosphore en fusion avec un morceau de phosphore solide, la solidification commence aussitôt au point de contact et gagne rapidement toute la masse. M. Gernez a observé qu'on détermine encore la solidification de toutes les substances qui subissent la surfusion, en frictionnant, dans la masse en fusion, deux corps solides entre eux, ou un corps solide contre les parois des tubes dans lesquels sont les corps en fusion.

4° Une agitation rapide peut aussi s'opposer à la congélation. Il en est de même de toute action qui, gênant les molécules dans leur mouvement, ne leur permet pas de se grouper dans les conditions nécessaires à l'état solide. C'est ainsi que Despretz a pu refroidir, dans des tubes très-capillaires, de l'eau jusqu'à -20 degrés sans qu'elle se congelât. Cette expérience peut servir à expli-

quer comment les plantes, dans de certaines limites, résistent à la gelée, les vaisseaux qui contiennent la sève étant très-capillaires.

5° Enfin, une forte compression empêche la congélation de l'eau, ce que M. Boussingault a constaté, dans l'hiver de 1870-71, avec un canon d'acier dont les parois, de 8 millimètres d'épaisseur, pouvaient supporter des pressions de plusieurs centaines d'atmosphères. Une bille d'acier était placée à l'intérieur, et le canon, complètement rempli d'eau, était fermé hermétiquement par une vis de pression. Tout le système étant resté trois jours et trois nuits exposé à un froid de -12 à -20 degrés, le tintement de la bille, lorsqu'on agitait le canon, indiqua toujours que l'eau persistait à l'état fluide; ce qui s'explique par la résistance que l'eau rencontrait à la dilatation qui précède sa congélation.

341. **Mélanges réfrigérants.** — La disparition de la chaleur à l'état latent, dans les corps qui passent de l'état solide à l'état liquide (334), a été utilisée pour produire des froids artificiels plus ou moins intenses. Ce résultat s'obtient en mélangeant des substances qui ont de l'affinité les unes pour les autres, et dont une au moins est solide : par exemple, de l'eau et un sel, de la glace et un sel, un acide et un sel. L'affinité chimique accélérant alors la fusion, la portion qui se fond enlève au reste du mélange une grande quantité de chaleur qui devient latente; d'où résulte un abaissement de température quelquefois très-considérable.

Le tableau suivant indique les proportions et la nature des substances à employer pour obtenir un froid déterminé.

SUBSTANCES	PARTIES en poids	REFROIDISSEMENT
Sulfate de soude	8	+ 10 à -17°
Acide chlorhydrique	5	
Glace pilée ou neige	2	+ 10 à -19°
Sel marin	1	
Sulfate de soude	3	+ 10 à -19°
Acide azotique étendu	2	
Sulfate de soude	6	+ 10 à -26°
Azotate d'ammoniaque	5	
Acide azotique étendu	4	+ 10 à -29°
Phosphate de soude	9	
Acide azotique étendu	4	+ 10 à -51°
Chlorure de calcium en poudre	4	
Glace pilée ou neige	3	

Les mélanges réfrigérants sont fréquemment utilisés en chimie, en physique, dans l'industrie et dans l'économie domestique. On

fabrique, sous le nom de *glacière des familles*, un petit appareil pour obtenir de la glace en toutes saisons, au moyen d'une dissolution de sulfate de soude dans l'acide chlorhydrique : 6 kilogrammes de ce sel et 5 d'acide suffisent pour donner 5 à 6 kilogrammes de glace en une heure. L'appareil consiste en un cylindre métallique divisé en quatre compartiments concentriques. Au centre est l'eau à congeler; dans le compartiment suivant, le mélange réfrigérant; le troisième contient encore de l'eau; et enfin, dans le compartiment extérieur, est un corps peu conducteur, tel que du coton, destiné à s'opposer au passage de la chaleur qui vient de l'extérieur. Le meilleur moyen d'utiliser un mélange réfrigérant est de ne le former que successivement.

VAPEURS, MESURE DE LEUR TENSION

342. **Vaporisation, vapeurs.** — L'action de la chaleur sur la matière n'a pas seulement pour effet de la faire passer de l'état solide à l'état liquide (333), mais de l'état liquide à l'état de fluide aériforme. Ce phénomène se désigne sous le nom général de *vaporisation*, et l'on donne le nom de *vapeurs* aux fluides aériformes ainsi produits.

Dans le cas où les vapeurs ne se forment que lentement à la surface des liquides, on dit qu'il y a *évaporation*, tandis qu'on désigne sous le nom d'*ébullition* la production rapide de vapeur dans la masse même d'un liquide.

On appelle liquides *volatils* ceux qui possèdent la propriété de passer à l'état aériforme, et liquides *fixes* ceux qui ne donnent de vapeurs à aucune température : telles sont les huiles grasses. Pour certains liquides, on observe une limite de température à la vaporisation; par exemple, on verra (354) que l'acide sulfurique ne donne plus de vapeurs au-dessous de 30 degrés. Pour d'autres liquides, comme l'alcool, l'éther, le sulfure de carbone, on ne connaît point de limite à la vaporisation.

Il est des corps solides, comme la glace, l'arsenic, le camphre et les matières odorantes, qui donnent immédiatement des vapeurs sans passer par l'état liquide. A une température suffisamment élevée, tous les métaux se vaporisent.

Les vapeurs sont transparentes comme les gaz, et généralement incolores; il n'y a qu'un petit nombre de liquides colorés dont les vapeurs soient elles-mêmes colorées.

343. **Force élastique des vapeurs.** — Comme les gaz, les vapeurs ont une force élastique, en vertu de laquelle elles exercent sur les parois des vases qui les contiennent des pressions plus ou

moins considérables. Pour démontrer la tension des vapeurs, on emplit de mercure à moitié un tube de verre recourbé en siphon (fig. 280); puis, ayant fait passer une goutte d'éther dans la courte branche, qui est fermée, on plonge le tube dans un bain d'eau à 45 degrés environ. Le mercure s'abaisse alors lentement dans la

Fig. 280

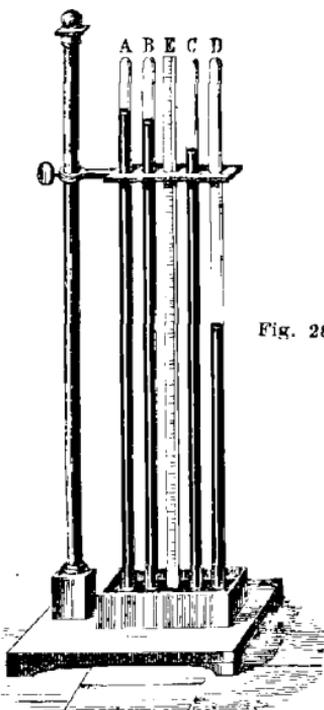
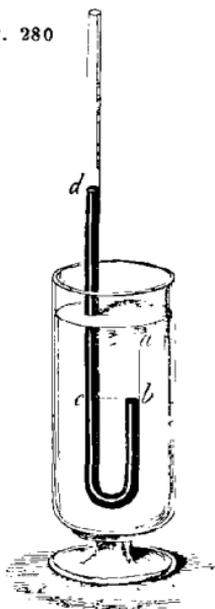


Fig. 281.

petite branche, et l'espace *ab* se remplit d'un gaz dont la force élastique fait évidemment équilibre à la colonne de mercure *cd* et à la pression atmosphérique qui s'exerce en *d*. Or ce gaz n'est autre chose que de la vapeur d'éther. Si l'on refroidit l'eau du vase, ou si l'on retire le tube du bain, ce qui produit le même effet, la vapeur qui remplit l'espace *ab* disparaît rapidement, et la goutte d'éther se reforme. Si, au contraire, on chauffe davantage l'eau du bain, le niveau du mercure descend au-dessous du point *b*, ce qui indique un accroissement de tension.

344. Formation des vapeurs dans le vide. — Dans l'expérience précédente, le passage à l'état de vapeur ne s'opère que lentement. Il en est encore de même lorsqu'un liquide volatil est exposé librement à l'air. Dans les deux cas, la pression atmosphérique

est un obstacle à la vaporisation ; mais il n'en est plus ainsi lorsque les liquides sont placés dans le vide. La force élastique des vapeurs ne rencontrant alors aucune résistance, leur formation est instantanée. Pour le démontrer, on fait plonger plusieurs tubes barométriques dans une même cuvette (fig. 281). Ces tubes étant remplis de mercure, on en conserve un, le tube A, par exemple, pour servir de baromètre, puis on introduit quelques gouttes d'eau, d'alcool et d'éther, respectivement dans les tubes B, C, D. On remarque qu'à l'instant même où, dans chacun de ces tubes, le liquide pénètre dans le vide barométrique, le niveau du mercure s'abaisse, comme le montre la figure. Ce n'est pas le poids du liquide introduit qui déprime le mercure, car ce poids n'est qu'une fraction très-petite de celui du mercure déplacé. Il y a donc eu, pour chaque liquide, une production instantanée de vapeur, dont la force élastique a refoulé la colonne mercurielle.

L'expérience ci-dessus montre, en outre, que la dépression du mercure n'est pas la même dans les trois tubes ; elle est plus grande dans le tube à alcool que dans celui où est l'eau, et plus grande dans le tube à éther que dans les deux autres. On peut donc, dès à présent, poser les lois suivantes sur la formation des vapeurs :

1^o *La pression ralentit la vaporisation.*

2^o *Dans le vide, les liquides se vaporisent instantanément.*

3^o *A température égale, les vapeurs de liquides différents ne possèdent pas la même tension.*

Par exemple, à 20 degrés, la tension de la vapeur d'éther est à peu près 25 fois plus grande que celle de la vapeur d'eau.

345. **Vapeurs à l'état de saturation, maximum de tension.** — Lorsque dans le tube d'un baromètre on introduit un liquide volatil, tel que l'éther, si la quantité en est très-petite, elle se vaporise instantanément d'une manière complète, et la colonne de mercure n'atteint pas la plus grande dépression qu'elle est susceptible d'éprouver ; car, si l'on introduit de nouveau une très-petite quantité d'éther, on voit la dépression augmenter. Or, en continuant ainsi, il vient un moment où l'éther qui pénètre dans le tube cesse de se vaporiser et reste à l'état liquide. Il y a donc, pour une température déterminée, une limite à la quantité de vapeur qui peut se former dans un espace donné. C'est ce qu'on exprime en disant que cet espace est alors *saturé*.

En outre, du moment que la vaporisation de l'éther cesse, la dépression du mercure s'arrête. Il y a donc aussi une limite à la tension de la vapeur, limite qui, ainsi qu'il sera démontré (348), s'élève avec la température, mais qui, pour une température donnée, est *indépendante de la pression*.

Pour faire voir que, dans un espace fermé, saturé de vapeur et contenant du liquide *en excès*, la température restant constante, il y a un *maximum de tension* que la vapeur ne peut dépasser, quelle que soit la pression, on fait usage d'un tube barométrique, plongeant dans une cuvette profonde (fig. 282).

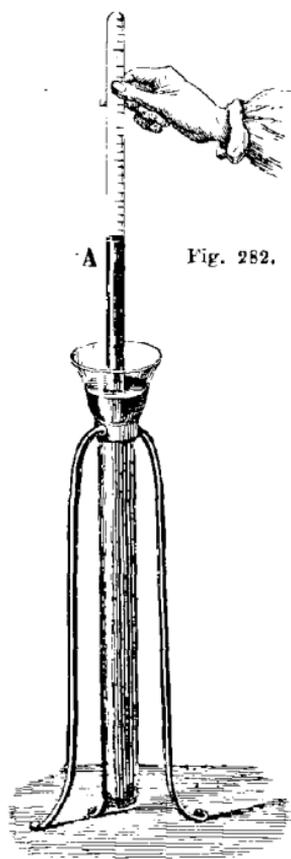


Fig. 282.

Après avoir fait passer dans ce tube, d'abord rempli de mercure, une quantité d'éther suffisante pour que, après que la chambre barométrique s'est saturée, il reste encore du liquide en excès, on note la hauteur du mercure dans le tube au moyen d'une échelle graduée sur le verre même. Or, soit qu'on plonge alors le tube davantage, ce qui tend à comprimer la vapeur, soit qu'on le soulève, ce qui tend à la dilater, la hauteur de la colonne mercurielle reste constante. La tension de la vapeur reste donc la même dans les deux cas, puisque la dépression n'augmente ni ne diminue. On conclut de là que, lorsque la vapeur contenue dans un espace saturé est comprimée, une partie retourne à l'état liquide; et que si, au contraire, la pression diminue, une portion du liquide resté en excès se vaporise, et l'espace occupé par la vapeur se sature de nouveau; mais, dans l'un et l'autre cas, la tension et la densité de la vapeur restent constantes.

346. Vapeurs non saturées. — D'après ce qui précède, les vapeurs se présentent sous deux états bien distincts, suivant qu'elles sont ou non saturées. Dans le premier état, celui de saturation, celui où elles sont en contact avec leur liquide, elles diffèrent complètement des gaz, puisque, pour une température donnée, elles ne peuvent être ni comprimées ni dilatées, leur force élastique et leur densité restant constantes.

Au second état, au contraire, les vapeurs non saturées, non en contact avec leur liquide, sont tout à fait comparables aux gaz, dont elles possèdent toutes les propriétés. En effet, si l'on répète l'expérience ci-dessus (fig. 282), en n'introduisant dans le tube qu'une très-petite quantité d'éther, afin que la vapeur qui se forme

n'atteigne pas l'état de saturation, et si l'on soulève alors lentement le tube, le niveau du mercure monte, ce qui indique que la force élastique de la vapeur a diminué. De même, en enfonçant le tube davantage, le niveau du mercure s'abaisse. La vapeur se comporte donc ici entièrement comme un gaz, sa tension diminuant quand le volume augmente, et réciproquement; et comme, dans les deux cas, on observe que le volume que prend la vapeur est en raison inverse de la pression, on en conclut que *les vapeurs non saturées sont soumises à la loi de Mariotte.*

Enfin, en chauffant une vapeur non saturée, on remarque que son accroissement de volume est de même ordre que celui des gaz, et que le nombre 0,00367, qui représente le coefficient de dilatation de l'air, peut être pris sensiblement pour celui des vapeurs.

On voit donc que les vapeurs non saturées sont tout à fait comparables aux gaz, et qu'on peut leur appliquer toutes les formules relatives à la compressibilité et à la dilatabilité de ces derniers (159 et 321). Mais il ne faut pas oublier qu'il y a toujours une limite de pression ou de refroidissement pour laquelle les vapeurs non saturées passent à l'état de saturation, et qu'elles ont alors un maximum de tension et de densité qui ne peut être dépassé qu'autant que les vapeurs étant en contact avec leur liquide, leur température s'élève.

347. Tension de la vapeur d'eau au-dessous de zéro. — Pour mesurer la force élastique de la vapeur d'eau au-dessous de zéro, Gay-Lussac s'est servi de deux tubes barométriques remplis de mercure et plongeant dans une même cuvette (fig. 283). L'un d'eux, qui est droit et purgé d'air et d'humidité, sert à mesurer la pression atmosphérique; l'autre est recourbé de manière qu'une partie de la chambre barométrique plonge dans un mélange réfrigérant (341). Cela posé, si l'on fait passer un peu d'eau dans le tube recourbé, on remarque que le niveau du mercure dans ce tube est plus bas que dans le tube A d'une quantité qui varie avec la température du mélange réfrigérant.

A 0° la dépression est, en millimètres.	4,60
— 10	1,96
— 20	0,84
— 30	0,30

Ces dépressions, dues à la tension de la vapeur dans la chambre barométrique BC, montrent qu'à des températures très-basses il y a encore de la vapeur d'eau dans l'air.

Dans l'expérience ci-dessus, la partie B et la partie C de la chambre barométrique où est la vapeur ne participent pas toutes les deux à la température du mélange réfrigérant; mais on verra

bientôt (353) que la tension de la vapeur est la même dans les deux, et correspond à la plus basse des deux températures.

348. **Tension de la vapeur d'eau entre zéro et 100 degrés.** — 1° *Procédé de Dalton.* — Dalton a mesuré la force élastique de la vapeur, de zéro à 100 degrés, au moyen de deux tubes barométriques A et B (fig. 284), plongeant dans une marmite de fonte

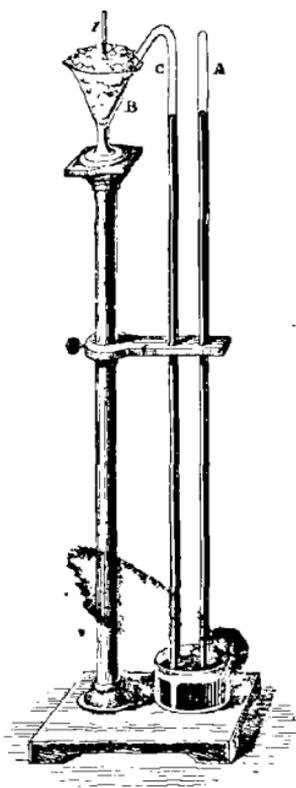


Fig. 283.

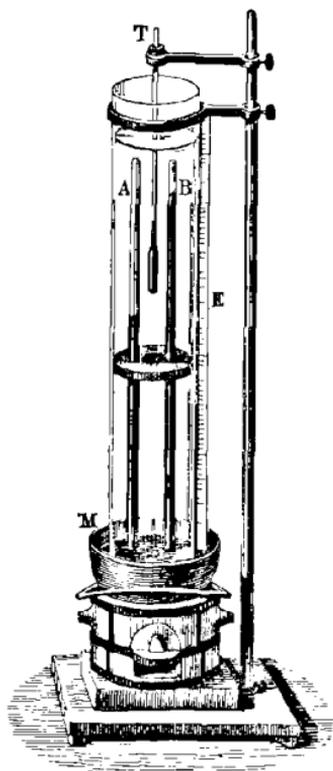


Fig. 284 ($h = 1^m,07$).

pleine de mercure et placée sur un fourneau. Le baromètre B est complètement purgé d'air et d'humidité, et dans le baromètre A on fait passer une petite quantité d'eau. Ces deux baromètres sont maintenus dans un manchon de verre rempli d'eau, et au centre de ce manchon plonge un thermomètre T, qui donne la température du liquide. En chauffant graduellement la marmite, et, par suite, l'eau du manchon, celle qui est dans le tube A se vaporise, et, à mesure que la tension de la vapeur augmente, le mercure s'abaisse. On note alors, de degré en degré, sur une échelle E,

la dépression qui a lieu dans le tube A, au-dessous du niveau B, en ayant soin, à chaque observation, de ramener à zéro la hauteur du mercure dans les tubes (317). Les différences de niveau observées font connaître les tensions. C'est en opérant ainsi que Dalton, le premier, a construit une table des forces élastiques de la vapeur d'eau de zéro à 100 degrés.

2^o Procédé de M. Regnault, de 0 à 50 degrés. — L'appareil de Dalton offre peu de précision, car le liquide du manchon ne peut être entretenu exactement à la même température dans toute sa hauteur, et dès lors on n'a pas la température précise de la vapeur. M. Regnault a modifié cet appareil en remplaçant le manchon par une caisse de tôle MN (fig. 285) dont le fond porte deux tubulures, dans lesquelles les extrémités supérieures des deux tubes A et B s'engagent, maintenues par des feuilles de caoutchouc. Le tube à vapeur B est relié à un petit ballon

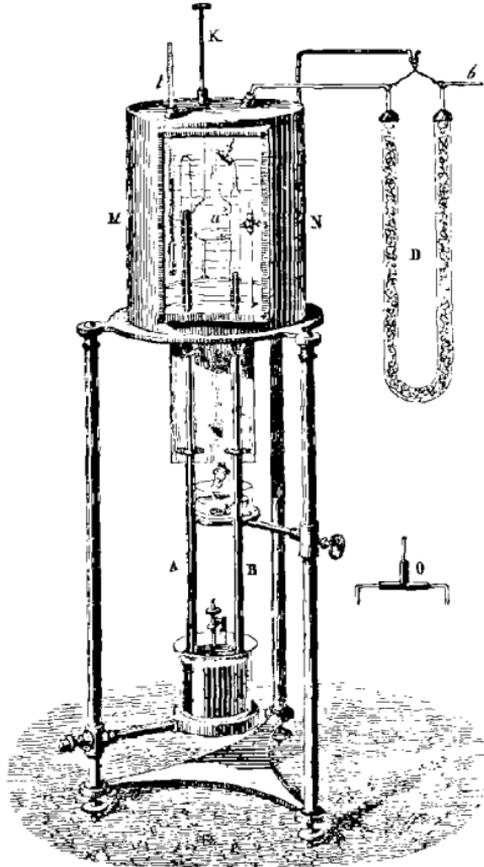


Fig. 285.

a, à l'aide d'une tubulure de cuivre à trois branches représentée en O sur la droite du dessin. La troisième branche de cette tubulure est mastiquée à un tube de verre qui aboutit à un tube D rempli de ponce sulfurique et communiquant lui-même avec une machine pneumatique par un dernier tube b.

Avant que les tubes soient fixés dans la caisse, on introduit dans le ballon a une petite quantité d'eau, dont on fait distiller une portion dans le tube B en chauffant légèrement le ballon. Faisant alors le vide avec la machine pneumatique, l'eau distille d'une

manière continue du ballon et du tube barométrique vers le tube D, qui condense les vapeurs. Lorsque, après avoir vaporisé plusieurs grammes d'eau, tout l'air contenu dans le tube et dans le ballon a été entraîné, on soude à la lampe le tube capillaire qui relie le tube B à la pièce aux trois tubulures. Le tube B étant alors fermé et contenant de l'eau purgée d'air et du mercure, on expérimente avec les tubes A et B comme avec l'appareil de Dalton.

Pour cela, on remplit la caisse MN d'eau, qu'on chauffe doucement sur un fourneau, ou avec une lampe à alcool placée au-dessous et séparée des tubes par une planchette de bois. À l'aide d'un agitateur K, on mélange constamment les différentes couches du liquide, afin d'obtenir une température uniforme pour toutes les parties du bain dans lequel sont placés les tubes barométriques. Une glace de verre, encastrée dans la paroi de la caisse, permet d'observer, à l'aide d'un cathétomètre, la hauteur du mercure dans les tubes; et c'est de la différence de ces hauteurs, ramenées à zéro, qu'on déduit la tension de la vapeur. Au moyen de cet appareil, M. Regnault a mesuré avec précision la force élastique de la vapeur d'eau de zéro à 50 degrés.

349. Tension de la vapeur d'eau au-dessus de 100 degrés, par Dulong et Arago. — Deux procédés ont été mis en usage pour mesurer la force élastique de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100 degrés, l'un par Dulong et Arago, en 1830, l'autre par M. Regnault, en 1844.

La figure 286 donne une coupe verticale de l'appareil dont se servirent Dulong et Arago pour mesurer la tension de la vapeur d'eau au-dessus de 100 degrés. Cet appareil consistait en une chaudière de cuivre rouge *k*, de 80 litres de capacité et à parois très-épaisses. Deux canons de fusil *a*, dont un seul est visible dans le dessin, plongeaient dans l'eau de la chaudière, aux parois de laquelle ils étaient solidement scellés. Fermés à leur partie inférieure, ils étaient remplis de mercure dans lequel étaient placés des thermomètres *t*, qui faisaient connaître la température de l'eau et de la vapeur dans la chaudière. La tension de la vapeur se mesurait au moyen d'un manomètre à air comprimé *m*, le même que nous avons décrit en parlant de la loi de Mariotte (fig. 124, page 132). Ce manomètre avait été gradué expérimentalement d'avance et adapté à une cuvette de fonte *d*, remplie de mercure. Pour connaître la hauteur du mercure dans la cuvette, celle-ci était en communication, à son sommet et à sa base, avec un tube de cristal *n*, dans lequel le niveau était toujours le même que dans la cuvette. Enfin, un tube de cuivre *i* faisait communiquer la partie supérieure de la cuvette avec un tube vertical *c*, partant direc-

tement de la chaudière et donnant issue à la vapeur. Le tube *i* et la partie supérieure de la cuvette étaient remplis d'eau qu'on maintenait constamment à une basse température, en faisant circuler autour du tube un courant d'eau froide, qui s'écoulait d'un réservoir représenté sur la droite du dessin.

La vapeur qui se dégageait du tube *c* refoulant l'eau du tube *i*,

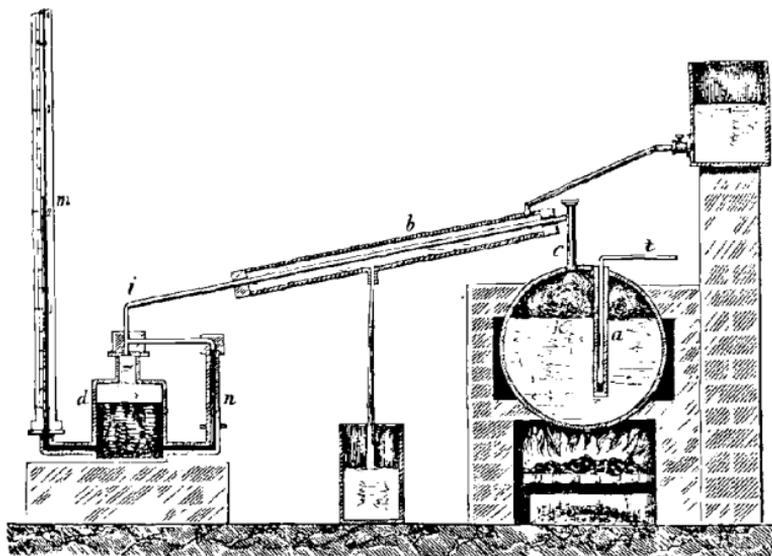


Fig. 286.

la pression se transmettait à l'eau et au mercure de la cuvette, et le mercure montait dans le manomètre. En prenant, de degré en degré, les températures marquées par les thermomètres, et observant en même temps le manomètre, Dulong et Arago ont mesuré directement, jusqu'à 24 atmosphères, la tension de la vapeur d'eau correspondante à une température donnée. Par le calcul ils l'ont ensuite évaluée jusqu'à 50.

350. **Tension de la vapeur d'eau au-dessus et au-dessous de 100 degrés par M. Regnault.** — On doit à M. Regnault un procédé qui permet de mesurer la tension de la vapeur soit au-dessous, soit au-dessus de 100 degrés. Il consiste à faire bouillir de l'eau dans un vase clos, sous une pression connue, et à mesurer la température à laquelle se produit l'ébullition. En s'appuyant alors sur ce principe, qu'au moment de l'ébullition la force élastique de la vapeur qui se dégage est précisément égale à la pression que supporte le liquide (360), on connaît la tension de la vapeur et la température correspondante, ce qui résout la question.

L'appareil se compose d'un vase de cuivre C (fig. 287), hermétiquement fermé et rempli d'eau jusqu'au tiers environ. Quatre thermomètres traversent le couvercle : deux plongent dans les premières couches du liquide, et les deux autres dans les cou-

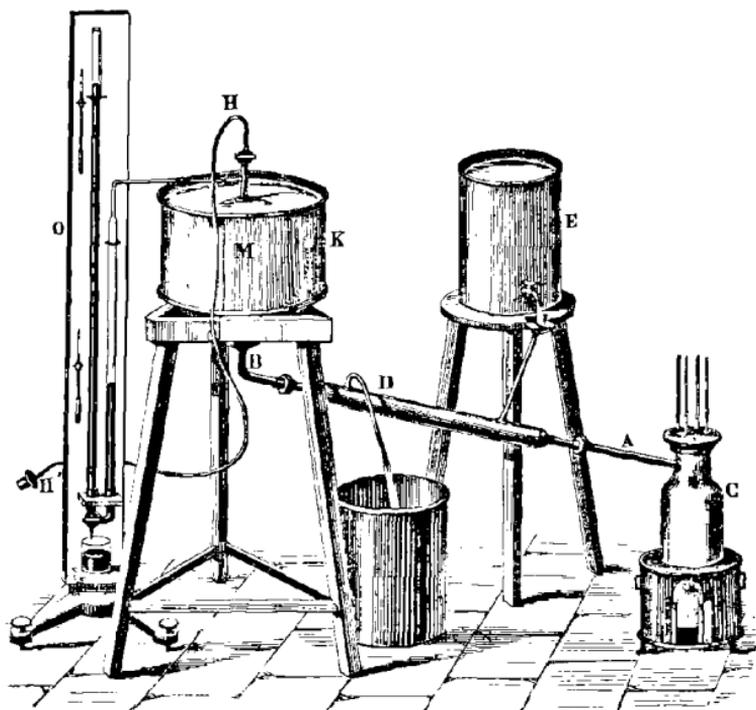


Fig. 287.

ches inférieures. Du vase C part un tube AB qui va s'adapter au goulot d'un ballon de verre M, de 24 litres de capacité et rempli d'air. Le tube AB est entouré d'un manchon D, dans lequel circule un courant d'eau froide qui s'écoule d'un réservoir E. De la partie supérieure du ballon M partent deux tubes : l'un communique avec un manomètre à air libre O ; l'autre HH', qui est de plomb, avec une machine pneumatique, ou avec une pompe foulante, suivant qu'on veut raréfier l'air du ballon ou le comprimer. Enfin, le réservoir K est rempli d'eau à la température ambiante.

Soit d'abord à mesurer la tension au-dessous de 100 degrés. Mettant l'extrémité H' du tuyau de plomb en communication avec la machine pneumatique, on raréfie l'air dans le ballon M et, par suite, dans le vase C. Chauffant alors doucement ce vase, l'eau qu'il renferme entre en ébullition à une température d'autant plus

au-dessous de 100 degrés, que l'air a été plus raréfié, c'est-à-dire que la pression est plus faible. D'ailleurs, les vapeurs se condensant dans le tube AB, qui est refroidi d'une manière constante, la pression indiquée primitivement par le manomètre n'augmente pas, et, par suite, la tension de la vapeur, pendant l'ébullition, reste égale à la pression qui s'exerce sur le liquide.

C'est alors que, consultant le manomètre et les thermomètres, on détermine la tension de la vapeur à une température connue. Laissant ensuite rentrer un peu d'air dans les tubes et dans le vase C, afin d'augmenter la pression, on fait une nouvelle observation, et l'on continue ainsi jusqu'à 100 degrés.

Pour mesurer la tension de la vapeur au-dessus de 100 degrés, on fait communiquer l'orifice H' avec une pompe foulante, au moyen de laquelle on soumet l'air du ballon et du vase C à des pressions successives supérieures à celle de l'atmosphère. L'ébullition se trouve alors retardée (360), et il suffit d'observer simultanément le manomètre et les thermomètres pour avoir la tension de la vapeur au-dessus de 100 degrés.

Les tables ci-après donnent la tension de la vapeur d'eau de -10 degrés à 100, puis de 100 à 230 degrés. La première table a été trouvée au moyen de l'appareil qui vient d'être décrit.

La seconde a été calculée à l'aide de la formule d'interpolation

$$\log F = a + bt + ct^2,$$

dans laquelle F représente la force élastique de la vapeur, t sa température, et a , b , c , α , ϵ , des constantes qu'on calcule en commençant par déterminer cinq forces élastiques, c'est-à-dire cinq valeurs de F correspondantes à des températures connues, ce qui donne lieu à autant d'équations que d'inconnues.

Tensions de la vapeur d'eau de -10 degrés à 100, d'après M. Regnaud.

TEMPÉRATURES	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro						
-10°	2,093	20°	17,391	50°	91,982	80°	354,643
- 5	3,131	25	23,560	55	117,478	85	433,041
0	4,800	30	31,548	60	148,791	90	525,450
+ 5	6,534	35	41,827	65	186,945	95	633,778
10	9,165	40	54,906	70	233,093	100	760,000
15	12,699	45	71,391	75	288,517		

Tensions, en atmosphères, de 100 degrés à 230,9, d'après M. Regnault.

TEMPÉRA- TURES	NOMBRE d'atmo- sphères	TEMPÉRA- TURES	NOMBRE d'atmo- sphères	TEMPÉRA- TURES	NOMBRE d'atmo- sphères	TEMPÉRA- TURES	NOMBRE d'atmo- sphères
100,0	1	170,8	8	198,8	15	217,9	22
120,6	2	175,8	9	201,9	16	220,3	23
133,9	3	180,3	10	204,9	17	222,5	24
144,0	4	184,5	11	207,7	18	224,7	25
152,2	5	188,4	12	210,4	19	226,8	26
159,2	6	192,1	13	213,6	20	228,9	27
165,3	7	195,5	14	215,5	21	230,9	28

Ces tables montrent que la tension de la vapeur d'eau croît suivant une loi beaucoup plus rapide que la température; mais cette loi n'est pas connue.

351. Tension des vapeurs de divers liquides. — La vapeur d'eau, à cause de ses nombreuses applications, a d'abord été seule l'objet des recherches des physiciens; mais M. Regnault, par les mêmes procédés qui lui ont servi à mesurer la force élastique de la vapeur d'eau, a aussi déterminé celles des vapeurs d'un certain nombre de liquides. Le tableau ci-après, qui donne quelques-uns des résultats obtenus par ce savant, fait voir combien, à température égale, les vapeurs des divers liquides diffèrent de tension.

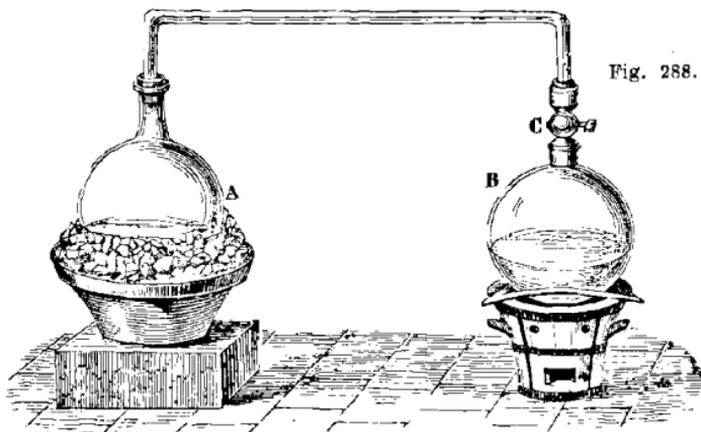
LIQUIDES	TEMPÉRA- TURES	TENSIONS en millimètres	LIQUIDES	TEMPÉRA- TURES	TENSIONS en millimètres
Mercure . .	0	0,02	Éther . . .	— 20	9
	50	0,11		0	182
	100	0,74		60	1728
		100		4920	
Alcool . . .		13	Acide sul- fureux . .	— 20	479
	50	220		0	1165
100	1685	60		8124	
Sulfure de carbone .	— 20	43	Ammoniaque	— 30	441
	0	132		— 20	4273
	60	1764		0	7709
	100	3329			

352. Tension des vapeurs des dissolutions salines ou acides. — Lorsque l'eau, ou tout autre liquide, tient en dissolution un sel, un acide, une substance quelconque, l'expérience montre que,

à température égale, la tension de la vapeur est moindre que lorsque le liquide est à l'état de pureté, et d'autant moindre, que la dissolution est plus concentrée.

Si la substance dissoute est elle-même volatile, la tension des vapeurs mélangées qui se produisent est moindre que la somme de leurs tensions respectives, à température égale.

333. Tension dans deux vases communicants inégalement chauds. — Lorsque deux vases fermés, contenant un même li-



quide à des températures inégales, sont mis en communication, la tension commune de vapeur qui s'établit dans ces deux vases n'est pas, comme on pourrait le croire, la tension moyenne entre celles qui existent déjà dans chacun d'eux. Par exemple, soient deux ballons, l'un, A (fig. 288), contenant de l'eau maintenue à zéro dans de la glace fondante; l'autre, B, contenant de l'eau à 100 degrés. Tant que les ballons ne communiquent pas, la tension, dans le premier, est, en millimètres, 4,6, et dans le second, 760, d'après les tables ci-dessus. Mais aussitôt que la communication est établie par le robinet C, la vapeur du ballon B, en vertu de son excès de tension, se précipite en A; or, comme elle s'y condense immédiatement, puisque le ballon est maintenu à zéro, il en résulte que la vapeur ne peut acquérir, dans le ballon B, une tension supérieure à celle du ballon A; il y a donc simplement distillation de B vers A sans accroissement de tension.

On peut donc poser ce principe général : *lorsque deux vases, à des températures inégales, et contenant le même liquide en excès, communiquent entre eux, la tension de la vapeur est la même dans ces deux vases, et égale à la tension qui correspond à la plus basse des deux températures.*

354. Évaporation. — On a déjà vu (342) qu'on entend par *évaporation* une production lente de vapeur à la surface d'un liquide. C'est par évaporation que les étoffes mouillées sèchent à l'air, ou qu'un vase ouvert, rempli d'eau, se vide complètement au bout d'un certain temps. C'est à l'évaporation qui se produit à la surface des mers, des lacs, des rivières et du sol, que sont dues les vapeurs qui s'élèvent dans l'atmosphère, s'y condensent en nuages et se résolvent en pluie.

Tout liquide se vaporise tant que sa tension de vapeur n'est pas nulle; mais sa vaporisation cesse, quelle que soit la température, dès que l'air ambiant est saturé; ou du moins, s'il y a encore vaporisation, elle est équilibrée par une condensation équivalente. L'acide sulfurique ne donne plus de vapeur au-dessous de 30 degrés, même dans le vide. En effet, si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique deux capsules contenant l'une de l'acide sulfurique, l'autre de l'eau de baryte, et qu'on fasse le vide, tant que la température est inférieure à 30 degrés, l'eau ne se trouble pas, ce qui indique qu'il ne se produit pas de vapeur acide; autrement, celle-ci se dissolvant aussitôt, il y aurait formation de sulfate de baryte, et comme ce sel est éminemment insoluble, le liquide se troublerait.

Par une expérience déjà ancienne, Faraday avait trouvé qu'en appliquant une feuille d'or sur l'extrémité inférieure d'un bouchon, et fermant avec celui-ci un flacon contenant du mercure, au bout de quelques jours l'or blanchit en s'amalgamant, mais que le phénomène ne se produit qu'autant que la température est au-dessus de —6 degrés. De là il avait conclu que —6 degrés était la température limite de la vaporisation du mercure. Davy, de son côté, qui avait trouvé pour limite —7 degrés, admettait qu'à des températures peu supérieures à cette limite, les vapeurs de mercure forment seulement une couche de quelques centimètres au-dessus de la surface libre du liquide, ce qui est opposé à la loi générale de la diffusion des fluides aériformes (165). Or, dès 1838, M. Regnault avait observé que le mercure se vaporise à —15 degrés; et récemment, M. Merget, à Lyon, a constaté que ce liquide donne encore des vapeurs à —44 degrés; de plus, il a reconnu que les vapeurs mercurielles possèdent une diffusion telle, que, dans des locaux vastes et élevés, on en constate la présence, à la température ordinaire, depuis le sol jusqu'au plafond, même quand elles sont émises par des surfaces évaporatoires de peu d'étendue. Le même savant a fait une application importante de la diffusion des vapeurs de mercure à l'analyse chimique, à la photographie et à l'hygiène.

355. **Causes qui accélèrent l'évaporation.** — Quatre causes influent sur la rapidité de l'évaporation : 1^o la température; 2^o la quantité de vapeur du même liquide répandue déjà dans l'atmosphère ambiante; 3^o le renouvellement de cette atmosphère; 4^o l'étendue de la surface d'évaporation.

L'accroissement de température accélère l'évaporation par l'excès de force élastique qu'il détermine dans les vapeurs.

Pour comprendre l'influence de la seconde cause, remarquons que l'évaporation d'un liquide serait nulle dans un espace saturé de la vapeur du même liquide, et qu'elle atteindrait son maximum dans un air complètement purgé de cette vapeur. Il résulte de là qu'entre ces deux cas extrêmes, la rapidité de l'évaporation varie, selon que l'atmosphère ambiante est déjà plus ou moins chargée des mêmes vapeurs.

Quant au renouvellement de cette atmosphère, son effet s'explique de la même manière; car si l'air ou le gaz qui enveloppe le liquide n'est pas renouvelé, il est promptement saturé, et toute évaporation cesse.

L'influence de la quatrième cause est évidente.

356. **Ébullition; ses lois.** — On nomme *ébullition* une production rapide de vapeur, en bulles plus ou moins grosses, dans la masse même d'un liquide.

Lorsqu'on chauffe un liquide, de l'eau, par exemple, par la partie inférieure, les premières bulles qui apparaissent ne sont autre chose que de l'air en dissolution dans l'eau, qui se dégage. Puis, de petites bulles de vapeur s'élèvent bientôt de tous les points échauffés des parois; mais, traversant les couches supérieures, dont la température est plus basse, elles s'y condensent avant d'atteindre la surface. C'est la formation et la condensation successives de ces premières bulles de vapeur qui occasionnent le bruissement qui précède ordinairement l'ébullition. Enfin de grosses bulles s'élèvent et crèvent à la surface, ce qui constitue le phénomène de l'ébullition (fig. 289).

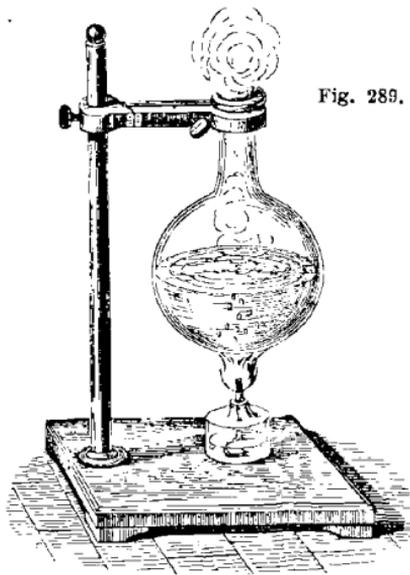


Fig. 289.

Tous les liquides susceptibles d'entrer en ébullition présentent les trois lois suivantes, qui se constatent par l'expérience :

1° *La température d'ébullition augmente avec la pression.*

2° *Pour une pression donnée, l'ébullition ne commence qu'à une température déterminée, qui varie d'un liquide à un autre, mais qui est toujours la même pour un même liquide, tant qu'il est placé dans les mêmes conditions de pression, de pureté et de contact avec d'autres corps.*

3° *Quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, du moment que l'ébullition commence, la température du liquide reste stationnaire.*

Températures d'ébullition à la pression 0,760.

Acide sulfureux	— 10°	Eau distillée	100°
Éther chlorhydrique	+ 11	Essence de térébenthine	157
Acide sulfurique anhydre	25	Phosphore	290
Éther sulfurique pur	35,5	Acide sulfurique concentré	325
Sulfure de carbone	48	Mercure (au thermomètre à air).	350
Chloroforme	63,5	Soufre	400
Alcool	79,7	Cadmium (Sainte-Claire Deville et Troost).	860
Benzine	80	Zinc (Id.)	1040
Acide azotique monohydraté.	86		

Plusieurs causes peuvent faire varier la température d'ébullition d'un liquide, savoir : les substances en dissolution, la nature des vases, l'absence d'air ou d'autre gaz en dissolution dans le liquide, et la pression. Nous allons successivement faire connaître les effets de ces différentes causes, particulièrement sur l'eau.

357. Influence des substances en dissolution sur la température d'ébullition. — Une substance dissoute dans un liquide, lorsqu'elle n'est point volatile, ou qu'elle l'est moins que le liquide, retarde l'ébullition d'autant plus, qu'il y a une plus grande quantité de cette substance en dissolution. L'eau, qui bout à 100 degrés lorsqu'elle est pure, ne bout qu'aux températures suivantes lorsqu'elle est saturée de différents sels.

L'eau saturée de sel marin bout à	109°
— — d'azotate de potasse	116
— — de carbonate de potasse	135
— — de chlorure de calcium	179

Les dissolutions acides présentent des résultats analogues ; mais les substances purement en suspension, comme les matières terreuses, la sciure de bois, n'élèvent pas la température d'ébullition.

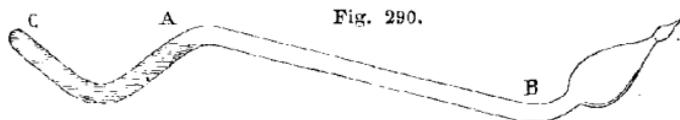
Il importe de rappeler ici les expériences de Rudberg, déjà citées page 247, dans lesquelles ce savant a constaté que lorsque la température d'ébullition de l'eau est au-dessus de 100 degrés par l'effet des substances qu'elle tient en dissolution, la température

de la vapeur qui se dégage est cependant toujours à 100 degrés, comme avec l'eau pure, si la pression est $0^m,760$.

358. **Influence de la nature des vases sur la température d'ébullition.** — Gay-Lussac a observé que, dans un vase de verre, l'eau bout à une température plus élevée que dans un vase de métal, phénomène qu'il a attribué à la cohésion entre le verre et l'eau. En prenant pour 100 degrés la température d'ébullition de l'eau distillée, dans un vase de cuivre, à la pression $0^m,760$, il a trouvé qu'à pression égale, ce liquide, dans un ballon de verre, n'entre en ébullition qu'à 101 degrés; et quand le vase de verre a été bien nettoyé avec de l'acide sulfurique concentré ou de la potasse, la température de l'eau peut s'élever jusqu'à 105 et même 106 degrés. Toutefois un simple fragment de métal placé au fond du ballon suffit pour ramener la température d'ébullition à 100 degrés, et en même temps pour faire disparaître les soubresauts violents qui accompagnent l'ébullition des dissolutions salines ou acides dans les vases de verre.

De même que pour les substances en dissolution, la température de la vapeur n'est pas influencée par celle que prend l'eau dans les vases de verre. A la pression $0^m,760$, elle est encore de 100 degrés, ainsi que dans les vases de cuivre.

359. **Influence de la privation de l'air sur la température d'ébullition.** — On a vu, lorsque l'eau est purgée d'air, que son point



de congélation peut être retardé de plusieurs degrés (340). La privation d'air dans l'eau change aussi sa température d'ébullition. Deluc remarqua, le premier, que de l'eau privée d'air par l'ébullition et renfermée dans un matras à long col pouvait être portée à 112 degrés sans entrer en ébullition. M. Dony, à Gand, en 1846, a étudié le même phénomène au moyen d'un tube de verre AB (fig. 290) recourbé à une extrémité, et terminé à l'autre par une grosse boule de même matière et par une plus petite qui se prolonge en pointe effilée. Avant de fermer celle-ci, on introduit de l'eau dans le tube, par le même procédé que pour le thermomètre à alcool (287), puis on fait bouillir un certain temps pour chasser tout l'air. Soudant alors la pointe effilée à la lampe, il reste de l'eau dans la branche recourbée, et seulement de la vapeur à une très-faible tension dans le tube AB et dans les boules. Or si l'on plonge maintenant la partie AC remplie d'eau dans un bain con-

centré de chlorure de calcium, et si l'on chauffe graduellement, le bain arrive à 130 degrés sans qu'il se manifeste aucune ébullition dans le tube. Ce n'est qu'à 138 degrés que l'ébullition se produit tout à coup, et l'eau est projetée dans les boules, qui sont brisées, si elles ne sont pas suffisamment résistantes.

Pour produire le même phénomène, Galy-Gazalat a recouvert d'une couche d'huile de l'eau purgée d'air par l'ébullition, et l'a portée à 123 degrés sans que le liquide commençât à bouillir; mais bientôt il se fit une violente explosion de vapeur, laquelle projeta en partie l'eau hors du vase qui la contenait.

M. Dufour, à Lausanne, a étudié le retard d'ébullition des liquides en les maintenant hors du contact de l'air, en suspension dans les liquides de même densité, mais à température d'ébullition plus élevée. Il a ainsi trouvé que l'eau, en suspension dans un mélange convenable d'essence de girofle et d'huile de lin qu'on chauffait au bain-marie, ne se transforme en vapeur brusquement qu'à près de 120 degrés. L'acide sulfureux liquide, qui bout à -10 degrés, maintenu en suspension dans un mélange d'eau et d'acide sulfurique, reste liquide jusqu'à $+18$ degrés.

Le même savant a en outre observé que si l'on touche, avec un corps solide quelconque, les liquides ainsi portés, au sein d'un autre liquide, à une température supérieure à celle de leur ébullition, ces liquides se vaporisent instantanément d'une manière violente. Toutefois les corps ainsi employés comme excitateurs perdent peu à peu leur propriété active. M. Dufour explique ce phénomène par l'influence de la couche d'air adhérente à ces corps (74) : lorsque, par une immersion prolongée, l'air condensé à leur surface s'est dégagé, ils sont complètement inactifs.

Ces différentes expériences font voir l'influence de la présence des gaz sur la température d'ébullition. De plus, M. Dufour a constaté que plus la quantité de gaz dissoute dans un liquide est petite, plus le point d'ébullition est abaissé.

360. Influence de la pression sur la température d'ébullition. — D'après les tables des forces élastiques données plus haut, à 100 degrés, température à laquelle l'eau distillée entre en ébullition sous la pression $0^m,760$, la vapeur de ce liquide a une tension précisément égale à cette pression. Ce principe est général et peut s'énoncer ainsi : *Tout liquide entre en ébullition au moment où la tension de sa vapeur égale la pression qu'il supporte.* On conçoit dès lors que, cette pression augmentant ou diminuant, la tension de la vapeur, et par conséquent la température nécessaire à l'ébullition, doivent croître ou décroître.

Pour démontrer que la température d'ébullition s'abaisse avec

la pression, on place sous le récipient de la machine pneumatique une capsule contenant de l'eau à 30 degrés environ, puis on fait le vide. On voit alors le liquide entrer en ébullition avec une grande rapidité, bien qu'en vase clos; ce qui résulte de ce que la vapeur est aspirée par la machine à mesure qu'elle se produit.

On peut faire la même expérience sans avoir recours à la machine pneumatique. Pour cela, on prend un ballon de verre dans lequel on fait bouillir de l'eau pendant quelques instants. Quand les vapeurs qui se dégagent ont entraîné tout l'air du ballon, on bouche celui-ci hermétiquement, et on le retourne (fig. 291). Si l'on en refroidit alors la partie supérieure avec une éponge imbibée d'eau froide, les vapeurs se condensent, le vide se fait, et une vive ébullition se produit.

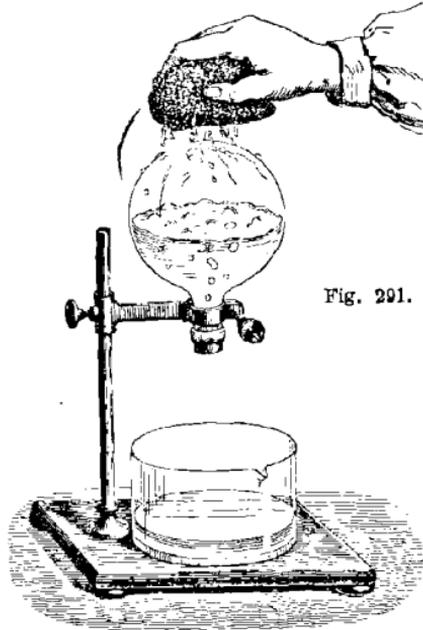


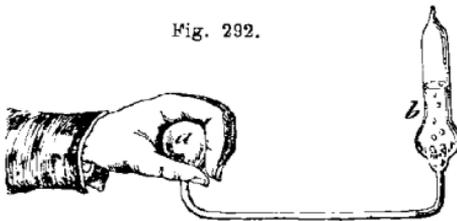
Fig. 291.

Dans le vide absolu, l'eau entrerait en ébullition à zéro, puisque la tension de sa vapeur est encore de $4^{\text{mm}},6$ (347).

C'est par la diminution de pression que, sur les hautes montagnes, l'eau bout au-dessous de 100 degrés. Sur le mont Blanc, ce liquide entre en ébullition à 84 degrés.

Si, au contraire, la pression augmente, l'ébullition est retardée : à 2 atmosphères, l'eau ne bout qu'à $120^{\circ},6$.

Fig. 292.



361. Bouillant de Franklin. — On démontre encore l'influence de la pression sur la température d'ébullition au moyen du *bouillant de Franklin*. C'est un petit

appareil de verre formé d'une boule *a* et d'un tube *b* réunis par un tube d'un petit diamètre (fig. 292). Le tube *b* étant effilé à son extrémité supérieure, avant qu'il soit fermé, on y introduit

de l'eau; puis, faisant passer le liquide dans la boule *a*, on le fait bouillir en chauffant celle-ci avec une lampe à alcool. Lorsqu'on juge que les vapeurs ont entraîné, en se dégageant, tout l'air qui était dans l'appareil, on ferme l'extrémité du tube *b* en la fondant à la lampe. L'appareil ne contenant plus d'air, l'eau ne supporte d'autre pression que la tension de sa vapeur, tension qui, à la température ordinaire, est très-faible. Il résulte de là que, prenant la boule *a* dans la main, la chaleur de celle-ci donne à la vapeur une tension qui refoule l'eau dans le tube *b*, et y détermine une vive ébullition.

362. Mesure de la hauteur des montagnes par la température d'ébullition. — La dépendance qui existe entre la température d'ébullition et la pression donne le moyen, au lieu de mesurer la hauteur des montagnes par le baromètre, de la mesurer par le thermomètre. En effet, si l'on observe, par exemple, que sur le sommet d'une montagne l'eau bout à 95 degrés, tandis qu'à sa base elle bout à 98 degrés, et qu'on cherche dans les tables des forces élastiques les tensions correspondantes, on trouve des nombres qui représentent, en millimètres de mercure, la force élastique de la vapeur au moment où elle se dégage, au sommet et au pied de la montagne, et par suite la pression atmosphérique supportée par l'eau en ébullition aux deux stations. Connaissant ainsi la hauteur du baromètre au sommet de la montagne et à sa base, on applique sans difficulté les formules déjà données pour mesurer la hauteur des montagnes à l'aide du baromètre (155).

Dans cette méthode, on ne fait usage que de thermomètres très-sensibles, gradués seulement de 80 à 100 degrés environ, de manière que, chaque degré occupant une grande étendue sur l'échelle, on puisse apprécier les dixièmes et même les vingtièmes de degré. C'est sur ce principe qu'est construit le *thermomètre hypsométrique* de M. Regnault, dont la tige est graduée seulement de 85 à 100 degrés, chaque degré étant lui-même divisé en 10 parties égales. Pour l'usage de ce thermomètre, M. Regnault a construit des tables qui donnent la tension de la vapeur d'eau pour chaque dixième de degré de 85 à 101.

363. Production de la vapeur en vase clos. — Jusqu'ici on a supposé que les vapeurs se produisaient dans un espace indéfini où elles pouvaient se répandre librement. Ce n'est qu'à cette condition qu'il peut y avoir ébullition; en vase clos, les vapeurs qui se produisent ne trouvant aucune issue, leur tension et leur densité croissent de plus en plus avec la température; mais le dégagement rapide qui constitue l'ébullition est impossible. Par conséquent, tandis que, dans un vase ouvert, la température d'un

liquide ne peut dépasser celle de son ébullition, dans un vase clos, au contraire, elle peut s'élever beaucoup au delà. L'état liquide a néanmoins alors une limite; car, d'après des expériences dues à Cagniard-Latour, si l'on introduit de l'eau, de l'alcool ou de l'éther dans de forts tubes de verre, et qu'on les ferme à la lampe après en avoir expulsé l'air par l'ébullition, on observe qu'en soumettant ces tubes à une source de chaleur suffisante, il vient un moment où tout à coup le liquide disparaît en se transformant en vapeurs, dont le volume diffère peu de celui du liquide. Cagniard-Latour a trouvé ainsi que l'éther sulfurique se réduit totalement en vapeur à 200 degrés, dans un espace moindre que le double de son volume à l'état liquide, et que la tension est alors de 38 atmosphères.

364. **Marmite de Papin.** — Papin, médecin français, mort en 1710, est le premier physicien qui ait étudié les effets de la production de la vapeur en vase clos.

L'appareil qui porte son nom est un vase cylindrique de bronze M (fig. 293), muni d'un couvercle de même métal qu'on fixe très-solidement au moyen d'une vis de pression, qui le maintient comprimé contre la marmite. Afin de fermer hermétiquement l'appareil, on a soin, avant de serrer le couvercle, d'interposer des feuilles de plomb entre ses bords et ceux de la marmite. Sur le couvercle est adaptée une tubulure de bronze dans laquelle s'engage librement un boulon d'acier *u*. Au-dessous de celui-ci, le couvercle est percé d'un petit trou fermé par une soupape conique sur laquelle s'appuie le boulon. Ce dernier est pressé contre la soupape par un levier *ab*, mobile à son extrémité *a*. Enfin, un poids *p*, qui se déplace le long du levier, permet d'exercer sur le boulon *u* une pression d'autant plus grande, que ce poids est plus loin de l'extrémité *a*, d'après une propriété connue des leviers (49). La charge de la soupape pouvant ainsi varier, on la règle de manière que,

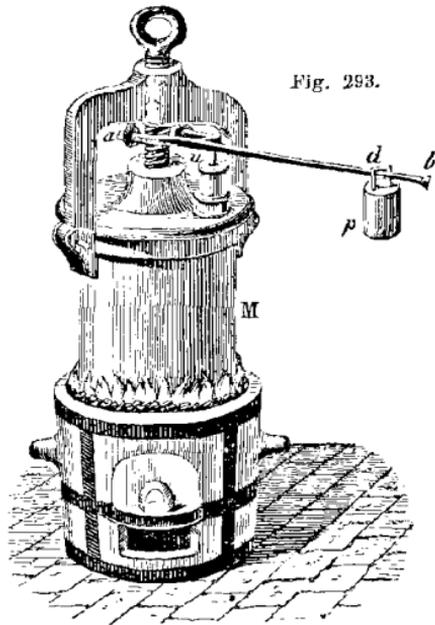


Fig. 293.

le long du levier, permet d'exercer sur le boulon *u* une pression d'autant plus grande, que ce poids est plus loin de l'extrémité *a*, d'après une propriété connue des leviers (49). La charge de la soupape pouvant ainsi varier, on la règle de manière que,

lorsque la vapeur, dans l'intérieur de la marmite, a atteint une tension déterminée, 6 atmosphères, par exemple, la soupape soit soulevée et donne issue à la vapeur. On peut ainsi éviter la rupture de l'appareil; de là le nom de *soupape de sûreté* donné à ce mécanisme.

La marmite de Papin étant remplie d'eau aux deux tiers et fermée, on la chauffe sur un fourneau. Le liquide peut ainsi être porté beaucoup au-dessus de 100 degrés, et la tension de la vapeur atteindre 5 à 6 atmosphères, suivant la charge qu'on a donnée à la soupape de sûreté. Si on l'ouvre alors, un jet de vapeur s'échappe avec sifflement et s'élève à une grande hauteur. L'eau, qui jusque-là n'avait pas bouilli, entre actuellement en ébullition, et sa température s'abaisse jusqu'à 100 degrés.

La marmite de Papin peut être utilisée pour augmenter l'action dissolvante des liquides, en donnant le moyen de les porter à une température supérieure à celle de leur point d'ébullition; c'est pourquoi on lui donne aussi le nom de *digesteur*.

365. Chaleur et travail de vaporisation. — D'après la troisième loi de l'ébullition (356), la température des liquides demeurant stationnaire pendant toute la durée du phénomène, il faut en conclure que dans la vaporisation, ainsi que dans la fusion, il y a disparition d'une quantité considérable de chaleur sensible, dont l'unique effet est de faire passer les corps de l'état liquide à l'état aériforme; car cette quantité de chaleur n'agit pas sur le thermomètre, puisque la vapeur qui se dégage est toujours à la même température que son liquide, ou à une température peu inférieure. Cette chaleur disparue, à laquelle on a d'abord donné le nom de *chaleur latente*, se nomme *chaleur de vaporisation*, ou *chaleur d'élasticité*. Elle est consommée, d'une part, en travail intérieur pour vaincre la force moléculaire qui lie entre elles les molécules d'eau à l'état liquide; de l'autre, en travail extérieur pour communiquer à la vapeur sa force expansive et vaincre la pression atmosphérique ou autre.

Dans la fusion, le volume variant très-peu, le travail extérieur est négligeable; il n'en est plus de même dans la vaporisation, où l'accroissement de volume est considérable. On verra, en effet, qu'un poids donné d'eau, qui passe de l'état liquide à l'état de vapeur à 100 degrés et à la pression 0^m,760, prend un volume 1700 fois plus grand (381).

Quelle que soit la température à laquelle une vapeur se produit, il y a toujours disparition de chaleur. Qu'on verse sur la main un liquide volatil, de l'éther par exemple, on ressent un froid très-vif, qui provient de la chaleur disparue pendant la va-

porisation, laquelle peut ainsi devenir une source de froid très-intense, capable de solidifier le mercure (366) et même les gaz, ainsi qu'il sera démontré ci-après par l'expérience (373).

On verra bientôt (405) comment on détermine la quantité de chaleur absorbée par les liquides pendant la vaporisation.

366. Froid dû à l'évaporation, cryophore, congélation du mercure. — On vient de voir, lorsqu'un liquide se vaporise, qu'une quantité considérable de chaleur disparaît. Par suite, si un liquide qui s'évapore ne reçoit pas une quantité de chaleur équivalente à

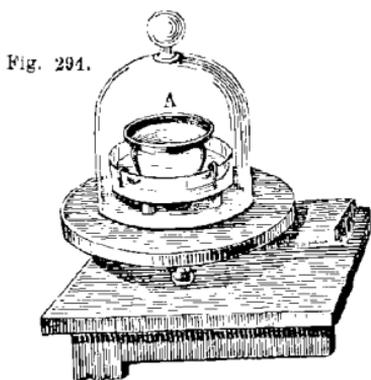


Fig. 294.

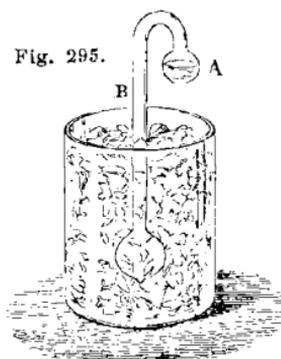


Fig. 295.

celle qui devient latente, sa température s'abaisse, et le refroidissement est d'autant plus grand, que l'évaporation est plus rapide.

Leslie est parvenu à congeler l'eau par le seul effet d'une vaporisation rapide. Pour cela, on place sous le récipient de la machine pneumatique un vase de verre contenant de l'acide sulfurique concentré, et au-dessus une petite capsule A de liège ou de gutta-percha (fig. 294), contenant quelques grammes d'eau. En faisant le vide, l'eau entre en ébullition (360), et les vapeurs étant absorbées par l'acide sulfurique à mesure qu'elles se dégagent, il se produit une vaporisation rapide qui amène bientôt la congélation de l'eau qui est dans la capsule.

On arrive au même résultat avec le *cryophore*, dû à Wollaston. C'est un tube de verre recourbé, terminé à ses extrémités par deux boules (fig. 295). Après y avoir introduit un peu d'eau et en avoir expulsé l'air par le même procédé que pour le tube de Donny (359), on fait passer l'eau dans la boule A, et on plonge l'autre dans un mélange réfrigérant. Les vapeurs dans le tube et dans la boule inférieure étant condensées par le froid, l'eau de la boule A entre en ébullition et en fournit de nouvelles. Cette production rapide de vapeur ne se faisant qu'avec disparition de chaleur, l'eau de la boule A se refroidit et se prend bientôt en une masse de glace.

Si l'on opère avec des liquides plus volatils que l'eau, particulièrement avec l'acide sulfureux, qui bout à -10 degrés, on produit un froid assez intense pour congeler le mercure. On fait cette expérience en enveloppant de coton une boule de verre pleine de mercure; puis, après l'avoir arrosée d'acide sulfureux, on la place sous la cloche de la machine pneumatique, et l'on fait le vide; bientôt le mercure est solidifié.

Thilorier, en dirigeant un jet d'acide carbonique liquide sur un thermomètre à alcool, a vu celui-ci descendre jusqu'à 100 degrés au-dessous de zéro, sans que l'alcool se congelât; mais avec un mélange de protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide et d'éther, Despretz a obtenu un froid assez intense pour amener l'alcool à l'état sirupeux épais (336).

Le froid produit par l'évaporation est utilisé, dans les pays chauds, pour rafraîchir l'eau au moyen d'*alcarazas*. On nomme ainsi des vases de terre assez poreux pour que l'eau filtre lentement à travers et vienne s'évaporer à la surface, surtout si on les place dans un courant d'air.

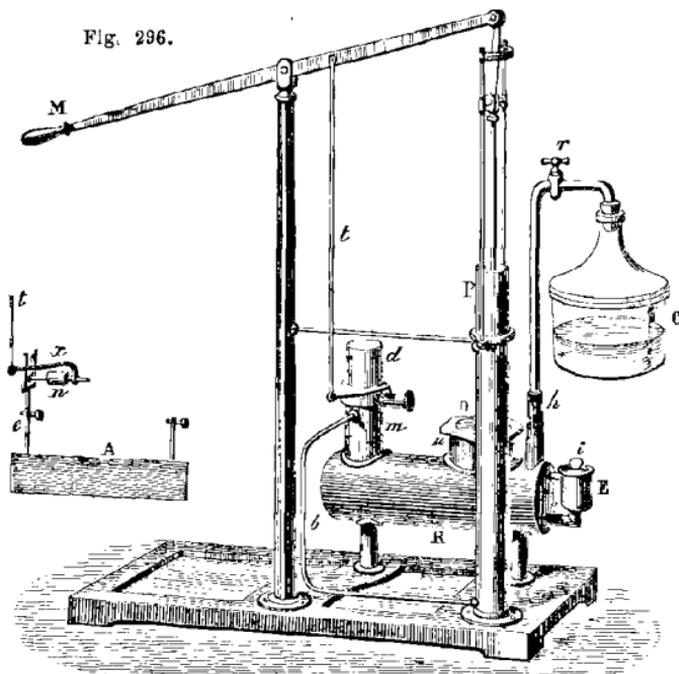
367. Congélateur de E. Carré. — La congélation de l'eau par le vide et l'acide sulfurique a reçu une application industrielle dans le congélateur de M. E. Carré. Cet appareil se compose d'un récipient R de plomb antimonié au vingtième (fig. 296). A une extrémité est un entonnoir E, qui sert à introduire l'acide; à l'autre, une tubulure *m*, sur laquelle est vissé un dôme *d*, qui soutient une série d'obstacles destinés à s'opposer à l'arrivée de l'acide sulfurique dans la tubulure *m* et dans le tube *b*. Sur le récipient sont en outre un regard *u* fermé par un obturateur de verre O, et une longue tubulure *h*, au sommet de laquelle s'adapte une carafe C, qui contient l'eau à congeler. Le dôme *d*, l'obturateur O et le bouchon *i* de l'entonnoir sont lutés à la cire jaune.

Sur le côté du récipient est une pompe à faire le vide P, communiquant avec lui par le tube *b*, et manœuvrée par un balancier M. A celui-ci est attachée une tige *t*, qui, par le mécanisme représenté sur la gauche de la figure, met en mouvement un agitateur A plongé dans l'acide sulfurique. Un levier *x*, lié à un axe horizontal qui traverse une petite boîte de laiton *n*, transmet son mouvement de va-et-vient à la tige *e* et à l'agitateur. Enfin, la boîte *n* est fermée hermétiquement à l'intérieur au moyen de disques de liège que traverse l'axe, et le tout est maintenu dans une tubulure fixée sur le côté de la tubulure *m*.

M. Carré construit plusieurs modèles de son congélateur. Dans le plus petit, représenté ci-après, le récipient, à moitié plein,

contient 2^k,500^{gr} d'acide sulfurique, et la carafe, au tiers pleine, 400 grammes d'eau. Après 70 coups de piston environ, l'eau entre en ébullition. Quoique la vapeur soit alors absorbée rapidement par l'acide, on continue à faire marcher la pompe jusqu'à ce que la congélation commence. Il suffit ensuite de donner,

Fig. 286.



de 5 en 5 minutes, quelques coups de piston. Avec de l'acide neuf, la congélation totale exige 45 minutes, mais ce temps augmente à mesure que l'acide se dilue. On peut congeler 12 carafes avec le même acide. La congélation opérée, pour retirer la glace, on ouvre le robinet *r*, mais seulement très-peu, sinon l'acide est refoulé dans les tubes; puis on ouvre la carafe, qui est formée de deux pièces à rebords épais, bien dressés et lutés à la cire.

LIQUÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ

368. **Liquéfaction des vapeurs, chaleur qui reparait.** — La *liquéfaction* ou *condensation des vapeurs* est leur retour à l'état liquide. Trois causes peuvent opérer la condensation : le refroidissement, la compression et l'affinité chimique. Les deux pre-

nières causes exigent que les vapeurs soient à l'état de saturation (345); mais la dernière produit la liquéfaction des vapeurs même les plus raréfiées. C'est ainsi qu'un grand nombre de sels absorbent, en la condensant, la vapeur d'eau de l'atmosphère, en quelque faible proportion qu'elle s'y trouve.

Lorsque les vapeurs se condensent, la force vive communiquée aux molécules pendant la vaporisation (365) est transformée pour reparaître en quantité équivalente, en chaleur sensible. On vérifie, en effet, par l'expérience, qu'un poids donné de vapeur qui se liquéfie reproduit une quantité de chaleur rigoureusement égale à celle qui a disparu pendant la vaporisation. Pour cela, on fait arriver un courant de vapeur à 100 degrés dans un vase d'eau froide. Celle-ci s'échauffant rapidement jusqu'à 100 degrés, la vapeur n'a rien perdu de sa chaleur sensible, et l'on constate que celle qu'elle a cédée à l'eau est la représentation fidèle de la chaleur consommée pendant la vaporisation (405). En un mot, dans la vaporisation, il y a perte de chaleur et production de force vive; dans la liquéfaction, perte de force vive et production de chaleur.

369. Distillation, alambics. — La *distillation* a pour objet de séparer un liquide volatil des substances fixes qu'il tient en dissolution, ou deux liquides inégalement volatils.

Les appareils employés pour la distillation se nomment *alambics*. Ils se composent de trois pièces principales : 1^o la *cucurbite* A (fig. 297), vase de cuivre rouge élamé, qui contient le liquide à distiller, et dont la partie inférieure est maçonnée dans un fourneau; 2^o le *chapiteau* B, qui se pose sur la cucurbite et donne issue à la vapeur par un col latéral C; 3^o le *serpentin* S, consistant en un long tuyau d'étain ou de cuivre élamé, enroulé en hélice, et placé dans une cuve remplie d'eau froide : l'objet du serpentin est de condenser la vapeur en la refroidissant.

S'agit-il de distiller, par exemple, de l'eau de puits ou de rivière pour la débarrasser des sels qu'elle tient en dissolution, et qui sont surtout du sulfate de chaux, du carbonate de chaux et des chlorures, on en remplit la cucurbite aux deux tiers environ, et l'on chauffe; l'eau entre en ébullition, et les vapeurs qui se dégagent vont se condenser dans le serpentin, d'où l'eau distillée provenant de la condensation se rend dans un récipient D, tandis que les matières fixes restent dans la cucurbite.

Les vapeurs qui se condensent échauffant rapidement l'eau de la cuve (368), il importe de renouveler cette eau constamment; sinon la condensation n'aurait plus lieu. A cet effet, un entonnoir, alimenté d'une manière continue par un courant d'eau froide, conduit celle-ci à la partie inférieure de la cuve, tandis que l'eau

chaude, qui est moins dense, se porte à la partie supérieure, et se déverse par un tube adapté au haut de la cuve.

La distillation ne doit pas être poussée trop loin, dans la crainte que l'eau renfermant des matières organiques, celles-ci ne soient décomposées sur les parois chaudes de la cucurbite et ne donnent naissance à des produits volatils.

L'eau distillée est parfaitement limpide et ne laisse aucun résidu

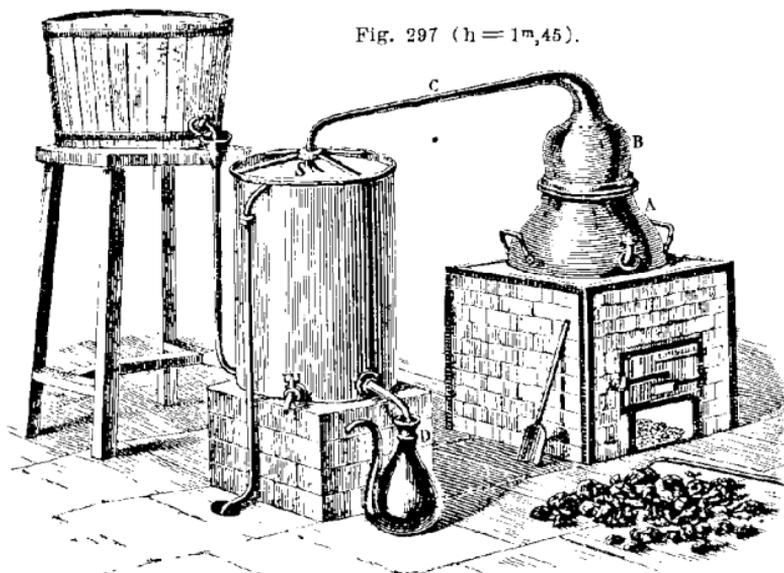


Fig. 297 (h = 1^m,45).

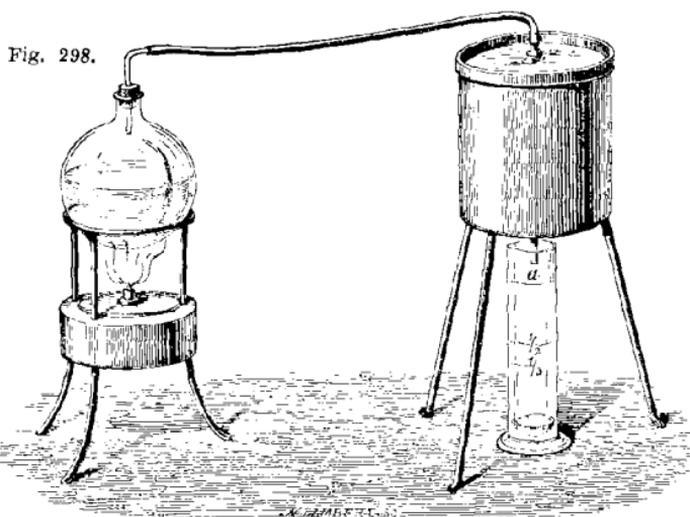
après son évaporation ; mais elle renferme toujours un peu d'acide carbonique, car ce gaz, existant dans toutes les eaux naturelles, ne s'en sépare qu'incomplètement par la distillation. On peut éviter la présence de ce gaz en mettant dans la cucurbite une certaine quantité de chaux qui se combine avec lui et le retient.

C'est par la distillation, à l'aide d'alambics analogues à celui décrit ci-dessus, qu'on extrait des vins l'alcool qu'ils contiennent.

370. **Alambic de Salleron pour l'essai des vins.** — M. Salleron a construit, pour déterminer la richesse alcoolique des vins et autres spiritueux, un appareil distillatoire, qui est une modification d'un appareil de même genre dû à Gay-Lussac. Il se compose d'un ballon de verre supporté par trois pieds, et chauffé à l'aide d'une lampe à alcool (fig. 298). Un tube met ce ballon en communication avec un serpentín placé dans un vase de cuivre plein d'eau froide, au-dessous duquel est une éprouvette qui reçoit le produit de la distillation. Sur l'éprouvette sont tracées trois divi-

sions : l'une, *a*, est destinée à marquer le volume de vin qu'on doit distiller; les deux autres, marquées $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{3}$, servent à évaluer le volume du liquide résultant de la distillation.

On commence par remplir l'éprouvette jusqu'en *a* du vin à essayer; puis, ayant versé le contenu dans le ballon, on met celui-ci en communication avec le serpentin. Chauffant alors avec la



lampe, le vin entre en ébullition, et la distillation s'opère. On la prolonge, pour les vins ordinaires, jusqu'à ce que le liquide distillé s'élève dans l'éprouvette à la division $\frac{1}{3}$, et à la division $\frac{1}{2}$ pour les vins très-alcooliques; car on peut admettre que tout l'alcool du vin est alors passé dans l'éprouvette. Enfin, on achève de remplir l'éprouvette d'eau distillée jusqu'en *a*, ce qui donne un liquide de même volume que celui du vin sur lequel on a expérimenté et également riche en alcool, mais débarrassé de toute substance étrangère. Il ne reste donc qu'à mesurer le degré de ce liquide avec l'alcoomètre de Gay-Lussac (111). A cet effet, l'appareil de M. Salleron est accompagné d'un alcoomètre de ce genre, d'un thermomètre et d'une table de correction.

On construit aussi des *thermomètres alcoométriques* destinés à faire connaître la richesse des vins en alcool d'après la température d'ébullition. Au sommet de la tige du thermomètre est le nombre 100, qui marque la température d'ébullition de l'eau, et les degrés inscrits au-dessous marquent les centièmes d'alcool pur contenu dans le liquide soumis à l'expérience.

371. **Absorption, tubes de sûreté.** — On nomme *absorption*, en chimie, un accident qui se produit dans les appareils qui servent à la préparation des gaz, et qui consiste, lorsque ceux-ci sont recueillis sur l'eau ou sur le mercure, en ce que ces liquides pénètrent dans les appareils et font manquer l'opération.

Cet accident a pour cause l'excès de la pression atmosphérique sur la tension du gaz dans l'appareil. Soit, en effet, un gaz se dégageant d'un matras *m* (fig. 299), et se rendant dans une éprouvette *A* remplie d'eau. Tant que le gaz se dégage activement, sa tension l'emporte sur la pression atmosphérique et sur le poids de la colonne d'eau *on*; l'eau de l'éprouvette ne peut donc s'élever dans le tube, et l'absorption est impossible.

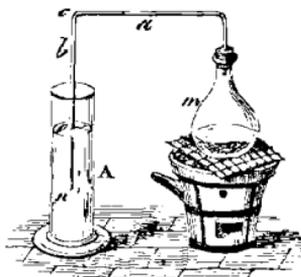


Fig. 299.

Mais si la tension décroît, parce que le dégagement se ralentit, ou parce que le matras s'est refroidi, la pression extérieure l'emporte, et lorsque l'excès de cette pression sur la pression intérieure surpasse le poids de la colonne d'eau *co*,

Fig. 300.

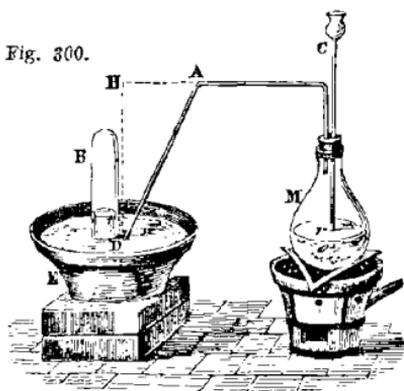
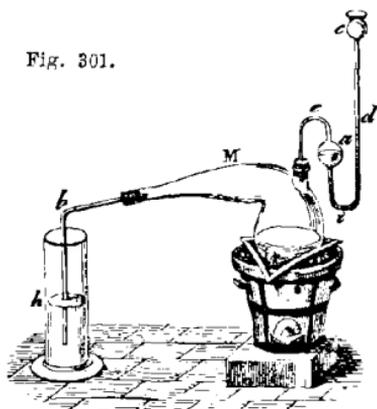


Fig. 301.



l'eau pénètre dans le matras, et l'opération est manquée. On prévient cet accident au moyen des *tubes de sûreté*.

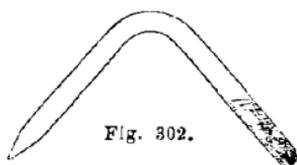
On nomme ainsi des tubes destinés à prévenir l'absorption, en laissant rentrer l'air dans les appareils, à mesure que la tension intérieure décroît. Le tube de sûreté le plus simple consiste en un tube *Co* (fig. 300), traversant le bouchon qui ferme le matras *M* dans lequel le gaz se produit, et plongeant de quelques centi-

mètres dans le liquide contenu dans ce matras. Quand la tension du gaz diminue dans le vase M, la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau de la cuve E, la fait monter à une certaine hauteur dans le tube DA; mais cette pression, s'exerçant aussi dans le tube Co, tend à déprimer d'autant le liquide qui est dans ce tube, en admettant que ce liquide ait sensiblement la même densité que l'eau de la cuve E. Or, comme la distance *or* est moindre que la hauteur DH, l'air rentre par l'orifice *o*, avant que l'eau de la cuve s'élève jusqu'en A, et il n'y a pas absorption.

Le tube Co sert aussi à prévenir les explosions : lorsque la production du gaz est trop rapide, et que le tube AD ne peut suffire au dégagement, le liquide est refoulé à l'extérieur et s'échappe par le tube C, qui devient lui-même une issue pour le gaz aussitôt que le niveau s'est abaissé au-dessous de l'orifice *o*.

La figure 301 représente une autre espèce de tube de sûreté, connu sous le nom de *tube en S*. Ce tube possède une boule *a*, contenant une certaine quantité de liquide, ainsi que la branche *id*. Lorsque la tension du gaz, dans la cornue M, surpasse la pression atmosphérique, le niveau dans la branche *id* s'élève plus haut que dans la boule *a*; si le gaz a une tension d'une atmosphère, le niveau est le même dans le tube et dans la boule. Enfin, si la tension du gaz est moindre que la pression atmosphérique, le niveau baisse dans la branche *di*; et comme on a soin que la hauteur *ai* soit moindre que *bh*, aussitôt que l'air entré par la boule *c* est arrivé dans la partie courbe *i*, il soulève la colonne *ai* et pénètre dans la cornue avant que l'eau de l'éprouvette se soit élevée jusqu'en *b*; dès lors la tension intérieure devient égale à la pression extérieure, et l'absorption ne peut avoir lieu.

372. Liquéfaction des gaz. — Les gaz, n'étant autre chose que des vapeurs très-raréfiées, sont, comme elles, susceptibles d'être



liquéfiés. Mais étant très-loin de leur point de liquéfaction, on ne peut les y ramener que par une pression ou un refroidissement plus ou moins considérable. Pour quelques-uns, la compression seule ou le refroidissement suffit; pour la plupart, ces deux procédés de liquéfaction doivent être employés simultanément. Peu de gaz ont résisté à ces deux actions combinées, et l'on doit admettre que ceux qui n'ont pu être liquéfiés (129) le seraient si on les soumettait à une pression et à un refroidissement suffisants.

Davy et Faraday ont liquéfié un grand nombre de gaz regardés jusqu'alors comme permanents. Leur procédé consiste à renfer-

mer dans un tube de verre recourbé en siphon (fig. 302) des substances qui, par leur réaction chimique, donnent naissance au gaz qu'il s'agit de comprimer; de sorte que ces substances étant contenues dans l'une des branches du siphon, le gaz, à mesure qu'il se dégage, vient se comprimer lui-même et se liquéfier dans l'autre branche, qu'on plonge dans un mélange réfrigérant. Les deux physiciens ont ainsi liquéfié le chlore, l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque et l'acide carbonique.

373. **Liquéfaction et solidification de l'acide carbonique.** — L'acide carbonique ne pouvant être amené à l'état liquide que par une pression considérable, sa liquéfaction ne doit s'opérer que dans des appareils spéciaux, présentant la plus grande solidité.

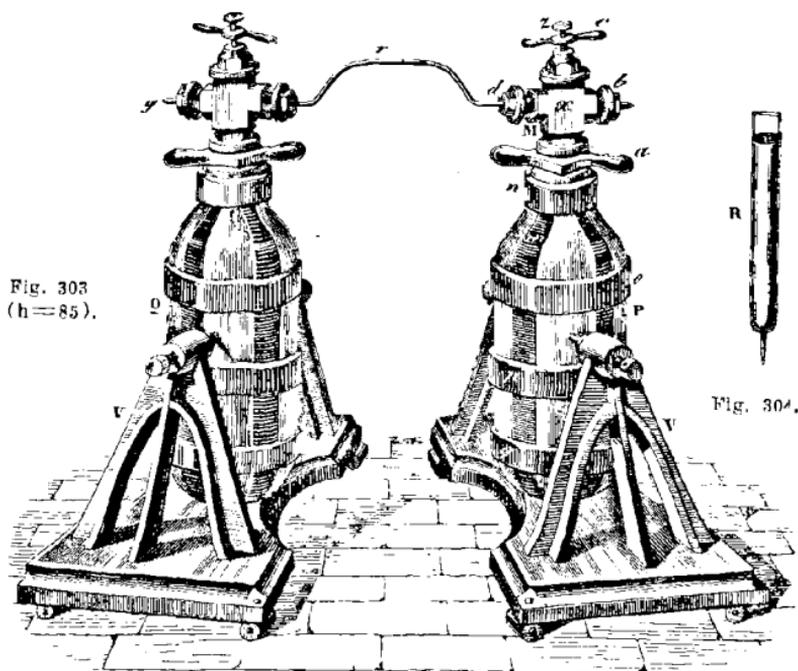


Fig. 303
(h = 85).

Fig. 304.

Le premier appareil de ce genre a été construit par Thilorier. La figure 303 représente l'appareil de Thilorier modifié par Deleuil.

Cet appareil se compose de deux réservoirs cylindriques P et Q entièrement semblables, mobiles, dans un plan vertical, autour de deux pivots soutenus par des châssis de fonte V, V. Ces réservoirs, qui sont de fonte et d'une capacité de 6 litres, ont une épaisseur de 3 centimètres; dans le sens de leur longueur, ils portent quatre

nervures ayant 1 centimètre de saillie sur le reste de la paroi et une largeur de 8 centimètres. Pour donner à l'appareil toute la résistance nécessaire, des bandes de fer doux *m*, partant du haut des cylindres, s'emboîtent dans le creux formé par deux nervures consécutives, s'enroulent sur le fond inférieur qui est hémisphérique, puis reviennent sur l'autre face se terminer à l'extrémité d'où elles sont parties. Enfin, ces bandes sont fortement maintenues par quatre cercles *n*, *o*, *p*, *q*, aussi de fer doux. Avant de mettre ces cercles en place, on les porte à la température rouge, en sorte qu'en se refroidissant ils exercent par leur contraction une pression considérable sur les bandes et sur les cylindres.

Sur la tête de chaque cylindre est un robinet M, formé de plusieurs pièces. Une clef *a* sert à le serrer fortement dans un écrou taraudé dans la masse de fonte. Dans le robinet est un conduit vertical qui se bifurque en *x* vers *b* et vers *d*, et met ainsi l'intérieur du cylindre en communication avec deux orifices pratiqués en *b* et en *d*, dont on n'ouvre jamais qu'un seul à la fois. Une vis *z*, qui se serre à l'aide d'une clef *c*, est destinée à fermer le conduit intérieur avant sa bifurcation en *x*. Pour cela, elle comprime une balle de plomb qui ferme hermétiquement l'orifice du conduit. C'est de la même manière que sont fermés les orifices *d* et *b*.

Les deux cylindres étant identiques, on prend l'un pour générateur de l'acide carbonique; l'autre sert de récipient pour sa liquéfaction. Soit P le générateur; le robinet M étant enlevé, on introduit dans le cylindre 1 800 grammes de bicarbonate de soude, 3 litres d'eau chauffée à 39°, et 1 kilogramme d'acide sulfurique. Afin que ce dernier ne décompose pas tout de suite le bicarbonate de soude, on le verse dans un long tube de cuivre rouge R (fig. 304), et on place ce tube, qui reste ouvert à l'extrémité supérieure, dans le cylindre P. Cela fait, on remet le robinet M, qu'on serre fortement; puis, l'ayant fermé, on incline doucement le cylindre, en le faisant tourner sur ses deux pivots, de manière qu'une petite quantité d'acide sulfurique se déverse du vase R et tombe sur le bicarbonate. On incline ainsi successivement l'appareil, mais à plusieurs reprises, jusqu'à ce que tout l'acide soit déversé.

En 7 minutes la réaction chimique est terminée. L'acide carbonique qui s'est produit dans le générateur est alors en partie liquéfié et mélangé à l'eau qui a servi à sa préparation. Mais si l'on fait communiquer le récipient Q au générateur par un tube de cuivre *r*, à petit diamètre, et si l'on desserre la vis *d*, l'acide carbonique distille dans le récipient, où il se liquéfie de nouveau par sa propre pression. La pression qui a lieu alors dans le récipient est de 50 atmosphères, la température étant de 15 degrés. En re-

commençant cinq ou six fois la même opération, on condense dans le récipient jusqu'à deux litres d'acide carbonique liquide.

Pour l'obtenir solide, le robinet du récipient Q porte, à sa partie inférieure, une tubulure qui plonge dans l'acide liquide. Par suite, lorsqu'on ouvre un orifice *g* placé sur le côté du robinet, par l'effet de la pression qu'il supporte, l'acide carbonique liquide jaillit avec force, en repassant aussitôt à l'état aériforme. Mais une partie du liquide seulement se gazéifie; car la chaleur disparue pendant ce changement d'état est si considérable (405), que l'autre partie du liquide se solidifie en flocons blancs, cristallisés sous forme filamenteuse. On recueille ces flocons dans une boîte sphérique de laiton mince, dont chaque hémisphère est muni

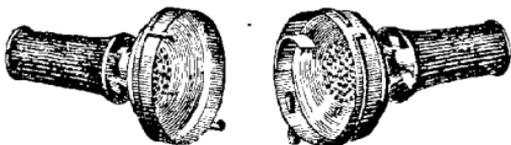


Fig. 305.

d'une tubulure garnie de feutre épais, laquelle sert de poignée (fig. 305). L'acide carbonique liquide arrive par un tube qui pénètre à l'intérieur tangentiellement à la paroi. A la sortie de ce tube, le jet vient frapper sur une petite lame *a*, qui le divise et accélère la vaporisation. La portion qui se gazéifie se dégage par de petits trous *m*, *n*, et par les tubulures qui servent de poignées, tandis que celle qui se solidifie s'agglomère dans l'intérieur de la boîte. Un thermomètre à alcool placé dans le jet descend jusqu'à -93 degrés.

L'acide carbonique solide ne se vaporise que très-lentement. On peut constater, au moyen d'un thermomètre à alcool, que sa température est d'environ -78 degrés. Cependant, placé sur la main, il n'y produit pas une sensation de froid aussi vive qu'on pourrait le penser, ce qui provient de ce qu'il n'y a pas contact parfait; mais si on le mélange avec de l'éther, le froid est tellement intense, qu'un flocon d'acide carbonique solide placé sur les chairs désorganise les tissus, comme le ferait une vive brûlure. Un pareil mélange solidifie en quelques secondes quatre fois son poids de mercure. En y plongeant un tube plein d'acide carbonique liquide, Faraday a pu solidifier ce dernier en une masse compacte présentant la transparence d'un morceau de glace.

Par un refroidissement de -90° , obtenu au moyen de la vaporisation du gaz ammoniac liquéfié, Drion et Lenoir ont liquéfié l'acide carbonique à la pression d'une atmosphère.

374. **Liquéfaction du protoxyde d'azote.** — Dans l'appareil de Thilorier, c'est le gaz qui se comprime lui-même en se produisant en quantité suffisante. Or tous les gaz ne s'obtiennent pas dans

des conditions convenables pour pouvoir se liquéfier ainsi par leur propre pression. Il faut alors avoir recours à une pression artificielle : c'est ainsi que Natterer a liquéfié plusieurs gaz en les comprimant dans un canon de fusil à l'aide d'une pompe foulante.

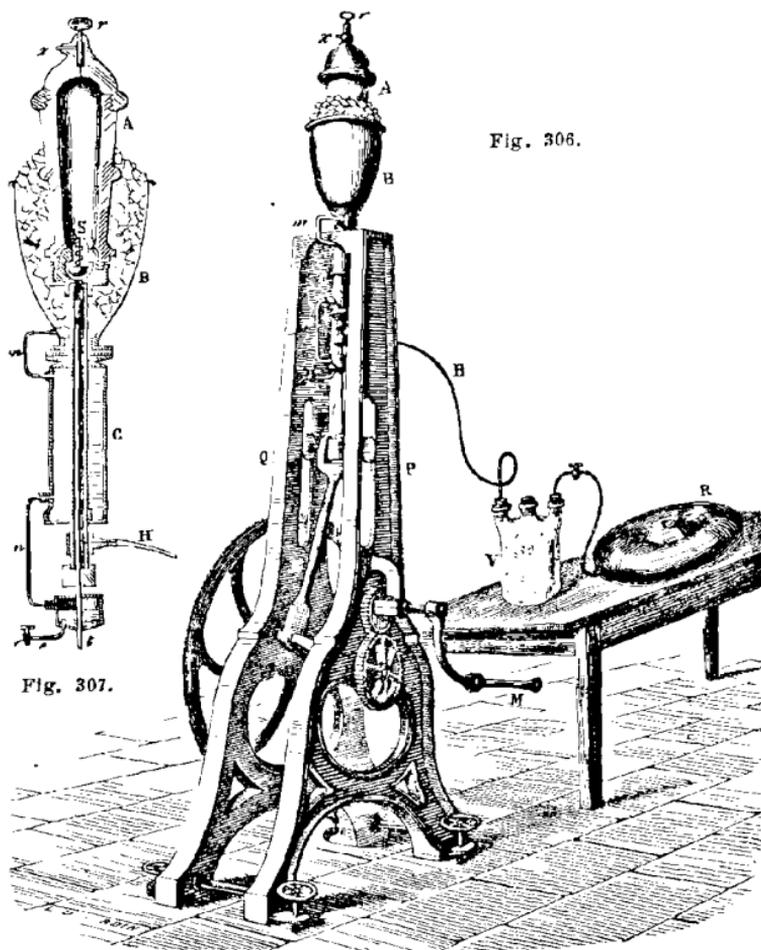


Fig. 306.

Fig. 307.

M. Bianchi a modifié l'appareil de Natterer et lui a donné la forme représentée en perspective dans la figure 306, et en coupe, sur une plus grande échelle, dans la figure 307. Cet appareil se compose d'un réservoir A, de fer forgé, d'une capacité de 7 à 8 décilitres, et pouvant résister à des pressions de 600 atmosphères. A sa partie inférieure est vissée une pompe foulante. La tige *t* de

son piston reçoit son mouvement de va-et-vient d'une bielle E, et d'une manivelle M. La compression du gaz et le frottement du piston donnant lieu à un grand dégagement de chaleur, on entoure le réservoir A d'une cuvette B, dans laquelle est de la glace; de plus, l'eau provenant de la fusion de la glace se rend par une tubulure *m* dans un manchon de cuivre C, qui enveloppe la pompe foulante, et de là s'écoule par une seconde tubulure *n* et un robinet *o*. Enfin, tout le système est monté sur un châssis de fonte PQ.

Le gaz à liquéfier est recueilli d'avance dans des poches imperméables R, d'où il se rend dans un vase V plein de chlorure de calcium, puis à la pompe foulante, par un tube de caoutchouc H. Lorsqu'on a fait marcher l'appareil un certain temps, on dévisse le réservoir de dessus la pompe, et cela sans que le gaz liquéfié puisse s'échapper, le réservoir A se trouvant hermétiquement fermé par une soupape S (fig. 307). Pour recueillir le liquide contenu dans le réservoir, on retourne celui-ci et l'on desserre un bouchon à vis *r*, qui donne issue au liquide par une tubulure α .

La liquéfaction la plus remarquable obtenue à l'aide de cet appareil est celle du protoxyde d'azote. Une fois liquéfié, ce gaz, quoique en vase ouvert, ne se vaporise que lentement et se maintient à une température fixe de 88 degrés au-dessous de zéro. Le mercure qu'on y projette en petite quantité se congèle aussitôt. Il en est de même de l'eau; mais il faut la verser goutte à goutte, sinon la chaleur latente de ce liquide étant beaucoup plus grande que celle du mercure (404), la chaleur cédée par l'eau, au moment de sa congélation, peut faire détoner le protoxyde d'azote.

Le protoxyde d'azote, étant facilement décomposé par la chaleur, a, comme on sait en chimie, la propriété d'entretenir la combustion presque aussi vivement que l'oxygène. Or il conserve encore cette propriété à l'état liquide, malgré sa basse température. En effet, si l'on y projette un petit morceau de charbon incandescent, celui-ci brûle aussitôt avec un vif éclat.

MÉLANGES DES GAZ ET DES VAPEURS

375. Lois des mélanges des gaz et des vapeurs. — Tout mélange d'un gaz et d'une vapeur présente les deux lois suivantes :

1^o *La tension et, par suite, la quantité de la vapeur qui sature un espace donné sont les mêmes, à température égale, soit que cet espace soit vide, soit qu'il contienne un gaz.*

2^o *La force élastique du mélange égale la somme des forces élastiques du gaz et de la vapeur mélangés, le gaz étant rapporté à son volume primitif.*

Ces lois, connues sous le nom de *lois de Dalton*, qui les a fait

connaitre, se démontrent au moyen d'un appareil dû à Gay-Lussac, et consistant en un tube de verre A (fig. 308), mastiqué par ses deux extrémités à deux robinets de fer *b* et *d*. Au-dessus du robinet *d* est une tubulure latérale qui met en communication le tube A avec un second tube B d'un plus petit diamètre. Une échelle placée entre ces deux tubes mesure la hauteur des colonnes de mercure contenues dans chacun.

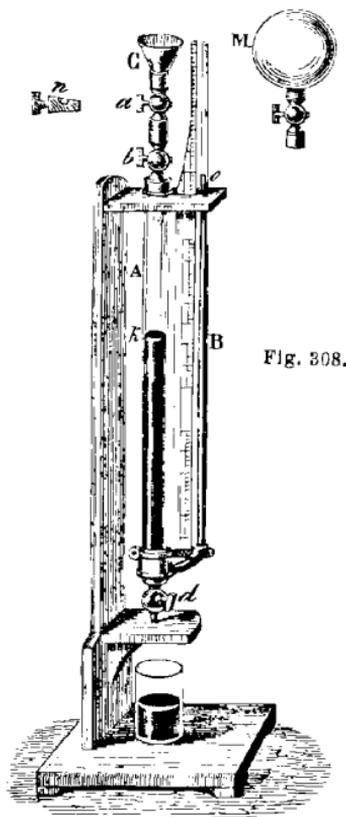


Fig. 308.

Le tube A étant rempli de mercure sec, et les robinets *b* et *d* fermés, on visse sur le robinet *b*, à la place de l'entonnoir C, un ballon de verre M fermé lui-même par un robinet, et rempli d'air desséché, ou de tout autre gaz. Puis, ouvrant les trois robinets, on laisse écouler du tube A une partie du mercure, qui est remplacée par l'air sec du ballon. On ferme alors les robinets, et comme l'air qui est dans l'espace A s'est dilaté en sortant du ballon, il est à une pression moindre que la pression atmosphérique; on l'y ramène en versant du mercure dans le tube B, jusqu'à ce que le niveau soit le même dans les deux tubes. Enfin, on enlève le ballon et son robinet, et l'on met à la place un entonnoir C, muni lui-même d'un

robinet *a*, qui diffère des robinets ordinaires. En effet, il n'est pas percé de part en part, mais porte seulement une petite cavité, ainsi qu'on le voit en *n*. Ayant versé dans l'entonnoir C le liquide qu'on veut vaporiser, noté le niveau *k* du mercure et ouvert le robinet *b*, on tourne le robinet *a* de manière que sa cavité se remplisse; puis on le retourne, afin que le liquide pénètre dans l'espace A et s'y vaporise. On continue à faire tomber ainsi le liquide goutte à goutte, jusqu'à ce que l'air qui est dans le tube soit saturé de vapeur; ce qu'on reconnaît quand le niveau *k* du mercure cesse de s'abaisser (345).

Comme la tension de la vapeur qui s'est produite dans l'espace A s'est ajoutée à celle de l'air qui y était déjà, le volume

du gaz a augmenté; on le ramène au volume primitif en versant de nouveau du mercure dans le tube B. Lorsque le mercure est ainsi remonté dans le gros tube au niveau k qu'il avait d'abord, on observe dans les tubes B et A une différence de niveau B_0 , qui représente la tension de la vapeur qui s'est produite; car l'air ayant repris son premier volume, sa tension n'a pas changé. Or, si l'on fait passer dans le vide d'un tube barométrique quelques gouttes du même liquide introduit en A, on observe une dépression précisément égale à B_0 ; donc, à température égale, la tension de la vapeur saturée et, par suite, sa densité sont les mêmes dans le vide et dans les gaz.

La seconde loi se trouve démontrée par l'expérience ci-dessus; car, lorsque le mercure a repris son niveau k , le mélange supporte la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube B, plus le poids de la colonne de mercure B_0 . Or ces deux pressions représentent, l'une la tension de l'air sec, et l'autre la tension de la vapeur. Du reste, la seconde loi découle de la première.

L'appareil de Gay-Lussac ne permet d'expérimenter qu'à la température ordinaire; mais M. Regnault, au moyen d'un appareil qui peut être porté à différentes températures, a comparé successivement, dans l'air et dans le vide, les tensions des vapeurs d'eau, d'éther, de sulfure de carbone et de benzine, et il a constamment observé que la tension dans l'air est plus faible que dans le vide. Toutefois les différences sont tellement petites, qu'elles n'infirment pas la loi de Dalton et de Gay-Lussac; aussi M. Regnault pense-t-il qu'on doit continuer à admettre cette loi comme rigoureuse théoriquement, attribuant les petites différences qu'il a constatées à l'affinité hygroscopique des tubes.

378. **Problèmes sur les mélanges des gaz et des vapeurs.** — I. Étant donné un volume d'air sec V , à la pression H , on demande quel sera son volume V' quand il sera saturé, la température et la pression restant les mêmes.

Si l'on représente par F la force élastique de la vapeur qui sature l'air, celui-ci, dans le mélange, est seulement soumis à la pression $H - F$ (375, 2°). Or, d'après la loi de Mariotte, les volumes V et V' étant en raison inverse des pressions qu'ils

supportent, on a
$$\frac{V'}{V} = \frac{H}{H - F}, \text{ d'où } V' = \frac{VH}{H - F}.$$

II. Étant donné un volume d'air saturé V , à la pression H et à la température t , quel sera son volume V' , aussi saturé, à la pression H' et à la température t' ?

Si l'on représente par f la tension maximum de la vapeur à t degrés, et par f' la tension maximum à t' degrés, l'air seul, dans chacun des mélanges V et V' , sera soumis respectivement aux pressions $H - f$ et $H' - f'$. En supposant d'abord la température constante, on aura donc, d'après la loi de Mariotte,

$$V' = \frac{V(H - f)}{H' - f'} \text{ à } t \text{ degrés, d'où } V' = \frac{V(H - f)}{(H' - f')(1 + \alpha t)} \text{ à zéro (321);}$$

$$\text{donc, à } t' \text{ degrés, } V' = \frac{V(H - f)(1 + \alpha t')}{(H' - f')(1 + \alpha t)}.$$

III. On demande le poids P d'un volume d'air V , saturé de vapeur d'eau, à la température t et à la pression H , la densité de la vapeur étant $\frac{5}{8}$.

Pour résoudre cette question, observons que le volume V d'air saturé est en réalité un mélange de V litres d'air sec à t degrés, à la pression H moins celle de la vapeur, et de V litres de vapeur saturée à t .

Or, si l'on représente par F la tension de la vapeur, la pression de l'air considéré seul sera $H - F$, et le problème est ainsi ramené à chercher : 1° le poids de V litres d'air sec à t degrés et à la pression $H - F$; 2° le poids de V litres de vapeur saturée à t degrés et à la pression F .

Pour résoudre la première partie du problème, on sait qu'un litre d'air sec à zéro et à la pression 76 pèse $1\text{r},293$, et qu'à t degrés et à la pression $H - F$ il pèse $\frac{1\text{r},293 (H - F)}{(1 + \alpha t) 76}$ (321, prob. vi); donc V litres d'air pèsent

$$\frac{1\text{r},293 V (H - F)}{(1 + \alpha t) 76} \quad [1].$$

Enfin, pour obtenir le poids de la vapeur, il faut d'abord chercher le poids d'un même volume d'air sec, à la même température et à la même pression, puis le multiplier par la densité de la vapeur (321, prob. vii). Or V litres d'air sec, à t degrés et à la pression F , pesant $\frac{1\text{r},293 V \times F}{(1 + \alpha t) 76}$, V litres de vapeur, dont la densité est $\frac{5}{8}$, pèsent $\frac{1\text{r},293 V \times F \times 5}{(1 + \alpha t) 76 \times 8}$ [2].

Donc, enfin, le poids cherché P égalant la somme des poids [1] et [2], on a

$$P = \frac{1\text{r},293 V (H - F)}{(1 + \alpha t) 76} + \frac{1\text{r},293 V \times F \times 5}{(1 + \alpha t) 76 \times 8} = \frac{1\text{r},293 V}{(1 + \alpha t) 76} \left(H - \frac{3}{8} F \right).$$

* ÉTAT SPHÉROÏDAL.

377. **Expériences de Boutigny.** — Les liquides versés sur des surfaces métalliques incandescentes présentent des phénomènes remarquables, observés pour la première fois par Leidenfrost, il y a plus d'un siècle, et étudiés ensuite par quelques physiciens; mais c'est Boutigny qui a fait connaître les expériences curieuses dont nous allons exposer les principales.

Ayant chauffé jusqu'au rouge une capsule d'argent ou de platine, à parois épaisses, si l'on y verse quelques grammes d'eau au moyen d'une pipette, on remarque que le liquide ne s'étale pas dans la capsule et ne la mouille pas, comme il le ferait à la température ordinaire, mais qu'il prend la forme d'un globule aplati, ce que Boutigny exprime en disant que le liquide passe à l'état *sphéroïdal*. A cet état, l'eau est animée d'un mouvement gyrateur rapide sur le fond de la capsule, et non-seulement elle n'entre pas en ébullition, mais elle se vaporise 50 fois plus lentement que s'il y avait ébullition. Enfin, si la capsule se refroidit, il vient un moment où elle n'est plus assez chaude pour maintenir l'eau à l'état sphéroïdal. Ses parois sont alors mouillées par le liquide, et une ébullition violente se manifeste tout à coup.

Tous les liquides peuvent prendre l'état sphéroïdal, et la température nécessaire pour que le phénomène se produise est d'autant plus élevée, que le point d'ébullition du liquide l'est lui-même davantage. Pour l'eau, la capsule doit être chauffée au moins à 200 degrés; pour l'alcool, à 134.

Boutigny a observé que la température des liquides à l'état sphéroïdal est

constamment inférieure à celle de leur ébullition. L'eau, par exemple, reste à 95°,5; l'alcool, à 75°,5; l'éther, à 34°; l'acide sulfureux, à — 10°,5. Mais la température de la vapeur qui se dégage est égale à celle de la capsule, d'où l'on doit conclure que cette vapeur ne se produit pas dans la masse du liquide.

Cette propriété des liquides à l'état sphéroïdal, de se maintenir à une température inférieure à celle de leur point d'ébullition, a conduit Boutigny à une expérience remarquable, celle de la congélation de l'eau dans une capsule incandescente. Ce physicien chauffe au rouge blanc une capsule de platine et y verse quelques grammes d'acide sulfureux anhydre. Ce liquide, qui ne bout qu'à — 10 degrés, se comporte dans la capsule comme on l'a vu ci-dessus, c'est-à-dire que sa température s'abaisse au-dessous de — 10 degrés. Si alors on ajoute à l'acide sulfureux une petite quantité d'eau, celle-ci, refroidie par l'acide, se congèle instantanément, et la capsule étant encore rouge, on en retire, non sans étonnement, un morceau de glace.

À l'état sphéroïdal, il n'y a point contact entre le liquide et le corps chaud. Boutigny s'en est assuré en faisant rougir une plaque d'argent disposée bien horizontalement, et en versant dessus un gramme d'eau colorée en noir. Ce liquide passe à l'état sphéroïdal; or, si l'on place la flamme d'une bougie à une certaine distance sur le prolongement de la plaque, on distingue nettement et d'une manière continue cette flamme entre le sphéroïde d'eau et la plaque. On conclut de là que le liquide se maintient à une petite distance de celle-ci, ou qu'il fait des vibrations assez rapides pour que l'œil ne puisse les distinguer.

Pour expliquer les phénomènes que présentent les liquides à l'état sphéroïdal, on admet que le globule liquide est soutenu à distance du vase par la tension de la vapeur qui se produit à sa surface, en sorte que le liquide, n'étant pas chauffé par contact, mais seulement par rayonnement, ne se vaporise que lentement, surtout si l'on observe que l'eau étant diathermane pour les rayons émis d'une source intense (439), une grande partie de la chaleur rayonnante la traverse sans l'échauffer. Boutigny pense que la cause qui empêche le liquide de mouiller le métal est une force répulsive qui serait d'autant plus intense que la température est plus élevée. Cette hypothèse s'accorde avec l'expérience suivante de Perkins, en Angleterre. Un robinet ayant été posé sur un générateur de vapeur, au-dessous du niveau de l'eau, le liquide ne s'écoulait pas par le robinet lorsque les parois du générateur étaient portées à une très-haute température, quoique la pression intérieure fût considérable; mais, à une température moins élevée, le liquide jaillissait avec force.

* DENSITÉS DES VAPEURS

378. Méthode de Gay-Lussac. — La densité d'une vapeur est le rapport entre le poids d'un certain volume de cette vapeur et celui d'un même volume d'air à température et à tension égales.

Deux méthodes ont été suivies pour déterminer les densités des vapeurs : la première, due à Gay-Lussac, est applicable aux liquides qui entrent en ébullition au-dessous de 100 degrés ou peu au-dessus; la seconde, due à M. Dumas, permet d'opérer à des températures qui peuvent aller jusqu'à 360 degrés environ.

La figure 309 représente l'appareil de Gay-Lussac. Il se compose d'une marmite de fonte remplie de mercure dans lequel plonge un manchon de verre M. Celui-ci est plein d'eau ou d'huile, dont la température est indiquée par un thermomètre T. Dans l'intérieur du manchon est une cloche C graduée en litres et fractions de litre.

Pour expérimenter avec cet appareil, on introduit le liquide à vaporiser dans une petite ampoule de verre comme celle qui est représentée en A, à gauche de la figure; fermant ensuite cette ampoule à la lampe, on la pèse, et en re-

tranchant du poids obtenu celui de l'ampoule quand elle était vide, on a le poids du liquide introduit. Ayant rempli la cloche C de mercure, on y fait passer l'ampoule, et on chauffe graduellement jusqu'à ce que l'eau du manchon atteigne une température supérieure de quelques degrés à celle à laquelle le liquide de l'ampoule entre en ébullition. Celle-ci éclate alors par la vaporisation du liquide qu'elle contient, et la tension de la vapeur déprime le mercure dans la cloche, comme on le voit dans la figure. Il importe que l'ampoule soit assez petite pour

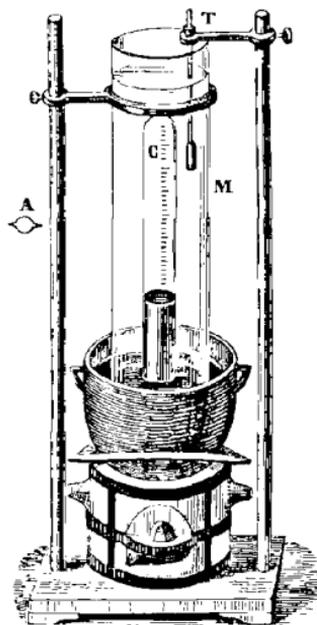


Fig. 309.

que tout le liquide qu'on y a introduit soit réduit en vapeur. C'est ce qui a lieu lorsque le bain ayant atteint la température d'ébullition du liquide de l'ampoule, le niveau du mercure est cependant un peu plus haut à l'intérieur de la cloche qu'à l'extérieur. Cela montre, en effet, qu'il ne reste pas, sous la cloche, de liquide non vaporisé; car alors le niveau intérieur serait le même qu'à l'extérieur (360). On est donc certain que le poids du liquide qui était dans l'ampoule représente exactement le poids de la vapeur qui s'est formée dans la cloche C. Quant au volume de cette vapeur, il est connu au moyen de l'échelle graduée qui est sur la cloche. Sa température est donnée par le thermomètre T, et la pression égale la hauteur du baromètre, moins celle du mercure qui reste dans la cloche.

Après avoir ainsi déterminé le volume v de la vapeur en litres, son poids p en grammes, sa température t , et sa pression $H-h$, H étant la hauteur du baromètre et h celle du mercure dans la cloche, il reste à calculer le poids p' d'un même volume d'air à t degrés et à la pression $H-h$.

1 litre d'air à zéro et à la pression $0^m,76$ pèsent $1^r,293$, v litres pèsent $1^r,293 \times v$. Mais on a vu (321, prob. VI) qu'on passe du poids à zéro

au poids à t degrés en divisant par $1 + \alpha t$, α étant le coefficient de dilatation de l'air; donc v litres d'air, à t degrés et encore à la pression $0^m,76$, pèsent $\frac{1^r,293 \times v}{1 + \alpha t}$.

Enfin, d'après la loi de Mariotte, le poids de l'air à la pression $H-h$ se déduit du poids à la pression $0^m,76$, en multipliant par $\frac{H-h}{0^m,76}$. Donc le poids p' de l'air sous le même volume que la vapeur, et à température et à pression égales, est $\frac{1^r,293 \times v (H-h)}{(1 + \alpha t) \times 0^m,76}$. Par conséquent, on a, pour la densité cherchée,

$$D = \frac{p}{p'} = \frac{p(1 + \alpha t) 0^m,76}{1^r,293 v (H-h)}$$

379. Méthode de M. Dumas. — Le procédé que nous venons de décrire n'est pas applicable aux liquides dont le point d'ébullition surpasse 150 ou 160 degrés. En effet, pour porter à cette température l'huile dont on remplit alors le manchon, il faut chauffer le mercure qui est dans la marinite à un degré beaucoup plus élevé, auquel il se dégage des vapeurs mercurielles dont la tension, sous la cloche, s'ajoute à celle de la vapeur sur laquelle on expérimente, ce

qui serait une cause d'erreur. Elle disparaît dans le procédé suivant dû à M. Dumas.

L'appareil consiste en un ballon de verre d'un demi-litre de capacité environ, dont on a étiré le col en pointe effilée. Après l'avoir desséché à l'intérieur et à l'extérieur, on en prend le poids quand il est plein d'air sec à la pression H et à la température ambiante t . Puis, y ayant introduit le liquide dont on cherche la densité de vapeur, on plonge le ballon dans un bain d'eau saturée de sel, ou dans un bain d'huile de pied de bœuf ou d'alliage de Darcet, suivant la température d'ébullition de la substance qui est dans le ballon (fig. 310).

Afin de maintenir celui-ci dans le bain, on fixe, sur l'une des anses de la marmite qui contient le bain, une tige de fer, le long de laquelle peut glisser un support de même métal. Ce support porte deux anneaux entre lesquels est placé le ballon. Sur l'autre anse, une tige semblable à la première porte un thermomètre à poids D .

Ayant plongé le ballon et le thermomètre dans le bain, on chauffe au delà de la température d'ébullition de la substance qui est dans le ballon. La vapeur, en se dégageant, chasse l'air qui est dans l'appareil. Au moment où cesse le jet de vapeur, ce qui a lieu lorsque tout est vaporisé, on ferme à la lampe, avec un chalumeau, la pointe effilée du ballon, en ayant soin de noter aussitôt la température t' du bain et la hauteur H' du baromètre. Enfin, lorsque le ballon est refroidi et essuyé avec soin, on le pèse de nouveau. Soit la deuxième pesée supérieure à la première d'une quantité Q , qui représente l'excès du poids de la vapeur contenue dans le ballon, à la température t' et à la pression H' , sur le poids de l'air qui y était contenu à t degrés et à la pression H .

Pour avoir ce dernier poids, il faut d'abord déterminer le volume du ballon à zéro. Pour cela, on plonge la pointe effilée dans le mercure, et on en brise l'extrémité avec une pince. Comme la vapeur s'est condensée, le vide s'est fait dans le ballon; d'où il résulte que le mercure s'y précipite par l'effet de la pression atmosphérique, et le remplit complètement si tout l'air en a été expulsé. C'est en versant ensuite, dans une cloche graduée, le mercure qui est entré dans le ballon, qu'on détermine le volume de ce dernier à la température ambiante. Par le calcul on en déduit le volume V à zéro, et ensuite le poids P de l'air contenu dans le ballon à la température t et à la pression H (321). Le poids P' de la vapeur contenue dans le ballon à t' degrés et à la pression H' est donc $P + Q$.

Calculant enfin le poids P'' de l'air que contiendrait le ballon dans les conditions de température et de pression t' et H' , on a $D = \frac{P'}{P''} = \frac{P + Q}{P''}$.

S'il restait de l'air dans le ballon quand on y introduit le mercure, le ballon ne se remplirait pas complètement; mais le volume du mercure introduit représenterait toujours le volume de la vapeur. Toutefois, il faudrait jauger le volume d'air qui reste dans le ballon, en le faisant arriver dans une cloche graduée, et tenir compte de son poids.

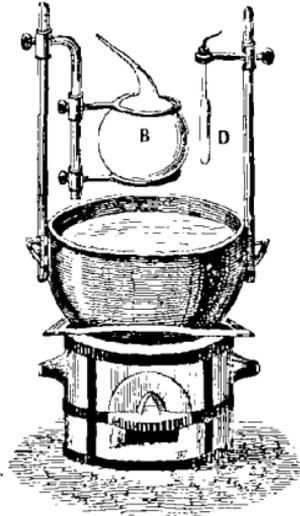


Fig. 310.

Densités de quelques vapeurs par rapport à l'air.

Air	1,0000	Vapeur de phosphore	4,420.
Vapeur d'eau	0,6235	— d'essence de térében-	
— d'alcool	1,6138	thine	5,0130
— de soufre	2,206.	— de mercure	6,976.
— d'éther sulfurique	2,5860	— d'iode	8,716.
— de sulfure de carbone.	2,6447		

380. **Procédé de MM. Sainte-Claire Deville et Troost.** — Pour les substances qui n'entrent en ébullition qu'à des températures supérieures à celle de la fusion du verre, MM. H. Sainte-Claire Deville et Troost ont modifié la méthode de M. Dumas, en remplaçant le ballon de verre par un ballon de porcelaine de Bayeux vernissée, à col long et étroit, muni d'un bouchon conique de même substance, qui laisse les vapeurs se dégager, et qu'on fond au chalumeau à gaz oxy-hydrogène au moment où le jet de vapeur cesse. Le ballon est maintenu dans une étuve à vapeur de mercure, ou de soufre, de cadmium, de zinc, et se trouve ainsi porté à la température d'ébullition de ces substances, laquelle est connue d'avance, et respectivement de 350, 450, 860 et 1080 degrés. Enfin, au lieu de comparer la densité cherchée à celle de l'air prise pour unité, on la compare à celle de l'iode, qui est près de neuf fois plus grande. Le coefficient de dilatation du ballon étant connu, on opère ensuite entièrement comme dans la méthode de M. Dumas.

381. **Rapport entre un volume de liquide et celui de sa vapeur.** — La densité d'une vapeur étant connue, on en déduit facilement le volume qu'un poids connu de cette vapeur doit occuper, à l'état de saturation, à une température donnée. Soit proposé, par exemple, de calculer le volume d'un gramme de vapeur d'eau à 100 degrés et à la pression 0,76.

La densité de la vapeur d'eau, à 100 degrés, étant, par rapport à celle de l'air, 0,6235, on aura le poids d'un litre de vapeur d'eau à 100 degrés et à la pression 0^m,76, en cherchant le poids d'un litre d'air à la même température et à la même pression, et en le multipliant par 0^m,6235. Or on a vu (321, prob. vi) qu'en représentant par P' le poids d'un litre d'air à t degrés, par P le poids du même volume à zéro, et par α le coefficient de dilatation de l'air, on a $P' = \frac{P}{1 + \alpha t}$. Par consé-

quent, le poids d'un litre d'air sec à 100 degrés est

$$\frac{1\text{gr},293}{1 + 0,00367 \times 100} = \frac{1\text{gr},293}{1,367} = 0\text{gr},946.$$

Par suite, un litre de vapeur saturée, à 100 degrés et à la pression 0^m,76, pèse
 $0\text{gr},946 \times 0,6235 = 0\text{gr},5898.$

Pour avoir, à la même température et à la même pression, le volume V occupé par 1 gramme de vapeur, il n'y a qu'à diviser 1 gr. par 0^{gr},5898; d'où
 $V = 1\text{gr},695 = 1695$ centimètres cubes.

En se transformant en vapeur à 100 degrés et à la pression 0^m,76, l'eau prend donc un volume près de 1700 fois plus grand qu'à l'état liquide.

CHAPITRE VI

HYGROMÉTRIE

382. **Objet de l'hygrométrie.** — L'hygrométrie a pour objet de déterminer la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air déterminé. Cette quantité est très-variable; mais l'air n'est

jamais saturé de vapeur d'eau, du moins dans nos climats. Il n'est non plus jamais complètement sec; car si l'on y expose des substances *hygrométriques*, c'est-à-dire ayant une grande affinité pour l'eau, comme le chlorure de calcium, l'acide sulfurique, en tout temps, elles absorbent de la vapeur d'eau.

383. État hygrométrique. — L'air n'étant point, en général, saturé, on nomme *état hygrométrique* ou *fraction de saturation* de l'air le rapport de la quantité actuelle de vapeur d'eau qu'il renferme à la quantité qu'il contiendrait s'il était saturé, à température égale. Le degré d'humidité de l'air ne dépend pas de la quantité absolue de vapeur d'eau qu'il contient, mais de la distance à laquelle cette vapeur se trouve de l'état de saturation. L'air, lorsqu'il est froid, peut être très-humide avec peu de vapeur, et très-sec, au contraire, avec une plus grande quantité, lorsqu'il est chaud. Par exemple, l'air contient, en général, plus d'eau l'été que l'hiver, et cependant il est moins humide, parce que, la température étant plus élevée, la vapeur est plus loin de son point de saturation. De même, lorsqu'on chauffe un appartement, on ne diminue point la quantité de vapeur qui est dans l'air; mais on diminue l'humidité de celui-ci, parce qu'on recule son point de saturation. L'air peut même devenir alors assez sec pour nuire à l'économie animale; c'est pour cela qu'il est bon de placer sur les poêles des vases contenant de l'eau.

La loi de Mariotte s'appliquant aux vapeurs non saturées de même qu'aux gaz (346), il en résulte qu'à égalité de température et de volume, le poids de la vapeur, dans un espace non saturé, croît comme la pression, et, par suite, comme la tension de cette même vapeur. On peut donc, au rapport des quantités de vapeur, substituer celui des forces élastiques correspondantes, et dire: *l'état hygrométrique de l'air est le rapport entre la force élastique de la vapeur d'eau qu'il contient et la force élastique de celle qu'il contiendrait, à la même température, s'il était saturé.*

C'est-à-dire qu'en représentant par f la tension de la vapeur qui est dans l'air, par F celle de la vapeur saturée à la même température, et par E l'état hygrométrique, on a $E = \frac{f}{F}$, d'où $f = F \times E$.

Comme conséquence de la seconde définition ci-dessus, la température ayant varié, l'air peut contenir la même quantité de vapeur, et cependant ne pas avoir le même état hygrométrique. En effet, lorsque la température s'élève, la force élastique de la vapeur que contiendrait l'air, à l'état de saturation, croît plus rapidement que la force élastique de la vapeur qui se trouve actuelle-

ment dans l'air, et alors le rapport de ces forces, c'est-à-dire l'état hygrométrique, devient plus petit.

On verra bientôt (392) comment de l'état hygrométrique on déduit le poids de la vapeur contenue dans un volume donné d'air.

384. Différentes espèces d'hygromètres. — On nomme *hygromètres* des instruments qui servent à déterminer l'état hygrométrique de l'air. On en a imaginé un fort grand nombre, qu'on peut rapporter à quatre sortes principales : les *hygromètres chimiques*, les *hygromètres à absorption*, les *hygromètres à condensation*, et les *psychromètres*.

385. Hygromètre chimique. — Le procédé de l'hygromètre chimique consiste à faire passer un volume connu d'air sur une

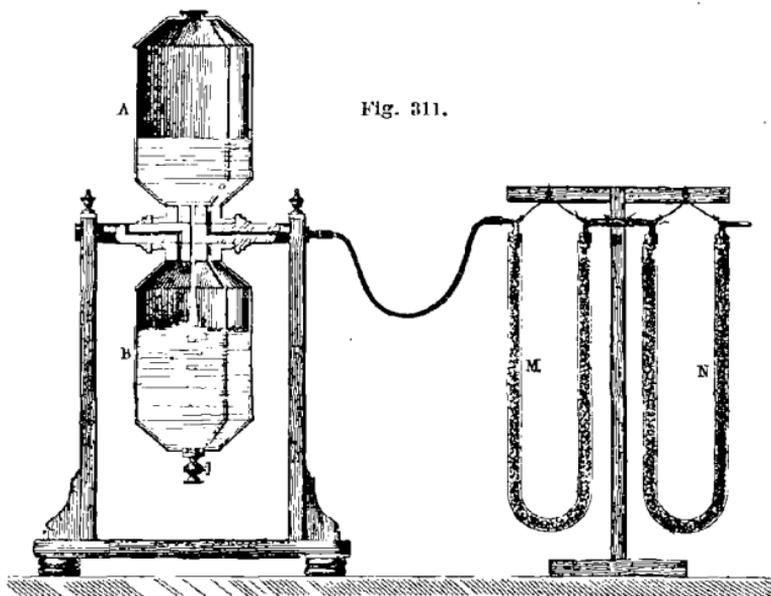


Fig. 311.

substance avide d'eau, sur du chlorure de calcium, par exemple. Ayant pesé la substance avant le passage de l'air et la pesant après, on trouve un excès de poids, qui est celui de la vapeur qui était contenue dans l'air. Pour faire passer à volonté un volume d'air plus ou moins considérable, on dispose l'expérience comme le montre la figure 311. Deux réservoirs de laiton A et B, identiques de construction et de capacité, servent successivement d'aspirateurs. A cet effet, ils sont fixés à un même axe autour duquel on les fait alternativement basculer. De plus, ils communiquent entre eux par une tubulure centrale; tandis que par deux

tubulaires pratiquées dans l'axe ils sont toujours en communication, le réservoir inférieur avec l'atmosphère, et le supérieur, par l'intermédiaire d'un tube de caoutchouc, avec une série de tubes M, N, remplis de chlorure de calcium ou de pierre ponce sulfurique. Le premier de ces tubes, N, est destiné à absorber la vapeur d'eau contenue dans l'air aspiré; le second, M, arrête la vapeur qui tend à passer des réservoirs dans le tube N.

Le réservoir inférieur étant plein d'eau et l'autre plein d'air, on fait basculer l'appareil, de manière que le liquide s'écoule lentement de A en B. Le vide se faisant en A, l'air rentre par les tubes N, M, dans le premier desquels toute la vapeur est absorbée. Quand toute l'eau s'est écoulée en B, on fait basculer de nouveau l'appareil; le même écoulement recommence et le même volume d'air est aspiré à travers le tube N. Si la capacité de chaque réservoir est de 10 litres, et qu'on ait fait basculer cinq fois l'appareil, 50 litres d'air ont traversé le tube N et s'y sont desséchés. Si donc, avant l'expérience, on a pesé ce tube avec les matières qui sont dedans, et si on le pèse après, l'excès de poids donne la quantité de vapeur d'eau contenue dans 50 litres d'air au moment de l'expérience. De ce poids on déduit l'état hygrométrique de l'air. Ce procédé est le plus précis; mais il n'offre pas le degré de simplicité nécessaire dans les observations météorologiques.

386. **Hygromètre à absorption.** — Les hygromètres à absorption sont fondés sur la propriété qu'ont les substances organiques de s'allonger par l'humidité et de se raccourcir par la sécheresse. On a imaginé plusieurs hygromètres à absorption. Le plus en usage est l'*hygromètre à cheveu* ou *hygromètre de Saussure*, du nom du physicien auquel il est dû. Il se compose d'un cadre de cuivre (fig. 342), sur lequel est tendu un cheveu *c*, dégraissé préalablement dans de l'eau contenant un centième de son poids de sous-carbonate de soude. On peut aussi dégraisser le cheveu en le plongeant dans de l'éther sulfurique pendant 24 heures, ainsi que l'a fait M. Regnault. Si le cheveu n'était pas dégraissé, il n'absorberait que peu de vapeur, et son allongement serait très-faible; tandis que, débarrassé de toute matière grasse, il s'allonge rapidement en passant de la sécheresse à l'humidité.

Le cheveu *c* est maintenu, à son bout supérieur, par une pince *a* serrée par une vis de pression *d*. Cette pince s'élève ou s'abaisse, pour tendre le cheveu, au moyen d'une vis *b* dont l'écrou, placé au-dessus de *a*, est fixe. Si le cheveu était noué, il en résulterait une torsion qui rendrait l'allongement irrégulier. A sa partie inférieure, il s'enroule sur une poulie à deux gorges *o*, à laquelle il est fixé. Sur la deuxième gorge s'enroule, en sens

contraire du cheveu, un fil de soie qui supporte un petit poids p . Enfin, l'axe de la poulie porte une aiguille qui se meut sur un cadran gradué. Quand le cheveu se raccourcit, sa traction relève l'aiguille; lorsqu'il s'allonge, c'est le poids p qui la fait descendre.

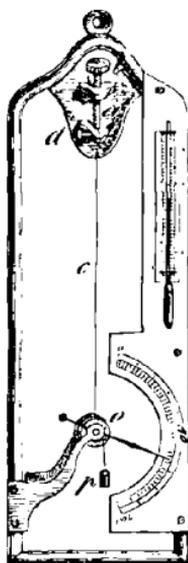


Fig. 312 ($h=27$).

Pour graduer le cadran, on marque zéro au point où, à la température ordinaire, l'aiguille s'arrête dans de l'air complètement desséché, et 100 au point où elle s'arrête dans de l'air saturé de vapeur d'eau; puis on partage l'intervalle entre ces deux points en 100 parties égales, qui sont les degrés de l'hygromètre.

Le zéro, ou point d'extrême sécheresse, se détermine en plaçant l'hygromètre sous une cloche de verre dont on dessèche l'air avec des substances très-avides d'eau, comme du chlorure de calcium ou du carbonate de potasse calciné. L'air perdant son humidité, le cheveu se raccourcit et fait tourner la poulie et son aiguille, mais très-lentement. Au bout de quinze à vingt jours seulement, l'aiguille devient stationnaire, ce qui indique que l'air de la cloche est complètement desséché. On marque alors zéro sur le cadran, au point correspondant à l'aiguille.

On obtient le point d'extrême humidité en retirant les matières desséchantes de la cloche, et en mouillant ses parois avec de l'eau distillée. Celle-ci, se vaporisant, sature bientôt l'air de la cloche, et le cheveu s'allonge rapidement. Le poids p , dont le fil s'enroule sur la poulie en sens contraire du cheveu, fait alors tourner l'aiguille à l'opposé du zéro. En moins de deux heures, elle est stationnaire, et l'on marque 100 au point où elle s'arrête.

D'après Saussure, un cheveu tendu par un poids de 3 décigrammes s'allonge, de zéro à 100, de $\frac{1}{6}$ de sa longueur, qui est d'environ 20 centimètres. Les cheveux blonds sont ceux dont l'allongement est le plus régulier.

On néglige la dilatation qu'éprouve le cheveu par les variations de température, parce qu'on a reconnu que, pour une différence de 33 degrés dans la température de l'air, l'allongement du cheveu ne fait varier l'aiguille que des $\frac{3}{4}$ d'un degré de l'hygromètre. Abstraction faite de cette faible dilatation, on observe que, quelle que soit la température, l'aiguille de l'hygromètre revient toujours exactement au zéro dans l'air parfaitement sec, et à 100 dans

l'air saturé. La fixité de ce dernier point montre que, dans l'air saturé, le cheveu absorbe toujours la même quantité d'eau, quelles que soient la température et la densité de la vapeur.

Les hygromètres à cheveu offrent plusieurs inconvénients. Construits avec des cheveux divers, leurs indications peuvent varier de plusieurs degrés, quoique d'accord aux deux points extrêmes. De plus, un même hygromètre ne reste pas comparable à lui-même, le cheveu s'allongeant par la tension prolongée du poids qu'il supporte. C'est pourquoi le meilleur système de graduation est un cadran entier, à zéro arbitraire, sur lequel on détermine de temps en temps la position des points d'extrême sécheresse et d'extrême humidité. L'hygromètre à cheveu présente encore l'inconvénient de ne pas donner immédiatement l'état hygrométrique de l'air; il faut avoir recours à la table suivante.

387. Table de correction par Gay-Lussac. — L'expérience montre que les indications de l'hygromètre à cheveu ne sont point proportionnelles à l'état hygrométrique de l'air. Par exemple, lorsque l'aiguille marque 50 degrés, nombre qui correspond au milieu du cadran, l'air est loin d'être à moitié saturé. Il a donc fallu trouver expérimentalement l'état hygrométrique correspondant à chaque degré de l'instrument. Gay-Lussac a résolu ce problème en se fondant sur ce principe, que les vapeurs fournies par une dissolution saline ou acide ont une tension maximum d'autant plus faible, pour une même température, que la quantité de sel ou d'acide dissous est plus considérable (352).

Ce savant plaçait l'hygromètre à cheveu sous une cloche dans laquelle était un mélange d'eau et d'acide sulfurique, et il notait le degré de l'hygromètre lorsque l'air de la cloche était saturé. Pour obtenir la tension correspondante de la vapeur sous la cloche, il faisait passer dans le vide d'un baromètre quelques gouttes de la même dissolution acide qui était sous la cloche. La dépression du mercure dans le baromètre lui donnait alors la tension de la vapeur dans la cloche, puisqu'à l'état de saturation et à température égale, la force élastique d'une vapeur est la même dans le vide que dans l'air (375, 1^o). Cherchant enfin, dans les tables des forces élastiques, la tension de la vapeur saturée, à la température de l'air sous la cloche, il avait les deux termes du rapport qui représentait l'état hygrométrique de l'air correspondant au degré marqué par l'hygromètre (383). C'est en répétant ce mode d'expérience avec des dissolutions acides plus ou moins concentrées, et à la température de 40 degrés, que Gay-Lussac a trouvé dix termes de la table suivante; les autres ont ensuite été déterminés par Biot, à l'aide de formules d'interpolation.

États hygrométriques correspondants aux degrés de l'hygromètre à cheveu à la température de 10 degrés.

DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES	DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES
0	0,000	55	0,318
5	0,022	60	0,363
10	0,046	65	0,414
15	0,070	70	0,472
20	0,094	72	0,500
25	0,120	75	0,538
30	0,148	80	0,612
35	0,177	85	0,696
40	0,208	90	0,791
45	0,241	95	0,891
50	0,278	100	1,000

Cette table fait voir que ce n'est qu'à 72 degrés que l'air est à moitié saturé. Comme c'est à ce point que correspond le plus souvent l'aiguille de l'hygromètre à la surface du sol, on en conclut que l'air contient, en moyenne, la moitié de la vapeur qu'il contiendrait s'il était saturé. Dans nos climats, l'hygromètre ne descend jamais jusqu'à 100 degrés, même après les pluies les plus abondantes. Pendant les plus grandes sécheresses, il monte rarement au delà de 30 degrés. Lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, l'aiguille marche, en général, vers zéro.

Selon Gay-Lussac, sa table de graduation était applicable à tous les hygromètres à cheveu. Mais M. Regnault a reconnu que les indications de ces instruments varient avec l'origine des cheveux, leur couleur, leur finesse, le mode de dégraissage; en sorte que, pour obtenir des indications précises, il faut une table particulière pour chaque hygromètre: ce qui fait voir combien ces instruments offrent d'incertitude et de difficulté.

* 388. **Hygromètre à condensation de Daniell.** — Les hygromètres à condensation ont pour but de faire connaître, par le refroidissement de l'air, à quelle température la vapeur qu'il contient serait suffisante pour le saturer: tels sont l'hygromètre de Daniell et celui de M. Regnault.

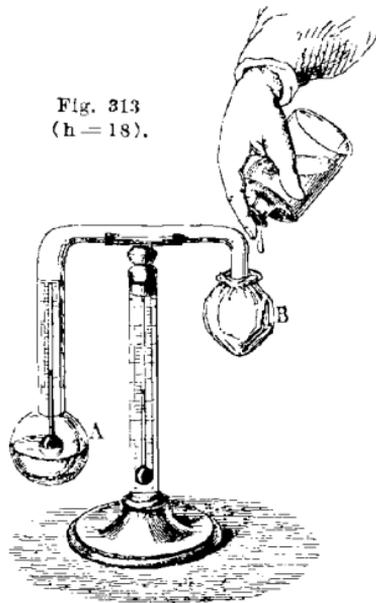
L'hygromètre de Daniell se compose de deux boules de verre réunies par un tube deux fois recourbé (fig. 313). La boule A est aux deux tiers remplie d'éther, dans lequel plonge un petit thermomètre renfermé dans le tube. Les deux boules et le tube sont complètement purgés d'air, ce qui s'obtient en faisant bouillir

l'éther qui est dans la boule A, tandis que la boule B est encore ouverte, et en fermant celle-ci à la lampe lorsqu'on juge que les vapeurs d'éther ont entraîné tout l'air, de sorte que le tube et la boule B ne contiennent que de la vapeur d'éther.

La boule B étant enveloppée de mousseline, on verse dessus, goutte à goutte, de l'éther. Ce liquide, en se vaporisant, refroidit la boule (366) et condense les vapeurs qu'elle contient. La tension intérieure étant alors diminuée, l'éther de la boule A donne aussitôt de nouvelles vapeurs qui viennent se condenser de même dans l'autre boule, et ainsi de suite. Or à mesure que le liquide distille ainsi de la boule inférieure à la boule supérieure, l'éther qui est dans la première se refroidit, et il vient un moment où l'air qui est en contact avec la boule A, et qui se refroidit avec elle, atteint la température à laquelle la vapeur d'eau qu'il contient est suffisante pour le saturer. Cette vapeur se condense alors, et l'on voit se déposer sur la boule A une couche de rosée sous la forme d'un anneau qui entoure la surface du liquide; c'est là, en effet, que se produit surtout le refroidissement dû à l'évaporation. Le thermomètre intérieur indique, à cet instant, la température du *point de rosée*, c'est-à-dire la température de saturation de l'air ambiant.

Pour obtenir ce point avec plus d'approximation, on observe la température au moment où la vapeur précipitée disparaît par le réchauffement, et l'on prend la moyenne entre cette température et celle de la précipitation. Il est bon que, pendant cette expérience, l'hygromètre soit placé dans un courant d'air, sur une fenêtre ouverte, par exemple, afin que l'évaporation de l'éther sur la mousseline soit plus rapide. La température de l'air est donnée par un thermomètre placé sur le pied même de l'appareil.

L'hygromètre de Daniell ayant ainsi fait connaître la température à laquelle l'air serait saturé, il s'agit d'en déduire l'état hygrométrique. Pour cela, observons que, dans un espace libre qui con-



tient un mélange d'air et de vapeur à la pression atmosphérique, lorsque la température baisse, la force élastique de la vapeur reste constante jusqu'au point de saturation. En effet, la force élastique du mélange égale la somme des forces élastiques de chaque fluide 375, 2° ; or, pendant que l'air se refroidit, sa tension reste invariable, augmentant autant par la diminution de volume qu'elle décroît par l'abaissement de température. La tension de la vapeur doit donc aussi demeurer invariable, puisque la force élastique du mélange reste nécessairement égale à la pression de l'atmosphère, après le refroidissement comme avant. Par conséquent, *lorsque l'air se refroidit, la tension de la vapeur qu'il contient reste constante jusqu'au point de saturation, et, à ce point, cette tension est la même qu'avant le refroidissement.*

D'après ce principe, si l'on cherche, dans les tables des forces élastiques, la tension f correspondante à la température du point de rosée, cette tension sera précisément celle que possède la vapeur d'eau qui est dans l'air au moment de l'expérience. Si donc on cherche, dans les mêmes tables, la tension F de la vapeur saturée, à la température de l'air, le quotient de la tension f divisée par la tension F représentera l'état hygrométrique de l'air (383). Par exemple, la température de l'air étant 15 degrés, supposons que le thermomètre de la boule A marque 5 degrés au moment où se fait le dépôt de rosée. En cherchant, dans les tables des forces élastiques, les tensions correspondantes à 5 et à 15 degrés, on trouve f égale à 6^{mm},544, et F égale à 12^{mm},699 ; ce qui donne 0,514 pour le rapport de f à F , ou pour l'état hygrométrique.

L'hygromètre de Daniell offre plusieurs causes d'erreur : 1° l'évaporation dans la boule A ne refroidissant le liquide qu'à la surface, le thermomètre qui y plonge ne peut donner avec précision la température du point de rosée ; 2° l'observateur, se tenant auprès de l'appareil, modifie l'état hygrométrique de l'air ambiant, ainsi que sa température.

* 389. **Hygromètre de M. Regnault.** — M. Regnault a construit un hygromètre à condensation qui ne présente pas les causes d'erreur de celui de Daniell. Cet instrument se compose de deux dés d'argent, à parois minces et polies, de 45 millimètres de hauteur et 20 de diamètre (fig. 314). Dans ces dés s'ajustent deux tubes de verre D et E. Chacun d'eux contient un thermomètre très-sensible fixé à l'aide d'un bouchon. Le bouchon du tube D est traversé par un tube A ouvert à ses deux bouts et plongeant jusqu'au fond du dé. De plus, le tube D est mis en communication par le pied même du support et par un tuyau de plomb avec un aspirateur G rempli d'eau. Le tube E ne communique pas avec l'aspirateur ; il

contient seulement un thermomètre destiné à faire connaître la température de l'air au moment de l'expérience.

Pour faire fonctionner l'hygromètre, on verse de l'éther dans le tube D, jusqu'à moitié environ, puis on ouvre le robinet de l'aspirateur. L'eau qui remplit celui-ci s'écoule, et l'air se raréfie

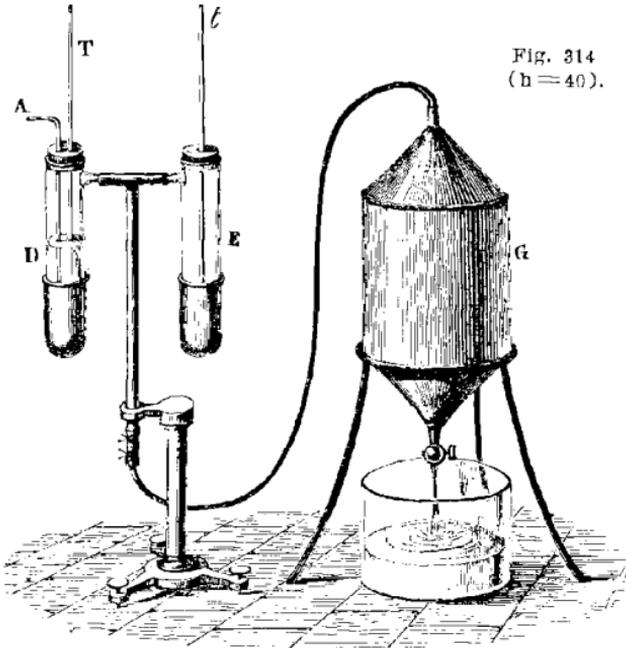


Fig. 314
(h = 40).

dans le tube D. Par l'effet de la pression atmosphérique, de l'air rentre alors par le tube A ; mais comme cet air ne peut pénétrer dans le tube D et dans l'aspirateur qu'en passant au travers de l'éther, il vaporise une partie de ce liquide, et le refroidit ainsi d'autant plus vite, que l'écoulement est plus rapide. Il vient un moment où le refroidissement détermine sur le dé un dépôt de rosée, de même que dans l'hygromètre de Daniell; le thermomètre T donnant alors la température correspondante, on a les éléments nécessaires pour calculer l'état hygrométrique.

Dans cet instrument, toute la masse d'éther est à la même température, à cause de l'agitation que lui imprime le courant d'air; de plus, les observations se font à distance au moyen d'une lunette; de cette manière, toute cause d'erreur est écartée.

390. **Hygrosopes.** — On nomme *hygrosopes* des appareils qui indiquent bien s'il y a plus ou moins de vapeur d'eau dans l'air.

mais qui n'en font pas connaître la quantité. On en construit de plusieurs sortes : les plus employés sont ceux auxquels on donne la forme de petits personnages dont la tête se couvre ou se découvre d'un capuchon, selon que l'air est plus ou moins humide. Ces instruments sont fondés sur la propriété qu'ont les cordes et les boyaux tordus de se détordre par l'action de l'humidité, et de se tordre davantage par la sécheresse. Leurs indications sont dues à un petit bout de boyau tordu, fixé par l'une de ses extrémités, tandis que l'autre s'attache à la pièce mobile. Ces hygrosopes sont paresseux, c'est-à-dire que, ne marchant que très-lentement, leurs indications sont toujours en retard sur les variations hygrométriques de l'air; de plus, ils sont fort peu sensibles.

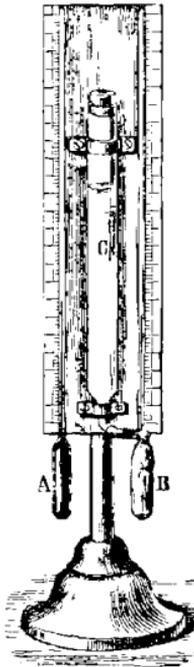


Fig. 315.

* 391. **Psychromètre.** — Le *psychromètre* (mesure de la fraîcheur) est destiné, comme l'hygromètre, à faire connaître le degré d'humidité de l'air. L'idée première en est due à Leslie; mais c'est August qui lui a donné la disposition représentée dans la figure 315. Il se compose de deux thermomètres A et B fixés parallèlement sur une plaque de cuivre. Entre eux est un tube C contenant de l'eau distillée. Le réservoir B étant enveloppé de mousseline, une mèche de coton, partant de l'extrémité inférieure du tube C, amène l'eau sur la mousseline et la maintient humectée. Refroidi ainsi par l'évaporation qui se produit à sa surface, le thermomètre B marque constamment une température d'autant plus basse au-dessous de celle du thermomètre A, que l'évaporation est plus rapide, c'est-à-dire que l'air est moins humide. D'où l'on déduit la tension x de la vapeur dans l'air ambiant par la formule

$$A(t - t') = \frac{F' - x}{H} [1],$$

dans laquelle t représente la température du thermomètre sec, t' celle du thermomètre mouillé, F' la tension de la vapeur saturée à t' degrés, H la pression atmosphérique, et A un coefficient indéterminé.

Dans la formule [1], le premier membre représente la chaleur que reçoit le thermomètre mouillé, laquelle, d'après la loi de Newton (422), est proportionnelle à la différence $t - t'$, et le second membre représente la chaleur enlevée par l'évaporation, laquelle, d'après Dalton, est directement proportionnelle à la différence $F' - x$, et inversement proportionnelle à H . Or lorsque le thermomètre mouillé a pris une température fixe t' , les quantités de chaleur qu'il perd et qu'il reçoit sont nécessairement égales, ce qui donne l'équation [1].

Pour en faire usage, il faut commencer par déterminer A : à cet effet, on mesure x à l'aide de l'hygromètre de M. Regnault, et substituant la valeur ainsi trouvée à la place de x dans l'équation [1], celle-ci donne, pour une valeur particulière de $t - t'$, de F' et de H , une valeur de A , qui, portée comme constante dans la même équation, la rend ensuite propre à faire connaître les valeurs de x correspondantes aux différentes valeurs de t et de t' fournies par l'observation du

psychromètre. Toutefois, M. Regnault ayant constaté que A varie de 0,00075 à 0,00120, suivant que l'air est très-sec ou très-humide, et que ce coefficient varie encore avec la rapidité du renouvellement de l'air, et selon que le psychromètre est placé à l'air libre ou à l'intérieur, il en résulte que les indications fournies par cet instrument présentent toujours quelque incertitude.

392. Problèmes sur l'hygrométrie. — I. Calculer le poids de la vapeur d'eau contenue dans un volume d'air V à la température t , l'hygromètre à cheveu marquant m degrés, et la densité de la vapeur par rapport à l'air étant $\frac{5}{8}$.

Au moyen de la table de Gay-Lussac (387), on trouve l'état hygrométrique E correspondant à m degrés de l'hygromètre, et dans les tables des forces élastiques, on trouve la tension F de la vapeur saturée à t degrés; d'où l'égalité $f = F \times E$ (383) fait connaître la force élastique f de la vapeur dont on cherche le poids.

Cela posé, un litre d'air à zéro et à la pression 76 pesant 18,293, son poids à t degrés et à la pression f est $\frac{18,293 \times f}{(1 + \alpha t) 76}$ (321, prob. vi). Par suite, 1 litre de va-

peur dont la densité est $\frac{5}{8}$, pèse, à la même température et à la même pres-

slon, $\frac{18,293 \times f \times 5}{(1 + \alpha t) 76 \times 8}$. Donc le poids de la vapeur contenue dans V litres d'air

à t degrés, l'état hygrométrique étant E , est $\frac{18,293 \times V \times f \times 5}{(1 + \alpha t) 76 \times 8}$, valeur qui est indépendante de la pression atmosphérique.

II. Calculer le poids P d'un volume d'air humide V dont l'état hygrométrique est E , la température t et la pression H , la densité de la vapeur par rapport à l'air étant $\frac{5}{8}$.

Il faut observer que le volume d'air donné n'est autre chose, d'après la deuxième loi des mélanges des gaz et des vapeurs, qu'un mélange de V litres d'air sec à t degrés et à la pression H diminuée de celle de la vapeur, et de V litres de vapeur à t degrés et à la tension donnée par l'état hygrométrique; c'est donc séparément le poids de l'air et celui de la vapeur qu'il s'agit de trouver.

La formule connue $f = F \times E$ sert à calculer la tension f de la vapeur qui est dans l'air, puisque E est donné et que F se trouve dans les tables des forces élastiques. La tension f une fois connue, si l'on appelle f' la tension de l'air, on a $f + f' = H$, d'où $f' = H - f = H - FE$.

La question est donc ramenée à calculer le poids de V litres d'air sec à t degrés et à la pression $H - FE$, puis celui de V litres de vapeur aussi à t degrés, mais à la pression FE .

Or on sait que V litres d'air sec à t degrés et à la pression $H - FE$ pèsent $\frac{18,293 V (H - FE)}{(1 + \alpha t) 76}$, et l'on a vu dans le problème précédent que V litres de va-

peur, à t degrés et à la pression FE , pèsent $\frac{18,293 V \times FE \times 5}{(1 + \alpha t) 76 \times 8}$; donc, enfin, faisant la somme des deux poids obtenus et réduisant, on a

$$P = \frac{18,293 V \left(H - \frac{3}{8} FE \right)}{(1 + \alpha t) 76} \text{ [A].}$$

Si l'air était saturé, on aurait $E = 1$, et alors cette formule se changerait en celle déjà trouvée pour les mélanges des gaz et des vapeurs saturées (376, prob. in).

Si $V = 1$ litre, P représente le poids d'un litre d'air à la température t , à la pression H , et à l'état hygrométrique E ; c'est-à-dire la quantité α qui entre

dans les formules données précédemment pour la correction des poids spécifiques des solides et des liquides (319).

La formule [A] contenant, outre le poids P, plusieurs quantités variables V, E, H, t, on peut, en prenant successivement chacune de ces quantités pour inconnue, se proposer autant de problèmes dont on obtiendrait la solution en résolvant l'équation [A] par rapport à V, à E, à H ou à t. On va en voir un exemple dans la question suivante.

III. Calculer à t degrés et à la pression H le volume d'un poids d'air P dont l'état hygrométrique est E, la densité de la vapeur étant $\frac{5}{8}$, et sa tension maximum F à t degrés étant connue par les tables des forces élastiques.

Résolvant par rapport à V l'équation [A] du problème précédent, on trouve

$$V = \frac{P(1 + \alpha t) 76}{187,293 \left(H - \frac{3}{8} FE \right)} \quad [B].$$

On peut aussi résoudre ce problème directement. Pour cela, le poids P étant un mélange d'air sec à t degrés et à la pression H - FE, et de vapeur à t degrés et à la pression FE, soient x le poids de l'air et y le poids de la vapeur; d'après l'énoncé, on a $x + y = P$ [1]. Mais la densité de la vapeur étant les $\frac{5}{8}$ de celle de

l'air, y doit égaler les $\frac{5}{8}$ de x à pression égale. Le volume d'air cherché pesant x à la pression H - FE, son poids à la pression FE, qui est celle de la vapeur,

n'est plus que $\frac{x \times FE}{H - FE}$; donc $y = \frac{x \times FE \times \frac{5}{8}}{H - FE}$. Portant cette valeur dans

l'équation [1], il vient $x + \frac{x \times FE \times \frac{5}{8}}{H - FE} = P$, d'où $x = \frac{P(H - FE)}{H - \frac{3}{8} FE}$.

Le poids de l'air une fois connu, on aura son volume en litres en cherchant combien de fois ce poids contient celui d'un litre d'air à t degrés et à la pression H - FE. Or 1 litre d'air à zéro et à la pression 76 pesant 187,293, son poids à t degrés et à la pression H - FE est $\frac{187,293(H - FE)}{(1 + \alpha t) 76}$. Donc

$$V = \frac{P(H - FE)}{H - \frac{3}{8} FE} \cdot \frac{187,293(H - FE)}{(1 + \alpha t) 76} = \frac{P(1 + \alpha t) 76}{187,293 \left(H - \frac{3}{8} FE \right)},$$

formule qui est la même que la formule [B] obtenue ci-dessus.

CHAPITRE VII

CALORIMÉTRIE, ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

393. **Objet de la calorimétrie, calorie.** — L'objet de la *calorimétrie* est de mesurer la quantité de chaleur que les corps perdent ou gagnent lorsque leur température s'abaisse ou s'élève d'un nombre de degrés connu, ou lorsqu'ils changent d'état.

On ne peut mesurer la quantité absolue de chaleur perdue ou gagnée par un

corps, mais seulement la quantité relative, c'est-à-dire le rapport entre la quantité absolue perdue ou gagnée par le corps et celle que perd ou gagne un autre corps dans les mêmes conditions. Le corps qu'on a choisi pour terme de comparaison est l'eau, et l'on est convenu de prendre pour *unité de chaleur* ou *calorie*, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau.

394. **Chaleurs spécifiques.** — On appelle *chaleur spécifique*, ou *capacité calorifique* d'un corps, la quantité de chaleur qu'il gagne lorsque sa température s'élève de zéro à 1 degré, comparativement à celle que gagne, dans le même cas,

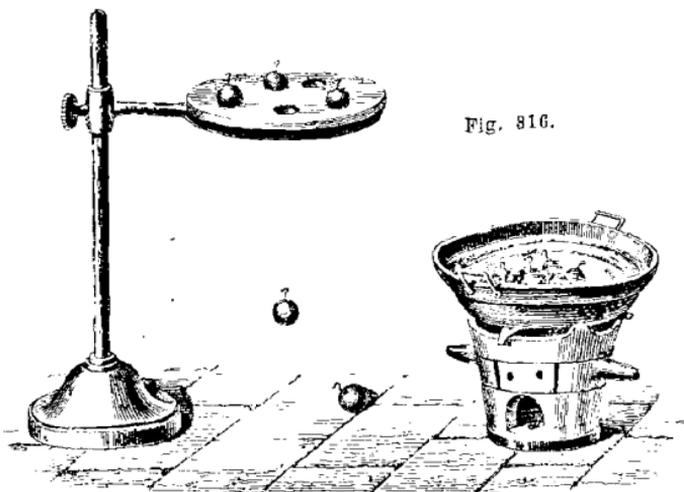


Fig. 816.

un égal poids d'eau. C'est-à-dire que, de même qu'on a choisi pour unité des densités celle de l'eau, on prend pour unité des chaleurs spécifiques celle du même liquide; d'où il résulte que les nombres qui représentent les *chaleurs spécifiques*, ainsi que ceux qui représentent les densités, ne sont que des rapports.

On constate facilement que tous les corps n'ont pas la même chaleur spécifique. Par exemple, si l'on mélange 1 kilogramme de mercure à 100 degrés avec 1 kilogramme d'eau à zéro, on observe que la température du mélange est seulement de 3 degrés environ. C'est-à-dire que le mercure s'étant refroidi de 97 degrés, la quantité de chaleur qu'il a perdue n'échauffe que de 3 degrés le même poids d'eau. L'eau prend donc, à poids égal, environ 32 fois plus de chaleur que le mercure, pour une même élévation de température.

On démontre encore que les diverses substances, sous le même poids et à la même température, contiennent des quantités de chaleur différentes, au moyen de l'expérience suivante, due à M. Tyndall. On coule dans un moule un gâteau de cire jaune de 15 à 20 centimètres de diamètre et de 12 millimètres d'épaisseur environ, et lorsqu'il est refroidi, on le place sur un support annulaire (fig. 316). On chauffe alors, dans un bain d'huile à 180 degrés, de petites balles de fer, de cuivre rouge, d'étain, de plomb, de bismuth, etc., toutes de même poids; et lorsqu'elles ont pris la température du bain, on les retire et on les pose sur le gâteau de cire. Toutes fondent celui-ci, mais avec des vitesses inégales. Le fer s'y implante vivement, et passe au travers; puis, après lui, le cuivre. L'étain trous le gâteau, mais sans le traverser; enfin le plomb et le bismuth n'en atteignent pas même la demi-épaisseur. D'où l'on conclut que, quoique de même poids et à la

même température, la balle de fer contient plus de chaleur que la balle de cuivre, celle-ci plus que la balle d'étain; et ainsi de suite.

Trois méthodes ont été employées pour la détermination des chaleurs spécifiques : la méthode de la fusion de la glace, celle des mélanges, et celle du refroidissement. Dans cette dernière, on calcule la chaleur spécifique d'un corps d'après le temps qu'il met à se refroidir d'un nombre de degrés connu. Nous n'exposerons que les deux premières méthodes; mais, auparavant, il importe de faire connaître comment on mesure la quantité de chaleur gagnée par un corps dont le poids et la chaleur spécifique sont donnés, lorsque sa température s'élève d'un certain nombre de degrés.

395. Mesure de la chaleur sensible absorbée par les corps. — Soient m le poids d'un corps en kilogrammes, c sa chaleur spécifique et t sa température. La quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré un kilogramme d'eau ayant été prise pour unité, il faut m de ces unités pour élever de zéro à 1 degré un poids d'eau de m kilogrammes; et pour élever ce dernier poids de zéro à t degrés, il faut t fois plus, c'est-à-dire mt . Puisque telle est la quantité de chaleur nécessaire pour porter de zéro à t degrés m kilogrammes d'eau, dont la chaleur spécifique est 1, pour un corps de même poids, dont la chaleur spécifique est c , il faut c fois mt , ou mtc . Donc, lorsqu'un corps s'échauffe de zéro à t degrés, la quantité de chaleur qu'il absorbe peut se représenter par le produit obtenu en multipliant son poids par le nombre de degrés dont il s'échauffe et par sa chaleur spécifique.

Si le corps s'échauffe ou se refroidit de t à t' degrés, la chaleur absorbée ou perdue sera de même représentée par la formule

$$m(t' - t)c, \text{ ou } m(t - t')c.$$

Nous recommandons ces formules à l'attention des élèves; c'est avec elles qu'on résout tous les problèmes sur les chaleurs spécifiques.

396. Méthode des mélanges, calorimètre à eau. — Pour calculer, par la méthode des mélanges, due à Black, la chaleur spécifique d'un corps solide, on le pèse et on le porte à une température connue, qu'on détermine en le maintenant un certain temps dans un courant de vapeur à 100 degrés, puis on le plonge dans une masse d'eau froide dont le poids et la température sont également connus. De la quantité de chaleur que le corps cède à l'eau on déduit alors sa chaleur spécifique.

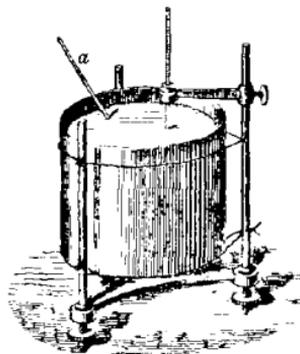


Fig. 317.

Cela posé, représentons par M le poids du corps, par T sa température au moment où on le plonge dans le liquide, et par c sa chaleur spécifique.

De même, soient m le poids de l'eau froide et t sa température.

Enfin, soient m' le poids du vase qui contient l'eau, c' sa chaleur spécifique et t sa température, laquelle est évidemment celle de l'eau.

Dès que le corps chaud est plongé dans l'eau, la température de celle-ci s'élève, et si l'on représente par θ la plus haute température qu'elle atteint, on voit que le corps s'est refroidi d'un nombre de degrés représenté par $(T - \theta)$, et

qu'il a, par conséquent, perdu une quantité de chaleur qui a pour mesure $Mc(T-\theta)$. L'eau et le vase, au contraire, se sont échauffés d'un nombre de degrés égal à $(\theta-t)$, et ont absorbé respectivement des quantités de chaleur égales à $m(\theta-t)$ et à $m'c'(\theta-t)$, puisque la chaleur spécifique de l'eau est l'unité. Or la quantité de chaleur cédée par le corps chaud est évidemment égale à la somme des quantités de chaleur absorbées par l'eau et par le vase; on a donc l'équation $Mc(T-\theta) = m(\theta-t) + m'c'(\theta-t)$ [1], de laquelle il est facile de tirer la valeur de c , lorsque la chaleur spécifique c' du vase est connue; si elle ne l'était pas, on devrait commencer par la déterminer en plongeant dans l'eau un corps chaud de même matière que le vase, et ayant, par conséquent, la même chaleur spécifique. L'équation précédente prend alors la forme $Mc'(T-\theta) = m(\theta-t) + m'c'(\theta-t)$ [2], et en la résolvant par rapport à c' , qui est maintenant la seule inconnue, on trouve

$$c' = \frac{m(\theta-t)}{M(T-\theta) - m'(\theta-t)}$$

La chaleur spécifique du vase étant connue, pour résoudre l'équation [1] trouvée plus haut, on met dans le second membre $(\theta-t)$ en facteur commun; il vient alors $Mc(T-\theta) = (m+m'c')(\theta-t)$ [3]. Divisant les deux membres par $M(T-\theta)$, on a $c = \frac{(m+m'c')(\theta-t)}{M(T-\theta)}$ [4].

On écrit souvent la valeur de c sous la forme : $c = \frac{(m+\mu)(\theta-t)}{M(T-\theta)}$ [5], en

posant $m'c' = \mu$; μ est donc le poids d'eau qui prendrait la même quantité de chaleur que le vase, ce qu'on exprime en disant que celui-ci est *réduit en eau*.

Afin d'avoir égard aux pertes de chaleur dues au rayonnement dans le procédé que nous venons de décrire, on fait d'abord une expérience avec le corps même dont on cherche la chaleur spécifique, dans le seul but de connaître approximativement le nombre de degrés dont la température de l'eau et du vase doit s'élever au-dessus de la température ambiante. Ce nombre étant, par exemple, 10 degrés, on refroidit l'eau et le vase de moitié, c'est-à-dire de 5 degrés au-dessous de la température de l'air ambiant; puis on procède à l'expérience définitive. La température de l'eau s'élevant encore sensiblement de 10 degrés, il en résulte que le vase, dont la température était d'abord de 5 degrés au-dessous de celle de l'enceinte, est, à la fin de l'expérience, de 5 degrés au-dessus. Il y a donc compensation entre la perte et le gain de chaleur qui proviennent du rayonnement pendant l'expérience.

Enfin, pour donner à la méthode des mélanges toute la précision qu'elle comporte, on doit tenir compte de la chaleur absorbée par le thermomètre.

397. Appareil de M. Regnault pour la méthode des mélanges. — La figure 318 représente l'appareil qu'a adopté M. Regnault pour la méthode des mélanges.

La pièce principale de cet appareil est une étuve AA, représentée en coupe dans la figure 319. Elle se compose de trois compartiments concentriques : dans le compartiment central est suspendu, par des fils de soie, un petit panier c de fil de laiton; c'est dans ce panier qu'est placée, en fragments, la substance sur laquelle on veut expérimenter. Un thermomètre T, fixé au centre même de ces fragments, en donne la température. Dans le second compartiment pp circule un courant de vapeur qui arrive, par un tube e , d'un générateur B, et se rend ensuite par un tube a dans un serpentin où la vapeur se condense. Le troisième compartiment ii est rempli d'air destiné à s'opposer à la déperdition de la chaleur. Au-dessous de l'étuve est une chambre K, entourée d'une double paroi EE, formant un réservoir qu'on maintient rempli d'eau froide, afin de s'opposer à la transmission de la chaleur provenant de l'étuve et du générateur. Enfin, le compartiment central de l'étuve est fermé par un registre r qu'on ouvre à volonté, et qui permet alors de faire passer le panier c de l'étuve dans la chambre K.

A gauche de l'étuve, on voit un petit vase de laiton D (fig. 318), à parois très-minces, lequel est suspendu, par des fils de soie, sur un petit chariot qu'on fait avancer ou reculer à volonté dans la chambre K. Ce vase, qui est destiné à servir de calorimètre, est rempli d'eau, et dans cette eau plonge un thermomètre t qui en donne la température. Enfin, un thermomètre t' , placé près des appareils, donne la température de l'air ambiant.

Lorsque le thermomètre T indique que la substance placée dans le panier c a pris une température stationnaire, ce qui a lieu au bout de deux heures et demie

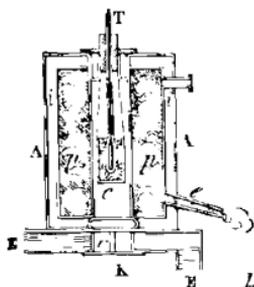


Fig. 319.

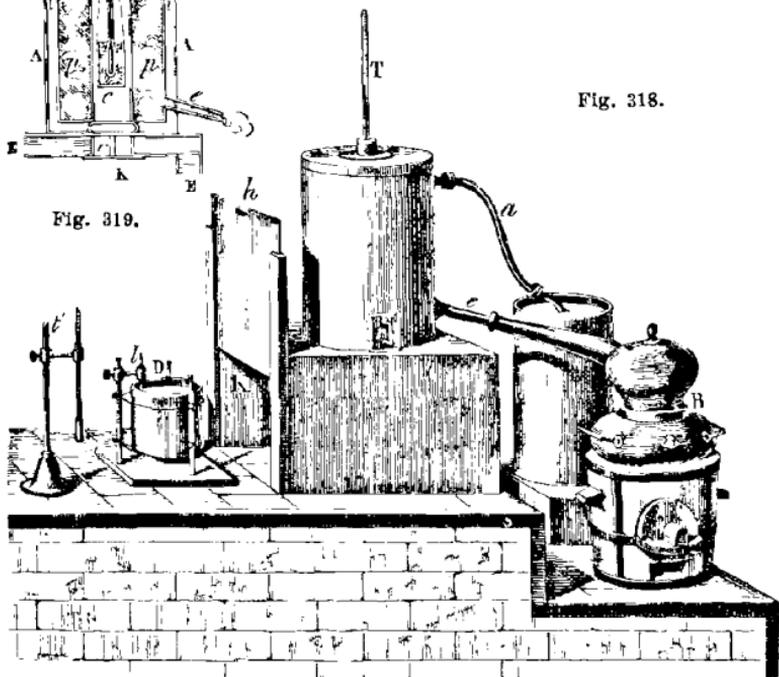


Fig. 318.

à trois heures, on soulève l'écran h , et l'on fait avancer le vase D juste au-dessous du compartiment central de l'étuve. Tirant alors le registre r , on laisse tomber rapidement, dans l'eau du vase D, le panier c et les matières qu'il contient, sauf le thermomètre T, qui reste fixé à un bouchon. Retirant aussitôt le chariot et le vase D, on agite l'eau de celui-ci jusqu'à ce que le thermomètre t devienne stationnaire. La température qu'il indique alors est celle représentée par θ dans la formule du paragraphe précédent. Cette température connue, le reste du calcul s'opère comme ci-dessus. Toutefois on tient compte de la chaleur cédée au calorimètre par le panier de laiton, et de celle qui est cédée au milieu ambiant.

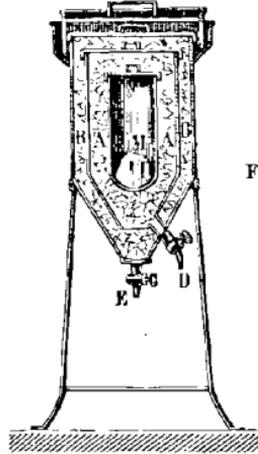
398. **Méthode de la fusion de la glace.** — La méthode que nous allons décrire est fondée sur la chaleur latente absorbée par la glace qui se fond, quantité de chaleur qui, ainsi qu'on le verra bientôt (404), est de 79 unités pour 1 kilogramme

de glace. L'appareil employé dans cette méthode est dû à Lavoisier et à Laplace, et se désigne sous le nom de *calorimètre de glace*. La figure 320 le représente vu extérieurement, et la figure 321 en donne une coupe verticale. Cet appareil est formé de trois enveloppes concentriques de fer-blanc. Dans celle du centre se

Fig. 320
(h = 80).



Fig. 321.



place le corps M, dont on cherche la chaleur spécifique; les deux autres compartiments sont remplis de glace pilée. La glace du compartiment A est destinée à être fondue par le corps chaud, et celle du compartiment B arrête la chaleur qui rayonne de l'enceinte sur l'appareil. Deux robinets D et E servent à l'écoulement de l'eau provenant de la fusion de la glace.

Pour trouver la chaleur spécifique d'un corps solide au moyen de ce calorimètre, on détermine d'abord le poids m de ce corps en kilogrammes, puis on le porte à une température connue t , en le maintenant quelque temps dans un bain chaud d'eau ou d'huile, ou dans un courant de vapeur; on le porte ensuite rapidement dans l'enveloppe centrale, on remet aussitôt les couvercles, et on les recouvre de glace (fig. 321). On recueille alors l'eau qui s'écoule par le robinet D, et lorsque l'écoulement est arrêté, on en détermine le poids P en kilogrammes, poids qui représente évidemment celui de la glace fondue. Or, puisque pour 1 kilogramme de glace fondue, 79 unités de chaleur disparaissent, pour P kilogrammes, il doit disparaître P fois 79. D'un autre côté, cette quantité de chaleur est nécessairement égale à celle qui a été perdue par le corps M pendant qu'il s'est refroidi de t degrés à zéro, c'est-à-dire à mtc (395).

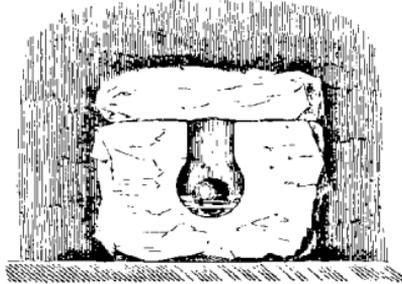


Fig. 322.

$$\text{On a donc } mtc = 79P; \text{ d'où } c = \frac{79P}{mt}.$$

La méthode du calorimètre de glace offre plusieurs causes d'erreur. La principale est qu'une partie de l'eau provenant de la fusion reste adhérente à la glace qui

n'a pas été fondue; le poids P ne peut donc être évalué exactement. De plus, l'air extérieur qui pénètre dans le calorimètre par les robinets augmente la quantité de glace fondue. On remédie en partie à ces inconvénients en faisant usage, comme Black, du *puits de glace*. On nomme ainsi un trou qu'on pratique dans un morceau de glace compacte, au moyen d'un fer chaud, et dans lequel on place le corps dont on cherche la chaleur spécifique, après l'avoir chauffé à une température connue (fig. 322). Ayant d'avance dressé les bords du trou avec un fer chaud, on le recouvre d'un morceau de glace aussi dressé avec soin, de manière qu'il ferme exactement. Lorsqu'on juge que le corps est refroidi jusqu'à zéro, on le retire ainsi que l'eau de fusion, et le poids de celle-ci étant déterminé, il ne reste plus qu'à le substituer dans la formule ci-dessus.

399. **Chaleurs spécifiques des liquides.** — Les chaleurs spécifiques des liquides se déterminent également par la méthode du refroidissement, par celle des mélanges ou par celle du calorimètre de Lavoisier et de Laplace. Seulement, dans cette dernière méthode, ils doivent être renfermés dans un vase ou dans des tubes de verre qui se placent dans le compartiment M (fig. 321).

En comparant entre eux les nombres du tableau ci-après, on voit que l'eau et l'essence de térébenthine ont une chaleur spécifique beaucoup plus grande que celles des autres substances, et surtout des métaux. Cette propriété est générale pour les liquides. C'est parce que l'eau a une très-grande chaleur spécifique qu'elle met beaucoup de temps à s'échauffer et à se refroidir, et qu'elle absorbe alors ou cède beaucoup plus de chaleur que toute autre substance, à masses et à températures égales. Cette double propriété est utilisée dans la trempe de l'acier et dans le chauffage à circulation d'eau chaude (464).

400. **Chaleurs spécifiques moyennes des solides et des liquides entre zéro et 100 degrés.** — M. Regnault a calculé, par la méthode des mélanges et par celle du refroidissement, les chaleurs spécifiques d'un grand nombre de corps. Nous donnons ici les nombres qu'il a obtenus par la première méthode, pour les corps employés le plus fréquemment dans les arts.

SUBSTANCES	CHALEURS SPÉCIFIQUES	SUBSTANCES	CHALEURS SPÉCIFIQUES
Eau	1,0080 .	Cobalt	0,10694
Essence de térébenthine.	0,42590	Zinc	0,09555
Noir animal calciné . . .	0,26085	Cuivre	0,09515
Charbon de bois calciné.	0,24111	Laiton	0,09391
Soufre	0,20259	Argent	0,05701
Graphite	0,20187	Étain	0,05623
Verre des thermomètres.	0,19768	Iode	0,05412
Phosphore	0,18870	Antimoine	0,05077
Diamant	0,14687	Mercure	0,03332
Fonte blanche	0,12983	Or	0,03244
Acier doux	0,1175 .	Platine lamée	0,03243
Fer	0,11379	Plomb	0,03140
Nickel	0,10863	Bismuth	0,03084

Les nombres compris dans cette table représentent les chaleurs spécifiques moyennes entre zéro et 100 degrés; il résulte, en effet, des travaux de Dulong et Petit sur la chaleur, que les chaleurs spécifiques augmentent avec la température; celles des métaux, par exemple, sont plus grandes entre 100 et 200 degrés qu'entre zéro et 100 degrés, et plus grandes encore de 200 à 300 degrés. C'est-à-dire

que, pour élever la température d'un corps de 200 à 300 degrés, il faut plus de chaleur que pour l'élever de 100 à 200 degrés, et, dans ce dernier cas, plus que pour l'élever de zéro à 100 degrés.

En un mot, l'augmentation des chaleurs spécifiques avec la température est d'autant plus sensible, que les corps sont plus près de leur point de fusion. Au contraire, toute action qui augmente la densité d'un corps et son aggrégation moléculaire diminue sa chaleur spécifique.

Les chaleurs spécifiques des liquides augmentent avec la température beaucoup plus rapidement que celles des solides. L'eau cependant fait exception, sa chaleur spécifique augmentant beaucoup moins que celles des autres liquides.

Enfin, une même substance possède, à l'état liquide, une plus grande chaleur spécifique qu'à l'état solide; par exemple, la chaleur spécifique de la glace est la moitié de celle de l'eau. A l'état gazeux, la chaleur spécifique est plus petite qu'à l'état liquide.

401. Loi de Dulong et Petit sur les chaleurs spécifiques des atomes. — En 1819, Dulong et Petit firent connaître cette loi remarquable, que le produit de la chaleur spécifique des corps simples par leur poids atomique est le même pour tous les corps et égal à 37; c'est-à-dire que, *pour les corps simples, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.*

M. Regnault, après avoir déterminé avec beaucoup de soin les chaleurs spécifiques d'un grand nombre de corps, a trouvé que le produit du poids atomique par la chaleur spécifique n'est pas rigoureusement constant, comme l'avaient annoncé Dulong et Petit, mais que ce produit varie entre 38 et 42, variation qui peut résulter de ce que les chaleurs spécifiques ne sont pas déterminées à des distances égales du point de fusion des corps.

M. Regnault a été conduit, en outre, aux deux lois suivantes sur les chaleurs spécifiques des corps composés et des alliages :

1° *Dans les corps composés ayant même formule atomique, la chaleur spécifique est en raison inverse du poids atomique.*

2° *Pour des températures un peu éloignées du point de fusion, la chaleur spécifique des alliages est exactement la moyenne des chaleurs spécifiques des métaux composants.*

* **402. Chaleurs spécifiques des gaz.** — On rapporte la chaleur spécifique des gaz ou à celle de l'eau ou à celle de l'air : dans le premier cas, elle représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré un poids donné de gaz, comparativement à celle qui serait nécessaire au même poids d'eau; dans le second, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré un volume donné de gaz, comparativement à celle qu'il faudrait pour le même volume d'air.

Dans cette dernière manière de considérer les chaleurs spécifiques des gaz, on peut, en outre, supposer ceux-ci à *pression constante* et à volume variable, ou bien à *volume constant*, sous une pression variable.

Les chaleurs spécifiques des gaz par rapport à l'eau ont été déterminées, en 1812, par Delaroche et Bérard. Pour cela, on mesurait la quantité de chaleur cédée à un poids connu d'eau par un poids aussi connu de gaz qui circulait dans un serpentín placé dans le liquide. On en déduisait ensuite la chaleur spécifique du gaz à l'aide d'un calcul analogue à celui qui a été donné pour la méthode des mélanges.

Les mêmes physiciens ont déterminé les chaleurs spécifiques des gaz, à pression constante, par rapport à l'air, en comparant entre elles les quantités de chaleur cédées à un même poids d'eau par des volumes égaux de gaz et d'air, à la même température et à la même pression pendant toute l'expérience.

Depuis les travaux de Delaroche et Bérard, de la Rive et Marcat, en 1835, ont appliqué la méthode du refroidissement à la même détermination.

Enfin, les chaleurs spécifiques des gaz, à volume constant, toujours par rapport à l'air, ont été calculées par Dulong, en s'appuyant sur la formule qui fait connaître la vitesse de propagation du son dans les différents gaz (210).

D'après les calculs de Laplace et de Poisson, et les expériences de Clément et Désormes, de Delaroché et Bérard, de Gay-Lussac et de Dulong, on avait admis jusqu'ici que la chaleur spécifique des gaz à pression constante est toujours plus grande qu'à volume constant. Mais, dans un travail récent et par une méthode entièrement nouvelle, M. Regnault a trouvé que la différence entre ces deux espèces de chaleurs spécifiques est nulle ou extrêmement petite.

Delaroché et Bérard ont donné sur les chaleurs spécifiques des gaz la première loi suivante, et Dulong la seconde.

1° *A volume égal, tous les gaz simples ont des chaleurs spécifiques égales.*

2° *Lorsque deux gaz simples se combinent sans condensation, le gaz résultant possède, à volume égal, la même chaleur spécifique que les gaz simples composants.*

Les expériences de M. Regnault ont fait voir que la première loi n'est rigoureuse que pour les gaz soumis à la loi de Mariotte, c'est-à-dire éloignés de leur point de liquéfaction. Les mêmes expériences n'ont pas confirmé la seconde loi.

Chaleurs spécifiques des gaz simples par rapport à l'eau.

GAZ	A VOLUME ÉGAL	A POIDS ÉGAL
Oxygène	0,24049	0,21751
Hydrogène	0,23690	0,40900
Azote	0,23680	0,24380
Chlore	0,29645	0,12099

403. **Mesure de la chaleur latente de fusion.** — Sachant (334) que lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, il y a disparition d'une quantité de chaleur plus ou moins considérable, on appelle *chaleur de fusion d'un corps solide le nombre de calories (393) nécessaire à 1 kilogramme de ce corps pour passer, sans élévation de température, de l'état solide à l'état liquide.* La chaleur de fusion des corps se détermine par la méthode des mélanges en s'appuyant sur ce principe, que, lorsqu'un corps à l'état liquide se solidifie, il restitue une quantité de chaleur rigoureusement égale à celle qu'il avait absorbée pendant la fusion.

Soit proposé, par exemple, de déterminer la chaleur de fusion du plomb. On fond un poids M de ce corps, et, après en avoir pris la température T , on le verse dans une masse d'eau dont on connaît le poids m et la température t . Cela posé, représentons par c la chaleur spécifique du plomb, par x sa chaleur de fusion, c'est-à-dire la quantité de chaleur consommée par l'unité de poids pour se fondre, ou, ce qui est la même chose, celle qui reparait au moment de la solidification; enfin, soit θ la température finale que prend l'eau échauffée par le plomb.

La masse d'eau s'étant échauffée de t à θ degrés, elle a absorbé une quantité de chaleur représentée par $m(\theta - t)$ (395); d'un autre côté, la masse de plomb, en se refroidissant de T à θ , a cédé, d'une part, une quantité de chaleur $Mc(T - \theta)$; de l'autre, au moment de la solidification, elle dégage une quantité de chaleur représentée par Mx . On a donc l'équation

$$Mc(T - \theta) + Mx = m(\theta - t), \text{ d'où } x = \frac{m(\theta - t) - Mc(T - \theta)}{M}.$$

404. **Chaleur de fusion de la glace.** — La chaleur de fusion de la glace est celle dont la connaissance présente le plus d'intérêt par les applications qu'on peut en faire. Elle se détermine encore par la méthode des mélanges. Pour cela, soient M un poids de glace à zéro, et m un poids d'eau chaude à t degrés, suffisant pour fondre toute la glace. On projette celle-ci dans l'eau, et aussitôt que

la fusion est complète, on mesure la température finale du mélange. Si on la représente par θ , l'eau s'étant refroidie de t degrés à θ a cédé une quantité de chaleur égale à $m(t - \theta)$. Quant à la glace, si l'on représente par x sa chaleur de fusion, elle consomme, pour se fondre, une quantité de chaleur Mx ; mais en outre, après la fusion, l'eau qui en provient s'échauffe, et sa température s'élève de zéro à θ degrés; elle prend donc alors une quantité de chaleur $M\theta$. Donc, enfin, on a l'équation $Mx + M\theta = m(t - \theta)$, d'où on tire la valeur de x .

Par ce procédé, et en évitant avec le plus grand soin toutes les causes d'erreur, M. Desains a trouvé que la chaleur de fusion de la glace est 79; c'est-à-dire que 1 kilogramme de glace qui se fond, consomme la quantité de chaleur nécessaire pour élever 79 kilogrammes d'eau de zéro à 1 degré, ou, ce qui est la même chose, 1 kilogramme d'eau de zéro à 79 degrés.

Person, qui a fait de nombreuses recherches sur les chaleurs de fusion, a trouvé expérimentalement les nombres suivants pour les chaleurs de fusion de plusieurs corps simples et composés :

Glacé.	79,25	Bismuth	12,64
Azotate de soude	62,97	Soufre	9,37
Zinc.	28,13	Plomb	5,37
Argent.	21,07	Phosphore	5,03
Étain.	14,25	Alliage de Darcet.	4,50
Cadmium.	13,66	Mercure	2,83

405. *Mesure de la chaleur de vaporisation.* — On a vu (365) que les liquides, en se vaporisant, font disparaître une quantité de chaleur très-considérable, qu'on désigne sous le nom de *chaleur d'élasticité* ou de *chaleur de vaporisation*. Pour déterminer la *chaleur de vaporisation* d'un liquide, c'est-à-dire le nombre de calories qu'absorbe 1 kilogramme de ce liquide pour se vaporiser sans augmentation de température, on admet comme évident qu'une vapeur qui se liquéfie rend libre une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'elle avait absorbée en se formant.

Cela posé, la méthode qu'on emploie est la même que pour la détermination des chaleurs spécifiques des gaz par rapport à celle de l'eau. La figure 323 représente l'appareil employé dans ce genre de recherches par Despretz. La vapeur se produit dans une cornue C, où sa température est indiquée par un thermomètre, et se rend dans un serpentin plongé dans de l'eau froide. Là elle se condense et cède au serpentin et à l'eau du vase B sa chaleur latente. L'eau qui résulte de la condensation se rend dans un récipient P, auquel aboutit le serpentin, et dont on l'extrait, à la fin de l'expérience, pour la peser, son poids étant celui de la vapeur qui a circulé dans l'appareil. Un agitateur A, qu'on fait marcher avec la main, sert à mélanger les couches d'eau dans le vase B, pour que toute la masse soit à la même température. Celle-ci est donnée par un thermomètre t placé dans l'eau du serpentin. Enfin, du récipient P part un tube terminé par un robinet R. Lorsqu'on veut faire varier la pression, et, par suite, la température de la vapeur, on met ce robinet en communication par un tube de caoutchouc avec une machine pneumatique ou avec une pompe de compression.

Ces détails connus, pour déterminer la chaleur de vaporisation du liquide qui est dans la cornue, on le chauffe d'abord jusqu'à l'ébullition, et c'est alors seulement qu'on fait communiquer la cornue avec le serpentin; puis c'est après avoir rompu la communication qu'on recueille l'eau qui s'est condensée dans le récipient P, et qu'on la pèse.

Soient alors M le poids de la vapeur condensée, T sa température à son entrée dans le serpentin, et x sa chaleur de vaporisation. Soient de même m le poids de l'eau dans laquelle plonge le serpentin, y compris celui du vase B, du serpentin, du thermomètre et de l'agitateur réduits en eau (396), t la température initiale de l'eau, et θ sa température finale quand on arrête l'expérience.

La chaleur cédée par 1 kilogramme de vapeur qui se condense étant α , la chaleur cédée par les M kilogrammes de vapeur par le fait seul de la condensation est $M\alpha$. De plus, indépendamment de toute condensation, le poids d'eau M , se refroidissant de T à θ , perd une quantité de chaleur représentée par $M(T - \theta)$; d'où l'on voit que la quantité totale de chaleur cédée par la vapeur est

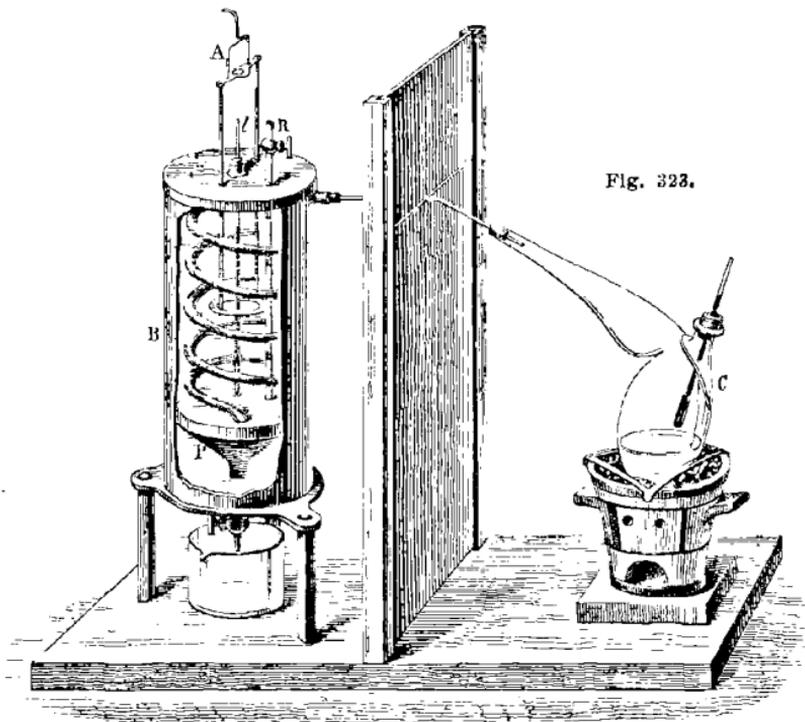


Fig. 323.

$M\alpha + M(T - \theta)$. D'ailleurs, la chaleur gagnée par l'eau, le vase et les accessoires est $m(\theta - t)$; donc on a

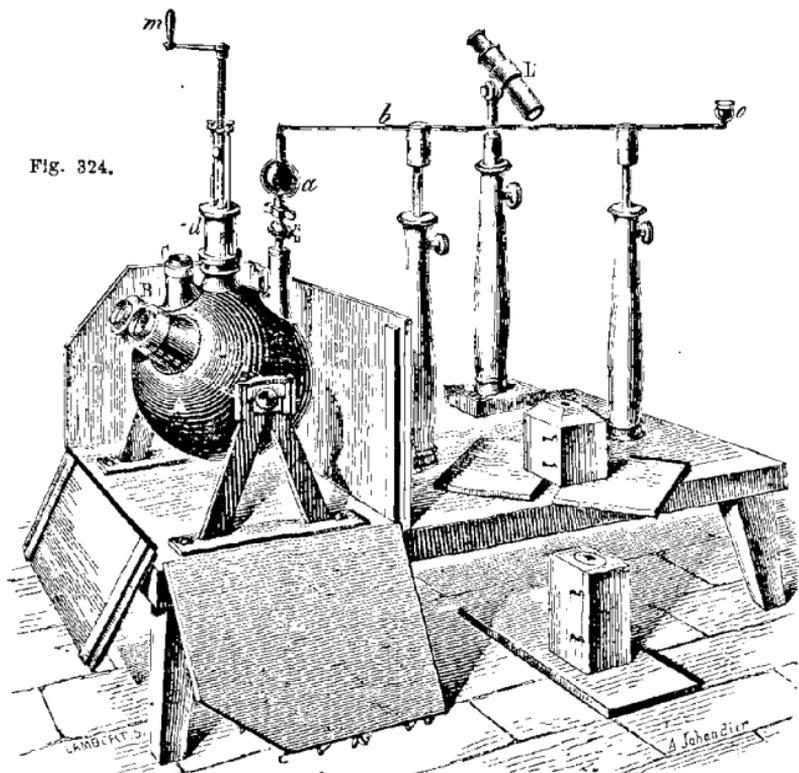
$$M\alpha + M(T - \theta) = m(\theta - t), \text{ d'où } \alpha = \frac{m(\theta - t) - M(T - \theta)}{M}.$$

Despretz a trouvé ainsi pour la chaleur d'élasticité de la vapeur d'eau, à 100°, le nombre 540; c'est-à-dire que 1 kilogramme d'eau à 100 degrés dépense, pour se vaporiser, la chaleur nécessaire pour élever 540 kilogrammes d'eau de zéro à 1 degré. M. Regnault a trouvé 537, et M. Fabre et Silbermann, 535,8.

406. **Calorimètre à mercure de Fabre et Silbermann.** — Ce calorimètre sert à mesurer les capacités calorifiques et la chaleur dégagée dans les actions chimiques. Il se compose d'un réservoir de fonte A, de 1^{re} 76 de capacité, et plein de mercure (fig. 324). A gauche sont deux tubulures B, auxquelles sont fixés deux moufles de fonte qui se prolongent dans l'intérieur. Dans chaque moufle est une éprouvette de verre où se place la substance sur laquelle on expérimente. Un seul moufle et une seule éprouvette suffisent dans la plupart des expériences; les deux moufles sont utilisés quand on veut comparer les quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans deux réactions différentes. A la troisième tubulure

C correspond encore un moufle et une éprouvette. Cette tubulure, qui est verticale, est destinée à la détermination des capacités calorifiques avec l'appareil de M. Regnault (397), et elle se place alors au-dessous du registre r de la figure 318.

La tubulure d renferme un piston plongeur d'acier dont on va voir ci-après



l'usage. Une tige, qu'on fait tourner avec une manivelle m , et qui est garnie d'un pas de vis, transmet son mouvement au piston dans le sens de la verticale ; mais, par un mécanisme particulier, elle ne lui communique pas son mouvement de rotation. La tubulure de droite porte une boule de verre a , à laquelle est soudé un long tube capillaire de verre bo , partagé en parties d'égale capacité.

D'après cette description, on voit que le calorimètre à mercure n'est autre chose qu'un thermomètre à très-gros réservoir et à tige très-capillaire, et par conséquent très-sensible. Toutefois le tube bo ne marque pas les températures du mercure qui est dans le réservoir, mais les calories qui lui sont cédées par les substances qui sont dans les mouffes.

Pour effectuer cette graduation, on expérimente de la manière suivante. On commence par faire marcher le piston plongeur d dans un sens ou dans l'autre, afin de refouler ou d'aspirer le mercure jusqu'à ce qu'il s'arrête, dans le tube bo , au point d'où doit partir la graduation ; puis ayant versé dans le moufle qu'on a choisi une quantité de mercure qui ne devra plus varier, on y introduit une petite éprouvette de verre mince e (fig. 325), laquelle est maintenue fixe contre la

poussée du mercure par un petit taquet extérieur qui n'est pas représenté dans le dessin. L'éprouvette ainsi disposée, on y introduit la pointe d'une pipette à boule, contenant de l'eau distillée qu'on chauffe jusqu'à la température d'ébullition : retournant alors la pipette de la position n à la position n' , on laisse écouler une partie du liquide dans l'éprouvette.

La chaleur cédée par le liquide au mercure du réservoir A le faisant se dilater, la colonne de mercure, dans le tube bo (fig. 324), s'allonge d'un nombre de divisions n . Or si l'on pèse l'eau versée dans l'éprouvette, et si l'on prend sa température finale au moment où la colonne de mercure devient stationnaire dans

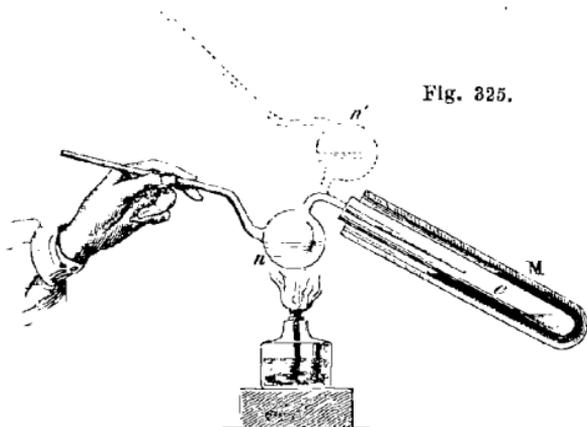


Fig. 325.

le tube bo , le produit du poids de l'eau en kilogrammes par le nombre de degrés dont l'eau s'est refroidie, fait connaître le nombre de calories cédées par l'eau à tout l'appareil. Divisant par n ce nombre de calories, le quotient donne le nombre a de calories correspondant à une seule division du tube bo .

Le nombre a une fois connu, pour l'appliquer à la recherche des chaleurs spécifiques des liquides, on porte à une température T un poids M du liquide dont on cherche la capacité calorifique c , puis on le verse dans l'éprouvette C . Représentant par θ la température finale du liquide, et par n le nombre de divisions dont a avancé la colonne mercurielle bo , on a

$$Mc(T - \theta) = na, \text{ d'où } c = \frac{na}{M(T - \theta)}.$$

Les planchettes représentées autour du réservoir A sont à charnière et se relèvent de manière à former une caisse qu'on remplit de duvet de cygne ou de ouate, pour éviter toute déperdition de chaleur. On achève de clore la caisse avec les planchettes représentées sur la droite et avec deux petits étuis de bois qui se placent sur les tubulures d et a . Enfin, une lunette L, dont le pied peut glisser le long de la table, sert à lire les déplacements du mercure sur le tube bo .

407. Problèmes sur les chaleurs spécifiques et sur les chaleurs latentes.

— I. Dans un vase de verre pesant 12 grammes et contenant $0^{\text{lit}},15$ d'eau à 10 degrés, on projette un morceau de fer dont le poids est 20 grammes et la température 98 degrés; la température de l'eau montant alors à $11^{\circ},29$, on demande la chaleur spécifique du fer, sachant que celle du verre est 0,19768.

Ce problème se résout au moyen de la formule [4] du paragraphe 396, en y remplaçant les lettres M, m, m', c', t et θ , par les nombres qui leur correspondent dans l'énoncé ci-dessus. Quant au poids de l'eau, on l'obtient en observant que 1 litre d'eau pesant 1 kilogramme, $0^{\text{lit}},15$, ou, ce qui est la même chose, $0^{\text{lit}},150$, pèse 150 grammes, abstraction faite de la dilatation de l'eau de 4 à 10 degrés.

Cela posé, en faisant les substitutions dans la formule indiquée, il vient
 $20(98 - 11,29)c = (150 + 12 \times 0,19768)(11,29 - 10)$, d'où $c = 0,1135$.

II. Une masse de platine, pesant 40 grammes, est placée dans un four et y reste assez longtemps pour en prendre la température; en étant ensuite retirée et plongée dans une masse d'eau dont le poids est de 84 grammes et la température de 12 degrés, on observe que l'eau s'échauffe jusqu'à 22 degrés. On demande la température du four, sachant que la chaleur spécifique du platine est 0,03243.

Si l'on représente par t la température cherchée, le nombre d'unités de chaleur cédées par le platine, en se refroidissant de t degrés à 22, est $40 \times (t - 22) \times 0,03243$, d'après la formule $m(t' - t)c$ (395). De même, le nombre d'unités de chaleur absorbées par l'eau, dont la chaleur spécifique est 1, pour s'échauffer de 12 degrés à 22, est $84(22 - 12)$ ou 840. Or la quantité de chaleur absorbée par l'eau étant nécessairement la même que celle qui est perdue par le platine, on a
 $40 \times (t - 22) \times 0,03243 = 840$; d'où $t = 669,5$ degrés.

Il est à observer que cette valeur de t n'est qu'approximative, car le nombre 0,03243 est la chaleur spécifique du platine entre zéro et 100 degrés; mais on a vu qu'à une température plus élevée elle est plus grande (400); par conséquent, le nombre 669,5 est trop fort.

III. Ayant pratiqué une cavité dans un morceau de glace, on y enferme une masse d'étain qui pèse 55 grammes, et dont la température a été portée préalablement à 100 degrés. Quel sera le poids de glace fondu, sachant que la chaleur spécifique de l'étain est 0,05623, et que la chaleur de fusion de la glace est 79?

L'étain, se refroidissant ici de 100 jusqu'à zéro, perd un nombre d'unités de chaleur représenté par $55 \times 100 \times 0,05623$, toujours d'après la formule mc . Or 1 kilogramme de glace à zéro absorbant, pour se fondre, 79 unités de chaleur, x kilogrammes de glace absorbent $79 \times x$. On a donc

$$79x = 55 \times 100 \times 0,05623; \text{ d'où } x = 38,9.$$

IV. Quel est le poids de glace à projeter dans 9 litres d'eau pour les refroidir de 20 degrés à 5?

Soit M le poids cherché, en kilogrammes; ce poids absorbera, pour se fondre, un nombre d'unités de chaleur représenté par $79 M$ (404); mais le poids d'eau M , qui en résulte, étant à zéro au moment de la fusion, et devant s'échauffer de 5 degrés, absorbe une quantité de chaleur $5 M$; par conséquent, la chaleur totale absorbée est $79 M + 5 M$, ou $84 M$. Quant à la chaleur cédée par les 9 litres d'eau, en se refroidissant de 20 degrés à 5, elle est $9(20 - 5)$, ou 135. Donc

$$84 M = 135; \text{ d'où } M = 1^{\text{kg}},607.$$

V. Quel est le poids de vapeur d'eau, à 100 degrés, nécessaire pour échauffer, en se condensant, 208 litres d'eau de 14 degrés jusqu'à 32?

Soit p ce poids en kilogrammes, la chaleur latente de la vapeur d'eau étant 540 (405), p kilogrammes de vapeur, en se condensant, cèdent une quantité de chaleur représentée par $540 \times p$, et fournissent p kilogrammes d'eau à 100 degrés. Or cette eau, en se refroidissant ensuite jusqu'à 32 degrés, cède elle-même une quantité de chaleur égale à $p(100 - 32)$, ou $68 p$. D'ailleurs, les 208 litres qui s'échauffent de 14 degrés à 32, pesant 208 kilogrammes, toujours abstraction faite de la dilatation, absorbent une quantité de chaleur égale à $208(32 - 14)$ ou 3744 unités; on a donc

$$540 p + 68 p = 3744; \text{ d'où } p = 6^{\text{kg}},158.$$

VI. Dans un premier vase, on a de l'eau à 11 degrés; dans un second, de l'eau à 91; combien doit-on prendre de kilogrammes d'eau dans chacun d'eux pour former un bain de 250 kilogrammes à 31 degrés?

Soient x et y les nombres de kilogrammes à prendre respectivement dans chaque vase, on a d'abord $x + y = 250$ [1]. On obtient une deuxième équation en x et en y , en observant que x kilogrammes à 11 degrés contiennent $11x$ unités de chaleur,

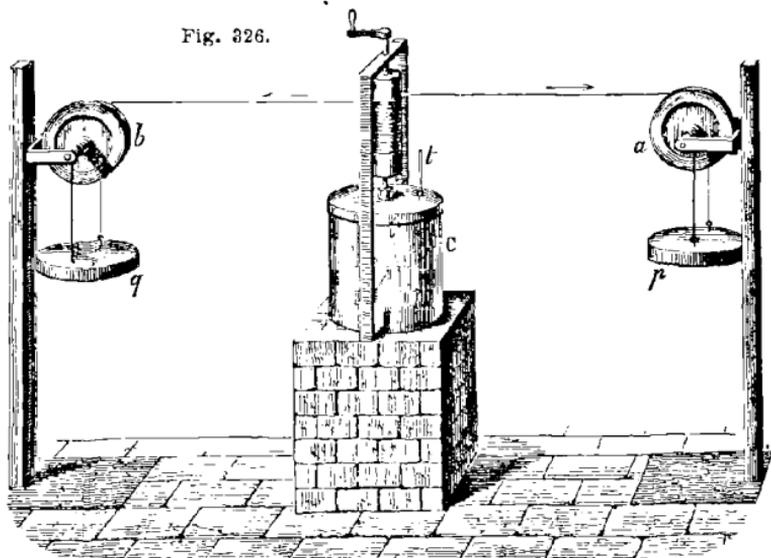
et que y kilogrammes à 91 degrés en contiennent un nombre représenté par $91y$. D'ailleurs, les 250 kilogrammes de mélange, à 31 degrés, renferment 250×31 , ou 7750 unités; on a donc l'équation $11x + 91y = 7750$ [2].

Les équations [1] et [2] étant résolues, on trouve $x = 187^{\text{kil}},5$, et $y = 62^{\text{kil}},5$.

ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

408. **Expériences de M. Joule.** — Après avoir fait connaître les quantités de chaleur nécessaires à l'échauffement des corps et à leurs changements d'état,

Fig. 326.



c'est ici le lieu de dire comment on a mesuré la quantité de chaleur à dépenser pour produire un travail mécanique donné (270). On sait, en effet, que la chaleur peut produire du travail mécanique, comme il arrive dans l'expansion des vapeurs et dans la dilatation des gaz; et, réciproquement, qu'on peut développer de la chaleur par un travail mécanique, par exemple, par la percussion, la pression, le frottement. Or les savants à qui est due la théorie dynamique de la chaleur (271) ne se sont pas bornés à montrer que la chaleur peut se transformer en travail; ils ont encore constaté qu'à toute quantité de chaleur disparue correspond une quantité déterminée de travail effectué, et, réciproquement, que pour tout travail consommé il y a une certaine quantité de chaleur qui apparaît; en un mot, qu'entre la chaleur et le travail il y a un rapport constant, ou *équivalence*. De là, on a nommé *équivalent mécanique* de la chaleur le travail que peut produire l'unité de chaleur; ou, réciproquement, le travail nécessaire pour échauffer 1 kilogramme d'eau de zéro à un degré (393).

Le docteur Mayer, le premier, en 1842, a calculé par des considérations théoriques l'équivalent mécanique de la chaleur; et M. Joule, en 1843, l'a déterminé par l'expérience. Ce savant a fait usage d'un calorimètre à eau dans lequel tournait un arbre vertical muni de palettes (fig. 326). La rotation s'opérait par deux cordons enroulés dans le même sens sur un treuil fixé à l'arbre des palettes, mais se déroulant suivant deux tangentes diamétralement opposées. Ces

cordons se rendaient sur deux poulies a et b , entraînées en sens contraires par deux poids égaux p et q .

En représentant par P la somme des poids p et q mesurés en kilogrammes, par h la hauteur de chute mesurée en mètres, le travail développé pendant la descente était Ph kilogrammètres (37). Le travail consommé par la résistance de l'eau au mouvement des palettes se transformant alors en chaleur, le liquide s'échauffait d'une quantité mesurée par un thermomètre qui plongeait dans le calorimètre. Connaissant le poids de celui-ci, le poids de l'eau et le nombre de degrés dont elle s'était échauffée, on calculait, par la formule $m\theta c$ (395), la quantité totale de chaleur produite; et le quotient $\frac{Ph}{m\theta c}$ donnait le travail correspondant à une seule unité, c'est-à-dire l'équivalent mécanique de la chaleur.

Toutefois, dans cette expérience, tout le travail n'étant pas transmis à l'eau, mais une partie étant consommée à vaincre les frottements, ou perdue dans le choc du poids contre le sol à la fin de sa chute, on a dû tenir compte de ces causes d'erreur. C'est en expérimentant ainsi, et en prenant la moyenne d'un grand nombre d'expériences, que M. Joule a trouvé, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, 424 kilogrammètres. C'est-à-dire que la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'eau développe une force motrice capable d'élever un poids de 424 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en 1 seconde; ou, réciproquement, qu'un poids de 424 kilogrammes, tombant de 1 mètre de hauteur, fournit la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer de zéro à 1 degré 1 kilogramme d'eau.

M. Joule a encore mesuré l'équivalent de la chaleur par la compression de l'air dans un calorimètre à eau; et enfin par la quantité de chaleur développée par le frottement de deux corps solides l'un contre l'autre dans un calorimètre à mercure. En France, M. Hirn et M. Fabre ont aussi mesuré expérimentalement l'équivalent de la chaleur. La moyenne de ces diverses expériences est 425 kilogrammètres, qui est le nombre adopté pour l'équivalent mécanique de la chaleur.

409. Applications de la thermodynamique. - Le principe de la transformation de la chaleur en travail, et réciproquement, rencontre de nombreuses applications. Par exemple, dans les machines à vapeur, on admettait, avant la connaissance de la théorie dynamique de la chaleur, que la quantité de chaleur que la vapeur cède en se liquéfiant à l'eau du condenseur, était exactement la même que celle qu'elle avait reçue du foyer pour se former. Or les expériences de M. Hirn ont fait voir qu'il n'en est pas ainsi : la chaleur cédée au condenseur est beaucoup moindre que celle enlevée à la chaudière, et d'autant moindre, que le travail mécanique total effectué par la machine est plus considérable. C'est-à-dire que la chaleur que possède la vapeur à sa sortie de la chaudière se partage en deux parties : l'une qui disparaît comme chaleur et se transforme en travail, l'autre qui se rend au condenseur. L'expérience fait voir que la première n'est que le cinquième de la seconde.

Les machines à air chaud d'Ericsson et autres conduisent au même résultat sur la transformation de la chaleur en travail; mais leur rendement est beaucoup plus considérable, car la théorie fait voir qu'elles peuvent convertir en travail la moitié de la chaleur dépensée.

Quant à la chaleur animale due à la combustion du carbone du sang dans les poumons, le docteur Mayer annonça, le premier, que tout animal est une machine à feu qui transforme cette même chaleur en travail, ce que M. Hirn a confirmé par l'expérience. À cet effet, ce savant a enfermé un homme dans une guérite close et observé les effets calorifiques et chimiques de sa respiration, d'abord lorsque l'homme était au repos pendant un certain temps, puis lorsqu'il travaillait à élever son propre poids sur la circonférence d'une roue mobile. Deux tubes de caoutchouc aboutissaient à la bouche du sujet, l'un lui amenant d'un gazomètre jaugé, l'air nécessaire à la respiration, et l'autre conduisant

l'air expiré à un second gazomètre aussi jaugeé; ce qui permettait de mesurer l'oxygène consommé et l'acide carbonique produit.

La température de l'air dans la guérite s'élevait progressivement, et devenait constante lorsque la chaleur perdue par le rayonnement égalait celle produite dans l'organisme. On remplaçait ensuite le sujet par la flamme d'un bec de gaz qu'on réglait de manière à amener l'air, dans la guérite, à la même température constante. Du volume de gaz brûlé, on déduisait la quantité de chaleur produite par le bec de gaz, et par suite, par l'homme, dans un temps donné.

Au repos, celui-ci consommait 30 grammes d'oxygène par heure pour 150 calories produites; lorsqu'il s'élevait sur la roue, il consommait 150 grammes d'oxygène, et le nombre de calories correspondant, qui aurait dû être 750, n'était que de 250. Donc 500 calories étaient consommées: 1° par le travail musculaire intérieur; 2° par le travail extérieur pour élever le poids de l'homme.

L'effet inverse s'observe quand un homme reçoit du travail au lieu d'en produire, quand il descend au lieu de monter; à 30 grammes d'oxygène absorbé correspondent alors plus de 150 calories, l'excès de chaleur étant dû au travail extérieur de la pesanteur pendant la descente.

Enfin, M. Béclard a constaté que lorsqu'on soulève un poids, l'échauffement des muscles est beaucoup moindre que lorsque la contraction se produit sans charge.

DÉCOMPOSITION PAR LA CHALEUR SEULE

* 410. **Dissociation.** — On a vu (272) que la chaleur produit sur les corps, outre leur échauffement, trois effets: dilatation, changement d'état et décomposition. Après avoir décrit les deux premiers, il nous reste à faire connaître le troisième, mais seulement d'une manière succincte, car il est plus du domaine de la chimie que de la physique.

La chaleur seule suffit pour décomposer partiellement ou en totalité un grand nombre de composés: les azotates, la plupart des carbonates, certains oxydes, les matières organiques. Or, de même que chaque solide a sa température de fusion propre, et chaque liquide sa température d'ébullition, l'expérience fait voir que chaque substance a aussi une température déterminée de décomposition totale. Pour l'eau, par exemple, cette température est de 2500 degrés. Cependant ce même liquide, placé dans des conditions convenables, se décompose partiellement à la température beaucoup moins élevée de 1000 à 1200 degrés. C'est ce qui arrive lorsqu'on fait passer un courant de vapeur d'eau dans un tube de porcelaine renfermant une capsule pleine d'argent fondu: l'eau est en partie décomposée, et son oxygène étant absorbé par l'argent, l'hydrogène se dégage avec l'excès de vapeur.

M. H. Sainte-Claire Deville a donné le nom de *dissociation* à ce phénomène de décomposition partielle par la chaleur à une température inférieure à celle de la décomposition totale. Ce savant, qui a étudié avec soin le phénomène de la dissociation, l'explique en le comparant à celui de l'évaporation des liquides, laquelle a lieu à des températures bien inférieures à celle de leur ébullition. C'est-à-dire que de même qu'il y a une température d'ébullition fixe pour chaque liquide, il y aurait pour chaque substance une température déterminée de décomposition complète; mais de même encore que la vaporisation commence à une température inférieure à celle de l'ébullition, les corps seraient partiellement décomposés à une température plus basse que celle de la décomposition totale.

Pour qu'il y ait dissociation, les gaz qui deviennent libres doivent se trouver dans des conditions qui ne leur permettent pas de se combiner de nouveau. C'est ce qui a lieu dans la décomposition de l'eau par l'argent fondu: tout l'oxygène étant absorbé, l'hydrogène se trouve libre et se dégage.

De même la vapeur d'eau ne donne aucune trace de décomposition lorsqu'elle passe dans un tube de platine chauffé à une température voisine de celle de la

fusion de ce métal; mais à une température beaucoup moindre, dans un tube de porcelaine non vernissée, la vapeur est décomposée parce que son hydrogène peut filtrer à travers les parois du tube (168). D'où l'on doit conclure que, dans le tube de platine ci-dessus, il y a probablement dissociation; mais les deux gaz, restant en présence à une température très-élevée, se recombinaient au fur et à mesure.

CHAPITRE VIII

CONDUCTIBILITÉ DES SOLIDES, DES LIQUIDES ET DES GAZ

411. **Conductibilité des solides.** — La *conductibilité* est la propriété que possèdent les corps de transmettre la chaleur plus ou moins facilement dans l'intérieur de leur masse. Ce genre de propagation s'opère par une communication de mouvement intérieure de molécule à molécule. Tous les corps ne conduisant pas également la chaleur, on appelle *bons conducteurs* ceux qui la transmettent facilement : tels sont surtout les métaux; et l'on donne le nom de *mauvais conducteurs* à ceux qui offrent une plus ou moins grande résistance à la propagation de la chaleur : tels sont les bois, le verre, les résines, et surtout les liquides et les gaz.

Pour comparer le pouvoir conducteur des solides, Ingenhousz, médecin hollandais, mort à la fin du siècle dernier, construisit le petit appareil qui porte son nom (fig. 327). C'est une caisse de fer-blanc ou de laiton, à laquelle sont fixées, à l'aide de tubulures et de bouchons, des baguettes de diverses substances, de fer, de cuivre, de bois, de verre. Ces baguettes pénètrent de quelques millimètres dans l'intérieur de la caisse, et sont recouvertes de cire jaune, qui fond à 61 degrés. La caisse étant remplie d'eau bouillante, on remarque que sur les baguettes métalliques la cire entre bientôt en fusion à une plus ou moins grande distance, tandis que sur les autres on n'observe aucune trace de fusion. Or le pouvoir conducteur est évidemment d'autant plus grand, que la partie sur laquelle la cire a été fondue s'étend plus loin.

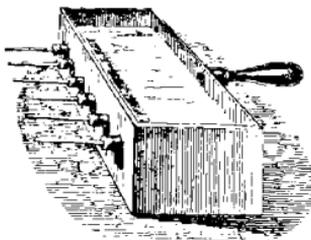


Fig. 327 (1—22).

Despretz a comparé les pouvoirs conducteurs des solides au moyen d'une barre prismatique dans laquelle sont, de décimètre en décimètre, de petites cavités remplies de mercure, dans chacune desquelles plonge un thermomètre (fig. 328). Cette barre

étant exposée par un bout à une source de chaleur constante, on voit les thermomètres monter successivement à partir de la source, puis indiquer des températures fixes, décroissantes d'un thermomètre au suivant. Par ce procédé, Despretz a vérifié la loi suivante, due à Lambert : *Les distances à la source croissant en progression arithmétique, les excès de température sur l'air ambiant décroissent en progression géométrique.*

Toutefois cette loi ne se vérifie que pour les métaux très-bons conducteurs, tels que l'or, le platine, l'argent et le cuivre; elle n'est qu'approchée pour le fer, le zinc, le plomb, l'étain, et nullement applicable aux corps non métalliques, comme le marbre, la porcelaine, etc.

En représentant par 1 000 le pouvoir conducteur de l'or, Despretz a trouvé que celui des substances suivantes est :

Platine.	981	Étain.	304
Argent.	973	Plomb.	179
Cuivre.	897	Marbre.	23
Fer.	374	Porcelaine.	12
Zinc.	363	Terre de brique.	11

Afin de ne pas altérer la forme des barres métalliques en y pratiquant des cavités comme l'avait fait Despretz, ce qui détruisait

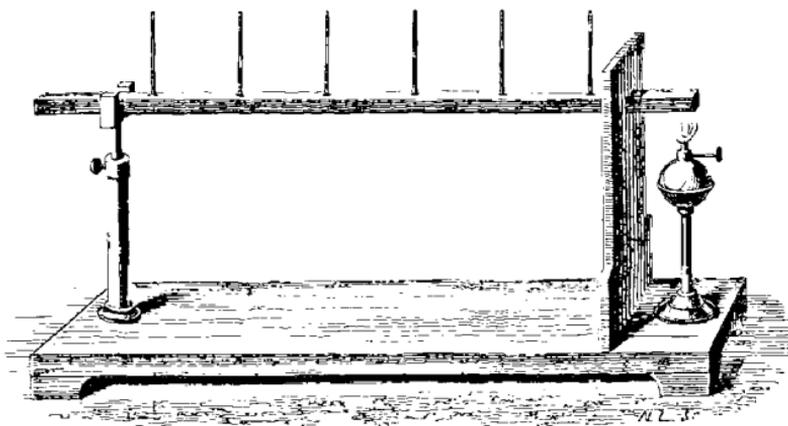


Fig. 328.

partiellement la continuité des métaux, Wiedmann et Franz, en 1853, ont employé un procédé à l'abri de cette cause d'erreur. Ils ont mesuré la température des barres, en leurs différentes parties, par les courants thermo-électriques qu'ils obtenaient en appliquant sur ces parties le point de soudure d'un élément de la pile thermo-électrique (297).

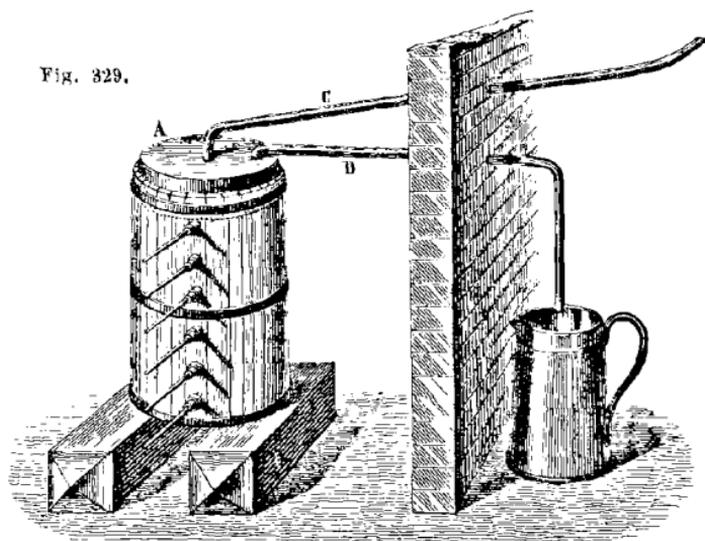
Les barres métalliques étaient aussi régulières que possible, et disposées dans un espace dont la température était constante. Une des extrémités des barres était en communication avec une source de chaleur, et l'élément thermo-électrique qui devait être mis en contact avec les barres avait de très-petites dimensions, afin de ne leur enlever que très-peu de chaleur.

En opérant ainsi, Wiedmann et Franz ont obtenu des résultats notablement différents de ceux de Despretz. En représentant par 100 la conductibilité de l'argent, ils ont trouvé :

Argent	100	Acier	11,6
Cuivre	77,6	Plomb	8,5
Or	58,2	Piatine	8,4
Étain	14,5	Alliage de Rose	2,8
Fer	11,9	Bismuth	1,8

Les substances organiques, comme le son, la paille, la laine, le coton, conduisent mal la chaleur; quant aux bois, de la Rive, à Genève, a fait voir que leur conductibilité est beaucoup plus grande dans le sens des fibres que transversalement, et que les bois les plus denses sont les meilleurs conducteurs.

412. **Conductibilité des liquides.** — La conductibilité des liqui-

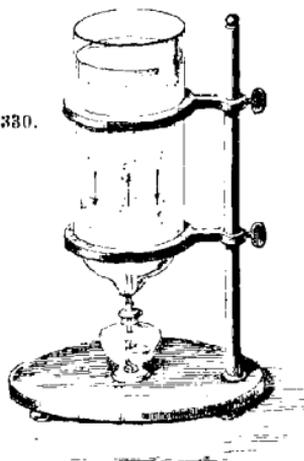


des est extrêmement faible, le mercure seul, qui est un métal, faisant exception. Elle est même tellement faible, que Rumford admettait qu'elle était nulle. Cependant Murray fit voir qu'en chauffant la couche supérieure d'un liquide, les couches infé-

rieures s'échauffaient, même dans un vase de glace à zéro, dont les parois ne pouvaient s'échauffer sans se fondre.

Despretz, ayant repris cette expérience, trouva que non-seulement les liquides conduisent la chaleur, mais que leur conductibilité est soumise à la loi de Lambert (411). Son appareil consistait en un tonneau de 1^m,50 de hauteur, rempli d'eau et fermé à sa partie supérieure par un vase de cuivre A (fig. 329). Le long d'une même douve du tonneau sont percés des trous dans lesquels sont fixés des thermomètres. Un courant d'eau à 100 degrés arrive lentement dans le vase A par un tuyau C, et s'en écoule par un second tuyau D. Le vase étant maintenu ainsi à une température constante, la couche d'eau en contact avec lui s'échauffe, puis la couche inférieure, et ainsi successivement des couches suivantes, ce qu'indiquent les thermomètres. Or, la température étant stationnaire depuis longtemps, et l'expérience ayant été prolongée pendant 36 heures, Despretz a trouvé que la chaleur se propage dans les liquides suivant la même loi que dans les barres métalliques, mais la conductibilité est incomparablement plus faible.

Fig. 330.



413. Mode d'échauffement des liquides. — Lorsqu'on chauffe les liquides par leur partie inférieure, il résulte de leur faible conductibilité que c'est par des courants ascendants et descendants, qui s'établissent dans leur masse, que l'échauffement se produit. Ces courants s'expliquent par la dilatation des couches inférieures, qui, devenues moins denses, s'élèvent et sont remplacées par les couches supérieures plus froides, et, par suite, plus denses. On rend ces courants visibles en projetant dans l'eau de la sciure de bois, qui monte et descend avec eux (fig. 330).

414. Conductibilité des gaz. — On ne peut apprécier directement la conductibilité des gaz, à cause de leur grand pouvoir diathermane (442) et de l'extrême mobilité de leurs molécules ; mais lorsqu'ils sont gênés dans leurs mouvements, leur conductibilité paraît à peu près nulle. On remarque, en effet, que toutes les substances entre les filaments desquelles de l'air reste stationnaire offrent une grande résistance à la propagation de la chaleur : telles sont la paille, le coton, l'édredon, les fourrures.

Quand une masse gazeuse s'échauffe, c'est surtout par son contact avec un corps chaud et par les courants ascendants qui proviennent de la dilatation, de la même manière que dans les liquides.

415. **Conductibilité de l'hydrogène.** — Magnus a cherché la conductibilité propre de chaque gaz, au moyen d'un tube de verre fermé par un robinet et disposé verticalement. Au bas du tube, à l'intérieur, était un thermomètre qu'on observait à travers le verre, tandis que l'extrémité supérieure était maintenue à 100 degrés. En expérimentant avec ce tube successivement vide, puis rempli de différents gaz plus ou moins condensés, Magnus a obtenu les résultats suivants :

1^o La température du thermomètre s'élève plus dans l'hydrogène que dans tous les autres gaz.

2^o Elle est plus élevée dans l'hydrogène que dans le vide, et d'autant plus, que ce gaz est plus condensé.

3^o Dans les autres gaz, la température est moins élevée que dans le vide, et d'autant moins, que les gaz sont plus condensés.

La conductibilité de l'hydrogène est une confirmation de l'opinion émise par plusieurs chimistes que ce gaz est un métal.

416. **Convection.** — Entre la conductibilité calorifique dans les solides et celle dans les liquides et les gaz, il existe une différence qu'il importe de remarquer : tandis que dans les premiers la chaleur se transmet par une véritable radiation intérieure de molécule à molécule, dans les liquides et dans les gaz elle se propage par le déplacement même des molécules, par des courants intérieurs, comme le représente, pour les liquides, la figure 330. Pour caractériser ce mode de propagation de la chaleur, les physiciens anglais lui ont donné le nom de *convection*, d'un mot qui signifie *transporter*. En effet, la convection, dans les liquides et dans les gaz, est le transport des molécules des parties chaudes vers les parties froides.

On verra, en MÉTÉOROLOGIE, une application importante de la convection à la formation des courants atmosphériques et des courants marins.

417. **Application de la conductibilité.** — La plus ou moins grande conductibilité des corps rencontre de nombreuses applications. S'agit-il, par exemple, de conserver un liquide longtemps chaud, on l'enferme dans un vase à double enveloppe dont l'intervalle est rempli de matières non conductrices : sciure de bois, verre pilé, charbon pulvérisé, paille. On emploie le même moyen pour empêcher un corps d'absorber la chaleur : c'est ainsi que, pour conserver de la glace dans la saison chaude, on l'entoure de paille ou d'une couverture de laine.

Dans nos habitations, si les carreaux nous paraissent plus froids que le parquet, c'est qu'ils conduisent mieux la chaleur. La sensation de chaleur ou de froid que nous ressentons au contact de certains corps est due à la conductibilité. Si leur température est moins élevée que la nôtre, ils nous paraissent plus froids qu'ils ne sont, à cause de la chaleur qu'ils nous enlèvent en vertu de leur conductibilité : c'est ce qui a lieu pour le marbre. Si, au contraire, leur température est supérieure à celle de notre corps, ils nous semblent plus chauds qu'ils ne sont, par la chaleur qu'ils nous cèdent des divers points de leur masse : c'est le phénomène que nous présente une barre de fer exposée au soleil.

CHAPITRE IX

RAYONNEMENT, RÉFLEXION ET ABSORPTION DE LA CHALEUR

418. **Rayonnement ou radiation.** — Lorsqu'un corps est placé dans une enceinte dont la température est plus ou moins élevée que la sienne, on observe toujours que la température du corps s'élève ou s'abaisse progressivement, jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'enceinte; d'où l'on conclut que le corps a gagné ou perdu une certaine quantité de chaleur qu'il a reçue des corps voisins ou qu'il leur a cédée. La chaleur se transmet donc d'un corps à un autre, à travers l'espace. Cette propagation, qui se produit à toutes les distances et dans toutes les directions, se désigne sous le nom de *rayonnement*, ou sous celui de *radiation*; et l'on nomme *absorption* l'inverse de la radiation, c'est-à-dire la pénétration de la chaleur rayonnante dans les corps. Enfin, on appelle *rayon de chaleur*, *rayon calorifique*, la ligne suivant laquelle la chaleur se propage, et *faisceau* un ensemble de rayons. Si ceux-ci s'écartent les uns des autres, le faisceau est *divergent*; s'ils sont parallèles, le faisceau lui-même est dit *parallèle*.

Il ne faudrait pas croire qu'il n'y a que les corps que nous désignons vulgairement sous le nom de *corps chauds*, qui émettent de la chaleur, et que les *corps froids*, qui en absorbent. Tous les corps, chauds ou froids, émettent et absorbent constamment de la chaleur, seulement en quantités inégales.

Dans la théorie dynamique de la chaleur, le rayonnement est la communication à l'éther du mouvement vibratoire des molécules de la matière, et lorsqu'un corps se refroidit, c'est parce que ses molécules perdent une partie de leur mouvement, qu'elles cèdent à l'éther. Une fois engendrées, les ondes de l'éther vont choquer

les molécules des corps qu'elles rencontrent, lesquels s'échauffent à leur tour; en sorte que c'est par un échange continu de mouvement que se produisent tous les phénomènes d'échauffement et de refroidissement; et nous-mêmes, c'est purement en notre qualité de récipients ou de cessionnaires de ce mouvement que nous sommes conscients de la chaleur et du froid.

Dans l'étude de la chaleur rayonnante, il y a lieu de distinguer la chaleur *obscur*e et la chaleur *lumineuse* : la première est celle émise par un corps non lumineux, comme un vase rempli d'eau à 100 degrés, et la seconde, celle émise par un corps lumineux, comme le soleil, une masse métallique chauffée au rouge. On verra que la chaleur obscure et la chaleur lumineuse diffèrent par quelques-unes de leur propriétés (435 et 441).

419. **Lois du rayonnement.** — Le rayonnement de la chaleur présente les trois lois suivantes :

1^o *Le rayonnement a lieu dans toutes les directions autour des corps.* En effet, si l'on place un thermomètre dans différentes directions autour d'un corps chaud, il indique, dans toutes, une élévation de température.

2^o *Dans un milieu homogène, le rayonnement se fait en ligne droite.* Car, si l'on interpose un écran sur la droite qui joint une source calorifique à un thermomètre, celui-ci cesse d'être influencé par la source.

Mais en passant d'un milieu dans un autre, de l'air dans le verre, par exemple, les rayons calorifiques, de même que les rayons lumineux, changent de direction, phénomène qu'on désigne sous le nom de *réfraction*, et dont on verra les lois en optique, ces lois étant les mêmes pour la lumière et pour la chaleur.

3^o *La chaleur se propage dans le vide.* On a d'abord admis que la présence d'un milieu pondérable était nécessaire au rayonnement de la chaleur. Or la propagation de la chaleur lumineuse dans le vide se trouve démontrée par celle que nous envoie le soleil à travers les espaces planétaires, lesquels ne contiennent aucune matière pondérable. Quant à la propagation de la chaleur obscure dans le vide, on la constate par l'expérience suivante, due à Rumford. Ayant soudé, dans la paroi d'un ballon de verre d'un demi-litre de capacité, un thermomètre dont le réservoir occupe le centre (fig. 331), on soude au col du ballon un long tube barométrique, puis on remplit le ballon et le tube de mercure sec; retournant ensuite l'appareil, on plonge le bout

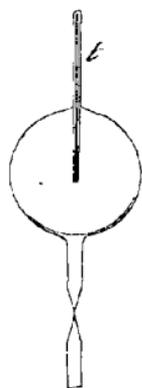


Fig. 331.

ouvert dans une cuvette pleine de mercure, exactement comme dans l'expérience de Torricelli (fig. 105). Le mercure s'abaissant à la hauteur moyenne de 76 centimètres, le vide se fait dans le ballon et dans une partie du tube. Chauffant alors celui-ci à la lampe, au-dessus du niveau du mercure, jusqu'à la fusion du verre, la pression extérieure déprime les parois du tube, qui se soudent et ferment hermétiquement le ballon. Or, ce dernier étant ainsi complètement purgé d'air, dès qu'on l'expose à une source de chaleur, qu'on le plonge, par exemple, dans de l'eau chaude, on voit le thermomètre monter presque instantanément; donc la chaleur obscure se propage dans le vide, car le verre est trop mauvais conducteur pour que la propagation s'opère aussi rapidement par les parois du ballon et la tige du thermomètre.

Quant à la vitesse de propagation de la chaleur, elle n'a pas été déterminée : on sait seulement qu'elle doit peu différer de celle de la lumière, si elle ne lui est pas rigoureusement égale; car la lumière solaire et la plupart des lumières artificielles sont constamment accompagnées de rayons de chaleur.

420. Intensité de la chaleur rayonnante, causes qui la font varier.

— On prend pour *intensité* de la chaleur rayonnante la *quantité de chaleur reçue sur l'unité de surface dans l'unité de temps*. Trois causes modifient cette intensité suivant les lois données ci-après : la distance de la source de chaleur, l'obliquité des rayons calorifiques par rapport à la surface qui les émet, et leur obliquité par rapport à la surface qui les reçoit.

1^{re} Loi. — *L'intensité de la chaleur rayonnante est en raison inverse du carré de la distance.* Cette

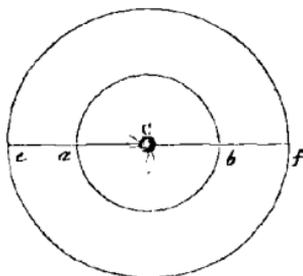
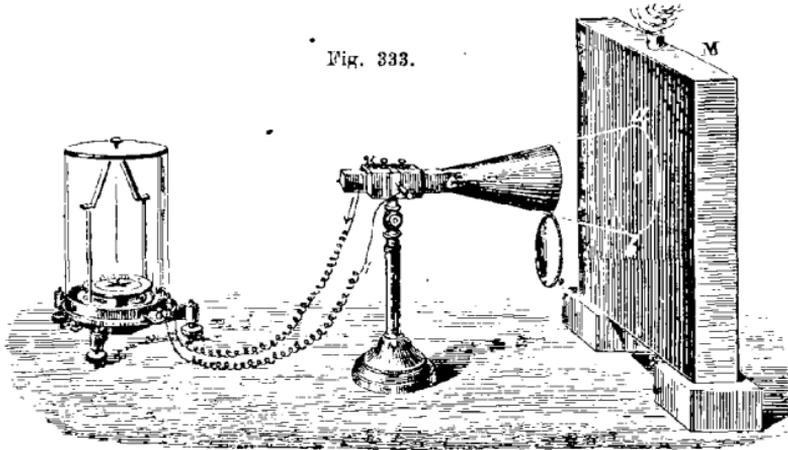


Fig. 332.

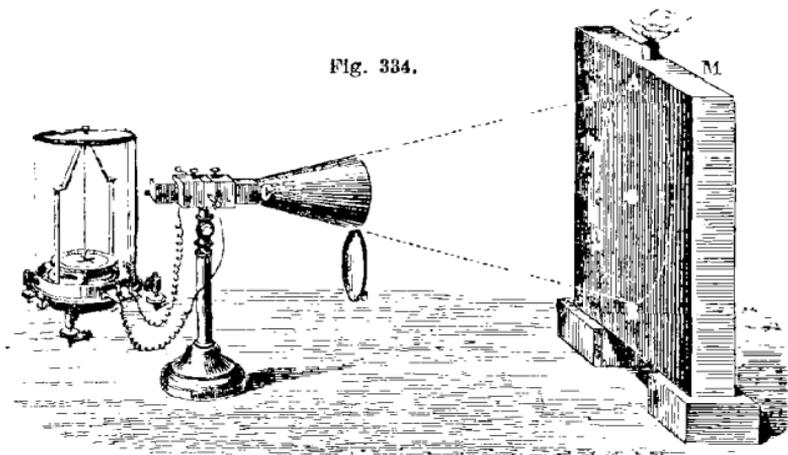
loi peut se démontrer par le raisonnement et par l'expérience. En effet, soit d'abord une sphère creuse *ab* (fig. 332), d'un rayon quelconque, et à son centre une source de chaleur constante *C*. Chaque unité de surface de la paroi intérieure reçoit une quantité déterminée de chaleur. Or si l'on suppose que le rayon de la sphère soit doublé et devienne *Cf*, sa surface, d'après un théorème connu de géométrie, sera quadruplée. La paroi intérieure contiendra donc quatre fois plus d'unités de surface, et comme la quantité de chaleur émise du centre reste la même, chaque unité en recevra nécessairement quatre fois moins.

Pour démontrer la même loi expérimentalement, on prend une caisse de fer-blanc *M* remplie d'eau chaude, et dont la face anté-

ricure est recouverte de noir de fumée (fig. 333); puis l'on dispose en avant de cette face l'appareil thermo-électrique de Melloni (300). La pile est munie de son réflecteur conique, et la paroi interne de celui-ci est recouverte de noir de fumée pour empêcher



toute réflexion intérieure (432). La face de la pile étant d'abord placée à une petite distance co , l'aiguille du galvanomètre est écartée et s'arrête, par exemple, à 80 degrés.



Or, si l'on recule la pile à une distance CO double de co (fig. 334), le galvanomètre conserve la même déviation 80, ce qui montre que la pile reçoit toujours la même quantité de chaleur. Il en est encore de même si on la porte à une distance trois, quatre fois

plus grande. Ce résultat semble d'abord contradictoire à la loi qu'il s'agit de démontrer, mais au contraire il la confirme. En effet, dans sa première position, la pile ne reçoit de chaleur que de la portion circulaire ab de la paroi de la caisse, tandis que, dans la seconde, c'est la portion circulaire AB qui rayonne vers elle. Les deux cônes ACB et acb étant semblables, et la hauteur du premier étant double de la hauteur du second, le diamètre AB est lui-même double de ab , et, par suite, la surface AB quadruple de la surface ab , puisqu'on sait que la surface du cercle est proportionnelle au carré de son rayon. Donc, puisque la surface rayonnante de la caisse croissant comme le carré de la distance, le galvanomètre reste stationnaire, il faut que l'intensité de la chaleur reçue par la pile soit en raison inverse du même carré.

Il importe d'observer que cette loi ne s'applique qu'aux rayons calorifiques divergents; pour des rayons parallèles, l'intensité est la même à toutes les distances, sauf l'absorption par les milieux que la chaleur traverse.

2^{me} Loi. — *L'intensité des rayons calorifiques émis obliquement par une surface rayonnante est proportionnelle au cosinus de l'angle que font ces rayons avec la normale à la même surface.* Pour démontrer cette loi, soient, en projection horizontale, P la pile de Melloni en communication avec son galvanomètre par deux

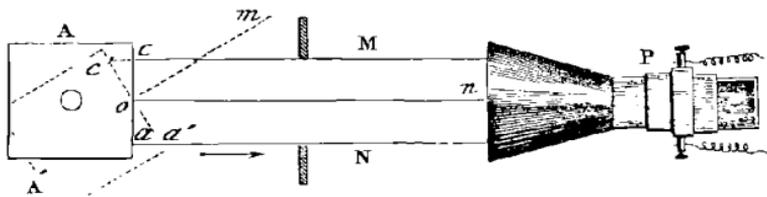


Fig. 335.

fils conducteurs, et A un cube de fer-blanc rempli d'eau chaude (fig. 335). Le cube étant d'abord dans la position A, telle que sa paroi antérieure soit perpendiculaire au faisceau parallèle MN qui tombe sur la pile, le galvanomètre marque une certaine déviation, 45 degrés, par exemple, le rayonnement étant dû alors à la portion ac de la paroi du cube. Si l'on tourne celui-ci dans une position A' , telle que sa paroi antérieure devienne oblique au faisceau MN, on observe que le galvanomètre continue à marquer 45. La surface rayonnante étant actuellement $a'c$ plus grande que ac , si l'on représente par i l'intensité des rayons perpendiculaires à ac , et par i' l'intensité des rayons obliques à $a'c$, puis, l'effet est le même dans les deux cas, ces intensités sont nécessairement en raison inverse des surfaces ac et $a'c$; on a donc $i' \times \text{surf. } a'c = i \times \text{surf. } ac$ [1]. Or, la surface ac étant la projection de la surface $a'c$, on a, d'après un théorème connu de trigonométrie, $\text{surf. } ac = \text{surf. } a'c \cos \text{co}c'$; ou $\text{surf. } ac = \text{surf. } a'c \cos \text{mon}$, puisque les angles mon et $\text{co}c'$ sont égaux comme ayant les côtés perpendiculaires; portant la valeur de surface ac dans l'égalité [1], et supprimant le facteur commun, il vient $i' = i \cos \text{mon}$, égalité qui montre la loi.

Cette loi, connue sous le nom de *loi du cosinus*, n'est pas générale; en effet, M. Desains a constaté qu'elle ne se vérifie que dans un cas très-restrict, celui où les corps sont, comme le noir de fumée, dénués de pouvoir réflecteur (432).

3^{me} Loi. — *L'intensité des rayons calorifiques qui tombent obliquement sur une surface est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons incidents avec la normale à la surface.* Cette loi se démontre de la même manière que la précédente. En effet, soient une source de chaleur constante A, et un faisceau parallèle MN, tombant normalement sur une surface plane, et soit *ac* la partie de cette surface qui reçoit le faisceau (fig. 336). Si l'on incline la surface suivant *a'c'*, la partie *a'c'*, plus grande que *ac*, reçoit la même quantité de chaleur du faisceau

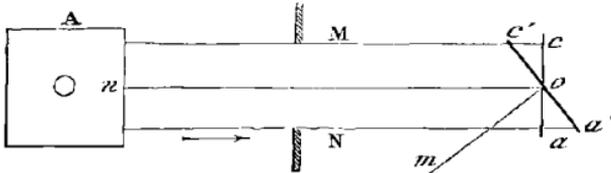


Fig. 336.

MN; mais cette chaleur étant répartie sur une surface plus grande, son intensité diminue; et l'on a encore $i' \times \text{surf. } a'c' = i \times \text{surf. } ac$; d'où l'on déduit par le même calcul que ci-dessus, $i' = i \cos m$, égalité qui démontre la troisième loi.

421. Équilibre mobile de température. — Deux hypothèses ont été faites sur le rayonnement. Dans la première, on suppose que lorsque deux corps, à des températures inégales, sont en présence, il y a seulement rayonnement du corps le plus chaud vers le plus froid, celui-ci n'émettant rien vers le premier; cela, jusqu'à ce que la température du corps le plus chaud, baissant graduellement, soit la même que celle de l'autre corps, et alors tout rayonnement cesse. Cette hypothèse a été remplacée par la suivante, due à Prevost, de Genève. D'après ce savant, tous les corps, quelle que soit leur température, émettent constamment de la chaleur dans toutes les directions. Alors il y a perte, c'est-à-dire refroidissement, pour ceux dont la température est la plus élevée, parce que les rayons qu'ils émettent sont d'une plus grande intensité que ceux qu'ils reçoivent. Au contraire, il y a gain, c'est-à-dire échauffement, pour ceux dont la température est la moins élevée. Il vient ainsi un moment où la température est la même de part et d'autre; mais alors il y a encore échange de chaleur entre les corps, seulement chacun reçoit autant qu'il émet; c'est pourquoi la température reste constante. C'est cet état particulier qu'on désigne sous le nom d'*équilibre mobile de température*.

422. Loi de Newton sur le refroidissement. — Un corps, dans le vide, ne se refroidit que par rayonnement. Dans l'atmosphère, il se refroidit en outre par son contact avec l'air. Dans les deux cas, la vitesse de refroidissement est la *quantité de chaleur perdue dans l'unité de temps*; elle est d'autant plus grande, que la différence de température est plus considérable. Elle est plus grande dans les gaz que dans le vide, et varie avec la nature des gaz. Elle est plus grande, par exemple, dans l'hydrogène que

dans l'air. Enfin, elle dépend encore du pouvoir émissif des corps et de la pression.

Newton a posé sur le refroidissement des corps, dans le vide, la loi suivante : *La quantité de chaleur qu'un corps perd, dans l'unité de temps, est proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de l'enceinte.* Dulong et Petit ont fait voir que cette loi n'est pas générale, et qu'on ne doit l'appliquer qu'à des excès de température qui ne dépassent pas 20 à 30 degrés. Au delà, la quantité de chaleur perdue est plus grande que la loi ne l'indique. Si, au lieu du refroidissement des corps, on considère leur échauffement, la loi de Newton s'y applique identiquement.

423. **Conséquences de la loi de Newton.** — 1^o Lorsqu'un corps est exposé à une source de chaleur constante, sa température ne saurait s'élever indéfiniment; car la quantité de chaleur qu'il reçoit en temps égaux est toujours la même, tandis que celle qu'il perd croît avec l'excès de sa température sur celle de l'air ambiant. Il vient donc un moment où la quantité de chaleur émise égale celle qui est absorbée, et la température reste alors stationnaire.

2^o La loi de Newton, appliquée au thermomètre différentiel, fait voir que ses indications sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit. Soit, en effet, un thermomètre différentiel dont l'une des boules reçoit les rayons émis par une source constante : l'instrument indique d'abord des températures croissantes, puis devient bientôt stationnaire. A ce moment, la quantité de chaleur que reçoit la boule égale celle qu'elle perd. Mais cette dernière, d'après la loi de Newton, est proportionnelle à l'excès de la température de la boule sur celle de l'enceinte, c'est-à-dire au nombre de degrés marqué par le thermomètre; donc, *ce nombre de degrés est proportionnel à la quantité de chaleur que reçoit l'instrument.*

RÉFLEXION, ÉMISSION ET ABSORPTION DE LA CHALEUR

424. **Lois de la réflexion.** — Lorsque des rayons calorifiques tombent sur la surface d'un corps, ils se

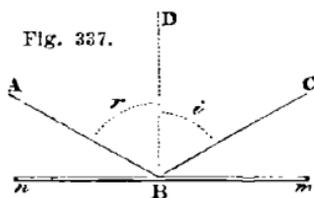


Fig. 337.

partagent généralement en deux parties : les uns pénètrent dans la masse du corps, les autres se relèvent comme repoussés par la surface, à la manière d'une bille élastique; ce qu'on exprime en disant qu'ils sont *réfléchis*.

Si l'on représente par *mn* (fig. 337) une surface plane réfléchissante, par *AB* le *rayon incident*, par *BD* une ligne perpen-

diculaire à la surface, qu'on nomme *normale*, par BC le *rayon réfléchi*, l'angle ABD est dit l'*angle d'incidence*, et DBC l'*angle de réflexion*. Cela posé, la réflexion de la chaleur, de même que celle de la lumière, est soumise aux deux lois suivantes :

1^o L'*angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence*.

2^o Le *rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante*.

425. **Démonstration expérimentale des lois de la réflexion de la chaleur.** — Ces lois se démontrent avec le thermo-multiplicateur de Melloni, ou au moyen des miroirs concaves (428). La

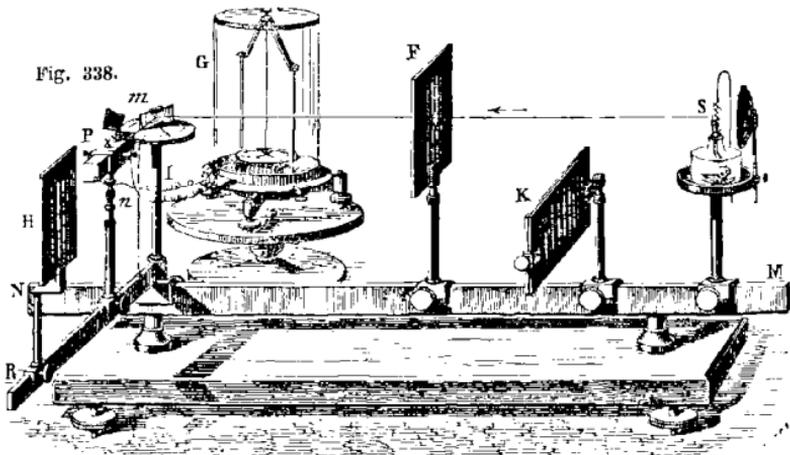


figure 338 montre comment se fait l'expérience avec l'appareil de Melloni. Sur une règle horizontale MN, d'un mètre de longueur et divisée en millimètres, sont fixées différentes pièces à l'aide de vis de pression. En S est une source de chaleur consistant en un cube de laiton plein d'eau à 100 degrés, ou en un fil de platine chauffé à blanc dans la flamme d'une lampe à alcool. En K, un écran plein intercepte, quand il est relevé, les rayons de chaleur venant de la source; en F, un deuxième écran, percé à son centre, est destiné à laisser passer un faisceau parallèle. A l'autre extrémité de la règle est une tige I, qui soutient un limbe gradué dont le zéro correspond à la direction de la règle MN, et, par suite, du faisceau Sm. Le limbe est percé à son centre d'un trou dans lequel tourne un axe qui porte un miroir métallique plan m. Autour de la tige I tourne librement une alidade R, sur laquelle est fixée la pile thermo-électrique P en communication avec son galvanomètre G. Entre la pile et le limbe gradué est une tige n, recourbée, à son extrémité, vers le bord du limbe gradué, pour

marquer sur celui-ci les déplacements angulaires de l'alidade. Enfin, un écran coudé H, porté par l'alidade, se place entre la source de chaleur et la pile, afin que celle-ci ne reçoive pas la chaleur réfléchie par le miroir. Dans le dessin, pour ne pas masquer la pile, l'écran n'est pas à la place qu'il doit occuper.

Ces détails connus, on procède à l'expérience en abaissant d'abord l'écran K. Un faisceau de chaleur passant aussitôt par le trou de l'écran F, tombe sur le miroir *m* et s'y réfléchit. Si l'alidade n'est pas dans la direction du faisceau réfléchi, celui-ci ne rencontre pas la pile, et le galvanomètre reste stationnaire; mais si l'on tourne lentement l'alidade, on trouve une position où le galvanomètre marque une déviation maximum, ce qui a lieu quand la pile reçoit en plein le faisceau réfléchi. Or, si l'on note alors la direction, sur le limbe gradué, d'une petite aiguille perpendiculaire au miroir et représentant sa normale, on observe qu'elle partage en deux parties égales l'angle formé par le faisceau incident et le faisceau réfléchi, ce qui démontre la première loi.

La seconde loi est aussi prouvée par la même expérience; car les pièces de l'appareil sont disposées de manière que les rayons incident et réfléchi sont dans un plan horizontal et, par suite, perpendiculaire à la surface réfléchissante, qui est verticale.

426. Réflexion irrégulière, ou diffusion. — Dans l'expérience qui précède, où la chaleur se réfléchit sur une surface bien polie, on a admis que la réflexion ne se produit que dans une seule direction; c'est la *réflexion régulière*, ou *réflexion spéculaire*. Or la chaleur qui tombe sur la surface d'un corps ne se réfléchit pas tout entière suivant les lois de la réflexion régulière (424) : une partie se réfléchit irrégulièrement, c'est-à-dire dans toutes les directions autour du point d'incidence, phénomène qu'on désigne sous le nom de *réflexion irrégulière*, ou de *diffusion*; et le *pouvoir diffusif* d'une substance est le rapport de la quantité totale de chaleur réfléchie dans toutes les directions à la quantité de chaleur incidente.

La réflexion régulière se produit sur les surfaces polies; la réflexion irrégulière, sur les surfaces rugueuses, comme les plaques dépolies de verre ou de métal.

Le pouvoir diffusif varie avec la source de chaleur et avec la surface réfléchissante. Avec le noir de fumée, les métaux et le verre polis, il est très-faible et peut être négligé. Avec les métaux mats, le verre dépoli, le papier, le blanc de céruse, le pouvoir diffusif est plus ou moins grand suivant la source de chaleur.

La diffusion de la chaleur a été découverte par Melloni, au moyen du thermo-multiplicateur (300). Pour cela, on reçoit, sur

une surface métallique mate ou recouverte de blanc de cèruse, un faisceau de chaleur, et sous quelque inclinaison ou de quelque côté qu'on dirige la pile du thermo-multiplicateur vers le point d'incidence, l'aiguille du galvanomètre dévie plus ou moins à l'instant où les rayons calorifiques rencontrent la surface réfléchissante; ce qui fait voir qu'il y a de la chaleur réfléchiée dans toutes les directions et sous toutes les inclinaisons.

427. Réflexion par les miroirs concaves. — On nomme *miroirs concaves*, ou *réflecteurs*, des surfaces sphériques ou paraboliques, de métal ou de verre, qui servent à concentrer en un même point des rayons lumineux ou calorifiques.

Nous ne considérerons que les miroirs sphériques. La figure 340

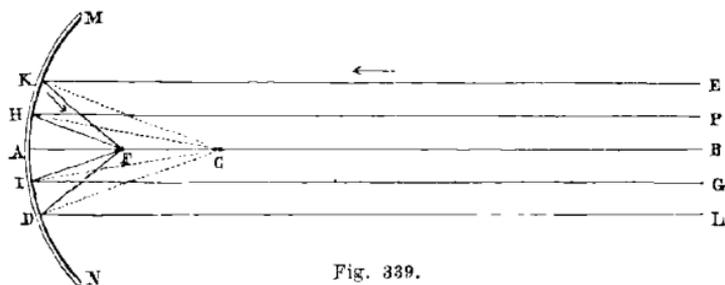


Fig. 339.

représente deux de ces miroirs; la figure 339 en donne une coupe médiane, qu'on nomme *section principale*. Le centre C de la sphère à laquelle le miroir appartient est le *centre de courbure*; le point A, milieu du réflecteur, le *centre de figure*; et la droite AB, menée par ces deux points, l'*axe principal*.

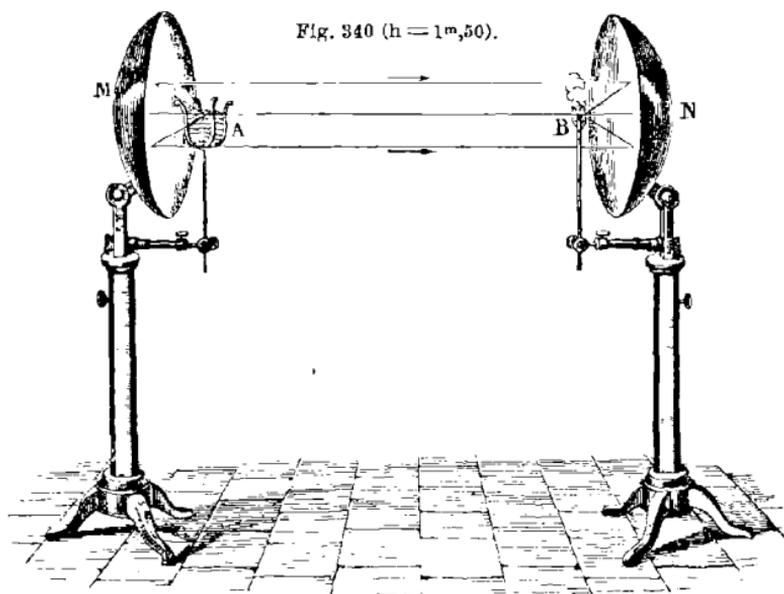
Afin d'appliquer aux miroirs sphériques les lois de la réflexion sur les surfaces planes, on les regarde comme formés d'une infinité de surfaces planes infiniment petites, appartenant en chaque point au plan tangent correspondant; cette hypothèse permet de conclure, par la géométrie, que les normales à ces petites surfaces viennent toutes concourir au centre de courbure.

Sur l'axe AB du miroir MN, supposons une source de chaleur assez éloignée pour que les rayons EK, PH..., qui en émanent, puissent être considérés comme parallèles entre eux. D'après l'hypothèse ci-dessus, que le miroir est formé d'une infinité de petits éléments plans, le rayon EK se réfléchit sur l'élément K absolument comme sur un miroir plan; c'est-à-dire que, CK étant la normale à cet élément, le rayon prend une direction KF telle, que l'angle CKF est égal à l'angle CKE. Les autres rayons PH, GI..., se réfléchissant de la même manière, tous ces rayons, après leur réflexion, vont très-sensiblement concourir en un même point F

situé sur le milieu de AC, ainsi qu'il sera démontré en optique (500). Il y a donc, en F, réunion des rayons calorifiques, et, par conséquent, une plus grande élévation de température qu'en tout autre point; de là le nom de *foyer* qu'a reçu ce point. La distance FA du foyer au miroir s'appelle la *distance focale*.

Dans la figure ci-dessus, la chaleur se propage suivant les lignes EKF, LDF..., dans le sens des flèches; mais réciproquement, si le corps chaud est placé en F, la chaleur se propage suivant les lignes FKE, FDL..., les rayons émis du foyer devant, après la réflexion, parallèles entre eux; d'où il résulte que la chaleur transmise tend alors à conserver la même intensité.

428. **Vérification, par les miroirs concaves, des lois de la réflexion.** — L'expérience suivante, faite pour la première fois, à Ge-



nève, par Pictet et Saussure, et connue sous le nom d'*expérience des miroirs conjugués*, vérifie non-seulement l'existence des foyers, mais en même temps les lois de la réflexion de la chaleur. Deux réflecteurs M et N (fig. 340) sont disposés à 4 ou 5 mètres de distance, de manière que leurs axes coïncident. Au foyer de l'un, dans un petit panier de fil de fer A, on place des charbons incandescents; au foyer de l'autre, un corps inflammable B, de l'amadou par exemple. Les rayons émis par la source A se réfléchissent une première fois sur le miroir M. Ayant pris, par l'effet de cette

réflexion, une direction parallèle à l'axe (427), les rayons viennent se réfléchir une seconde fois sur l'autre réflecteur et concourir en son foyer B. Ce qui le prouve, c'est que le morceau d'amadou placé en ce point prend feu, tandis qu'en deçà et au delà du foyer il ne s'enflamme pas.

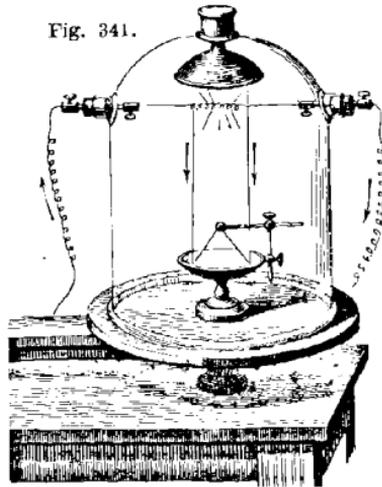
De cette expérience, on conclut que la chaleur se réfléchit suivant les mêmes lois que la lumière. En effet, si l'on place au foyer A, où étaient les charbons incandescents, une bougie allumée, et au foyer B un petit écran de verre dépoli ou de papier, on observe sur cet écran un foyer lumineux, exactement au même point où s'enflammait l'amadou. Donc la réflexion a lieu, dans les deux cas, suivant les mêmes lois. Or il sera démontré (490) que, pour la lumière, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence, et que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante; *donc il en est de même pour la chaleur.*

429. **Miroirs ardents.** — C'est en raison de la haute température qu'on peut obtenir aux foyers des miroirs concaves qu'on leur a donné le nom de *miroirs ardents*. On rapporte qu'Archimède embrasa les vaisseaux romains, devant Syracuse, au moyen de semblables miroirs. Buffon a construit des miroirs ardents dont la puissance prouve que le fait attribué à Archimède est possible. Ces miroirs étaient formés d'un grand nombre de glaces planes et étamées, longues de 22 centimètres sur 16 de large. Elles pouvaient être tournées indépendamment l'une de l'autre dans telle ou telle direction, de manière que les rayons réfléchis sur chacune vinssent concourir en un même point. Avec 128 glaces, par un soleil ardent d'été, Buffon enflamma ainsi une planche de bois goudronnée, à 68 mètres de distance.

En recevant les rayons solaires sur un miroir de laiton écroui, de 1 mètre de diamètre et d'un rayon de courbure de 2 mètres, on obtient au foyer une chaleur tellement intense, que la silice, la pierre ponce, le cuivre, l'argent, y fondent en quelques minutes.

430. **Réflexion dans le vide.** — La chaleur se réfléchit dans le

Fig. 341.



vide comme dans l'air. Pour le démontrer, on fait l'expérience suivante, due à Davy. Sous le récipient de la machine pneumatique, on dispose deux petits réflecteurs en regard l'un de l'autre (fig. 341). Au foyer de l'un est un thermomètre très-sensible, au foyer de l'autre une source de chaleur électrique consistant en un fil de platine qu'on rend incandescent en y faisant passer le courant d'une pile. Le thermomètre monte aussitôt de plusieurs degrés, phénomène qui est bien dû à la chaleur réfléchi; car le thermomètre n'accuse plus la même élévation de température, s'il n'est pas exactement au foyer du second réflecteur.

431. Réflexion apparente du froid. — Si l'on dispose deux réflecteurs en regard l'un de l'autre (fig. 340), et qu'au lieu de charbons incandescents, on place au foyer du miroir M une masse de glace ou un mélange réfrigérant, l'air ambiant étant à 12 ou 15 degrés, par exemple, un thermomètre différentiel, placé au foyer de l'autre réflecteur, indique un abaissement de température de plusieurs degrés. Ce phénomène semble d'abord résulter de rayons frigorifiques émis par la glace et réfléchis par les miroirs. Mais cette *réflexion apparente du froid*, comme on l'appelle, s'explique par l'équilibre mobile de température qui tend toujours à s'établir entre tous les corps (421). En effet, dans cette expérience, comme dans celle de l'inflammation de l'amadou, le miroir devant lequel est la masse de glace se substitue à une portion de l'enceinte. Par suite, les rayons de chaleur que celle-ci envoie vers le thermomètre sont interceptés par le miroir et remplacés par ceux qui, partis de la glace, tombent sur le premier miroir, s'y réfléchissent vers le second, et de là tombent enfin sur la boule du thermomètre. Or ces rayons ne compensent pas l'effet des rayons interceptés par le miroir, car leur température est plus basse; de là le refroidissement marqué par le thermomètre.

C'est au même effet qu'il faut rapporter le froid qu'on ressent près des murailles de plâtre, de pierre, et de toute masse dont la température est inférieure à celle de notre corps.

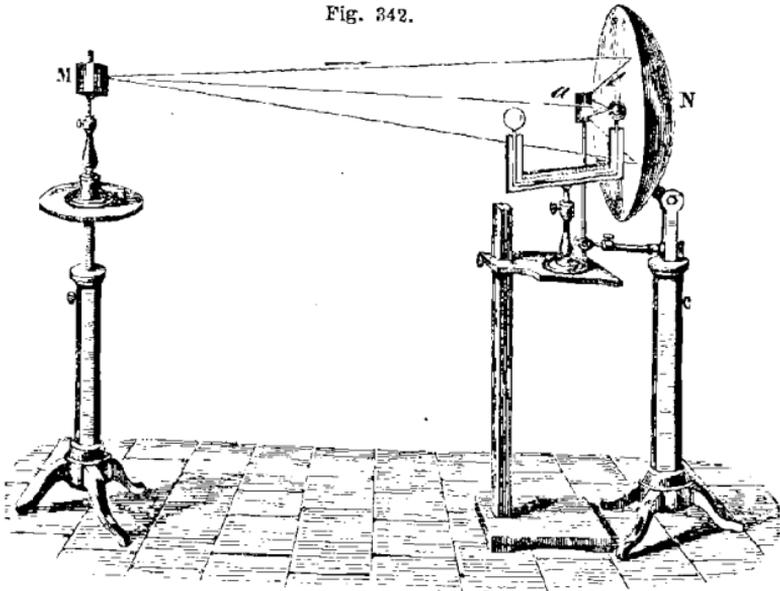
432. Pouvoir réflecteur. — Le *pouvoir réflecteur* d'une substance est sa propriété de réfléchir une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente.

On distingue le *pouvoir réflecteur absolu* et le *pouvoir réflecteur relatif*: le premier est le rapport de la quantité de chaleur réfléchi à la quantité de chaleur incidente; le second est le rapport entre la quantité de chaleur réfléchi par un corps et celle réfléchi par un autre, qui est ordinairement le cuivre jaune poli.

Le pouvoir réflecteur varie d'une substance à une autre. Afin d'étudier ce pouvoir sur diverses substances, sans en construire

autant de réflecteurs, Leslie disposa ses expériences comme le montre la figure 342. La source de chaleur est un cube M rempli d'eau à 100 degrés. Sur l'axe d'un réflecteur N, entre le foyer et le miroir, est fixée une plaque a de la substance dont on cherche le

Fig. 342.



pouvoir réflecteur. Avec cette disposition, les rayons émis par la source et réfléchis une première fois sur le miroir rencontrent la plaque a , s'y réfléchissent de nouveau et viennent former leur foyer entre la plaque et le miroir, en un point où l'on place la boule d'un thermomètre différentiel. Or, le réflecteur et le thermoscope restant les mêmes, et l'eau du cube étant toujours à 100 degrés, on observe que la température accusée par le thermomètre varie avec la nature des plaques a ; d'où l'on déduit, non pas le pouvoir réflecteur absolu d'un corps, mais le rapport de ce pouvoir à celui d'un autre corps pris pour terme de comparaison. En effet, conformément à ce qui a été dit (423, 2^o) sur l'application de la loi de Newton au thermomètre différentiel, les températures marquées par cet instrument sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit. Par conséquent, si une plaque de verre et une plaque de plomb, par exemple, font marcher le thermomètre différentiel, la première de 1 degré et l'autre de 6, on en conclut que la quantité de chaleur réfléchiée par le plomb est 6 fois plus grande que celle réfléchiée par le verre; car, celle émise par la source étant la

même, le miroir N en réfléchit la même portion, et la différence ne peut dépendre que du pouvoir réflecteur des plaques a .

C'est par ce procédé, et en représentant par 100 le pouvoir réflecteur du cuivre jaune, pris pour terme de comparaison, que Leslie a formé le tableau suivant des pouvoirs réflecteurs relatifs :

Cuivre jaune poli	100	Encre de Chine	13
Argent	90	Étain amalgamé	10
Étain plané	80	Verre	10
Acier	70	Verre huilé	5
Plomb	60	Noir de fumée	0

Ces nombres représentent les pouvoirs réflecteurs relatifs par rapport au cuivre jaune.

Melloni, le premier, a déterminé, à l'aide du thermo-multiplicateur, le pouvoir réflecteur absolu d'un certain nombre de substances. M. Desains, qui l'a déterminé pour plusieurs métaux, disposait l'appareil comme il l'est dans la figure 338. Ayant enlevé la plaque m , on tournait l'alidade R jusqu'à ce qu'elle fût dans le prolongement de la règle MN. La pile recevant directement la chaleur de la source, l'aiguille du galvanomètre marquait, par exemple, 48 degrés. Mettant alors sur le limbe gradué une plaque m , bien polie, du métal dont on cherchait le pouvoir réflecteur, on tournait l'alidade jusqu'à ce que la pile reçût la chaleur réfléchie par la plaque. Or le galvanomètre marquait actuellement une déviation moindre, soit 45 degrés, d'où le pouvoir absolu de la plaque était $\frac{1}{8}$. C'est ainsi que M. Desains a trouvé les pouvoirs absolus suivants, la chaleur étant réfléchie sous un angle de 50 degrés :

Plaqué d'argent	0,97	Acier	0,82
Or	0,95	Zinc	0,81
Laiton et cuivre rouge	0,93	Fer	0,77
Platine	0,83	Fonte de fer	0,74

On verra bientôt (437) quelles sont les causes qui, pour une même substance, font varier le pouvoir réflecteur.

433. **Pouvoir absorbant.** — Le *pouvoir absorbant* des corps est leur propriété de laisser pénétrer dans leur masse une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente. De même que pour les pouvoirs réflecteurs, on distingue les pouvoirs absorbants *absolus* et les pouvoirs absorbants *relatifs*.

M. Tyndall admet que l'absorption dépend du synchronisme qui existe entre les vibrations des atomes d'où émanent les ondulations de l'éther, et entre celles des atomes contre lesquelles ces ondulations viennent se heurter; ce qui explique comment la chaleur est plus absorbée par certains corps que par d'autres.

Le pouvoir absorbant d'un corps est toujours dans un ordre inverse de son pouvoir réflecteur; c'est-à-dire que plus un corps réfléchit la chaleur, moins il l'absorbe, et réciproquement. Mais les deux pouvoirs ne sont pas complémentaires; c'est-à-dire que la somme des quantités de chaleur réfléchie et absorbée ne représente pas la totalité de la chaleur incidente. Elle est toujours moindre; ce qui tient à ce que la chaleur incidente se divise réellement en trois parties : 1° une qui est absorbée et chauffe le corps; 2° une autre qui est réfléchie régulièrement, c'est-à-dire suivant les lois démontrées précédemment (424); 3° une troisième qui est réfléchie irrégulièrement (426). De plus, pour un certain nombre de corps, il y a à considérer une quatrième partie de chaleur, celle qui passe au travers sans les chauffer (439).

Pour déterminer le pouvoir absorbant des corps, Leslie a fait usage de l'appareil déjà employé à la recherche des pouvoirs réflecteurs (fig. 342). Il supprimait la plaque *a* et plaçait la boule du thermomètre différentiel au foyer même du réflecteur. Cette boule étant successivement recouverte de noir de fumée, de vernis, de feuilles d'or, d'argent, de cuivre, etc., le thermomètre, sous l'influence de la source *M*, indiquait une température d'autant plus élevée, que la substance qui couvrait la boule focale absorbait plus de chaleur. Leslie a constaté ainsi que le pouvoir absorbant d'un corps est d'autant plus grand, que son pouvoir réflecteur est plus faible. Toutefois, dans ces expériences, le rapport des pouvoirs absorbants ne peut se déduire de celui des températures marquées par le thermomètre, car ici la loi de Newton n'est pas rigoureusement applicable (423, 2°), cette loi n'étant vraie que pour des corps de même substance; tandis que l'enveloppe qui recouvre la boule focale varie à chaque observation. Mais on va voir ci-après (436) que les rapports des pouvoirs absorbants peuvent se déduire des rapports des pouvoirs émissifs.

Melloni a déterminé les pouvoirs absorbants relatifs, au moyen de son thermo-multiplicateur, par la méthode suivante. Il fixait devant la pile des plaques de cuivre minces, dont la face qui regardait la pile était recouverte de noir de fumée, tandis que la face qui recevait les rayons de la source de chaleur était recouverte de la substance dont on cherchait le pouvoir absorbant, par exemple, d'une couche de noir de fumée, de blanc de céruse, de gomme laque, ou d'une feuille de papier, d'or, d'étain. Ces diverses substances absorbant plus ou moins la chaleur incidente, les plaques de cuivre rayonnaient inégalement vers la pile, et le galvanomètre marquait des déviations différentes. En prenant pour source de chaleur un cube de Leslie rempli d'eau à 100 degrés, et

en représentant par 100 le pouvoir absorbant du noir de fumée, Melloni a trouvé ainsi les pouvoirs absorbants relatifs ci-après :

Noir de fumée.	100	Encre de Chine.	85
Blanc de céruse.	100	Gomme laque.	72
Colle de poisson.	91	Métaux	18

En représentant par a la chaleur absorbée par un corps, par r celle qui est réfléchie par ce corps, par d celle qui est diffusée (426), et par C la chaleur totale incidente, on a, pour les corps qui ne se laissent pas traverser par la chaleur, $a + r + d = C$.

Avec les métaux polis, dont le pouvoir diffusif est très-faible, l'égalité ci-dessus se réduit à $a = C - r$.

Avec les substances, comme les métaux mats, le papier, dont le pouvoir réfléchissant est très-petit, elle devient $a = C - d$.

Enfin, si le pouvoir réfléchissant et le pouvoir diffusif sont en même temps négligeables, on a sensiblement $a = C$; c'est ce qui a lieu pour le noir de fumée.

434. Pouvoir émissif. — Le *pouvoir émissif* ou *rayonnant* des corps est leur propriété d'émettre, à température et à surface égales, une quantité de chaleur plus ou moins grande. On ne considère que des pouvoirs émissifs relatifs.

C'est encore avec l'appareil représenté dans la figure 342 que Leslie a déterminé le pouvoir émissif des corps. Pour cela, la boule du thermomètre différentiel était placée au foyer même du réflecteur, et les faces du cube M étaient formées de métaux différents, ou recouvertes de diverses substances, comme noir de fumée, papier, etc. Le cube étant plein d'eau à 100 degrés, et les autres conditions restant les mêmes, Leslie tournait successivement vers le réflecteur chaque face du cube, et notait les températures données par le thermomètre. Pour la face recouverte de noir de fumée, la température s'élevait plus que pour toutes les autres, et c'étaient les faces métalliques qui donnaient les plus faibles températures. En appliquant ici la loi de Newton, et en représentant par 100 la chaleur émise par le noir de fumée, Leslie a formé le tableau suivant des pouvoirs émissifs relatifs :

Noir de fumée.	100	Colle de poisson	80
Céruse	100	Plomb terne	45
Papier	98	Mercurc.	20
Cire à cacheter	95	Plomb décapé.	19
Verre blanc ordinaire.	90	Fer poll.	15
Encre de Chine.	88	Étain, or, argent, cuivre	12

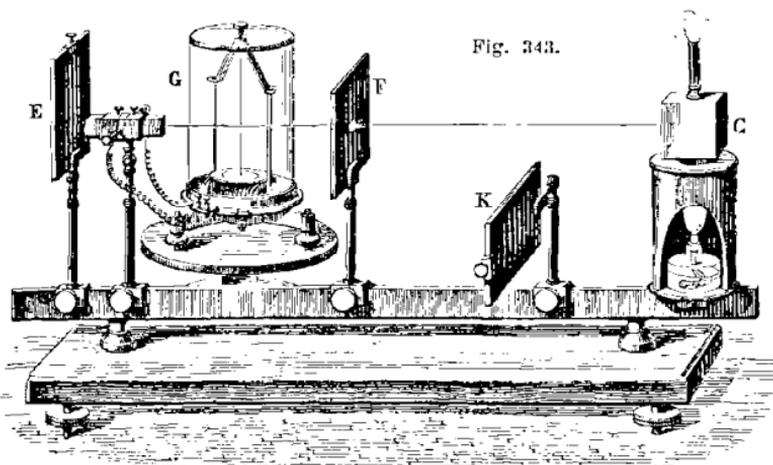
Il est à remarquer que dans ce tableau l'ordre des corps est précisément l'inverse de celui du tableau des pouvoirs réflecteurs.

Melloni a déterminé les pouvoirs émissifs en prenant, comme Leslie, pour source de chaleur un cube plein d'eau à 100 degrés, dont une des faces était recouverte de noir de fumée, et les autres

de différentes substances. En dirigeant successivement sur la pile les rayons émis par ces différentes faces (fig. 343), et en représentant par 100 le pouvoir émissif du noir de fumée, Melloni a trouvé les pouvoirs émissifs ci-après :

Noir de fumée.	100	Encre de Chine.	85
Blanc de céruse.	100	Gomme laque.	72
Colle de poisson.	91	Surfaces métalliques.	12

M. Desains, qui a repris ces expériences, toujours en faisant



usage du thermo-multiplicateur, a trouvé les nombres suivants pour les pouvoirs émissifs des métaux rapportés à celui du noir de fumée représenté par 100.

Platine laminé.	10,80	Or en feuilles.	4,28
— bruni.	2,50	Argent vierge laminé . . .	3,00
Argent mat déposé chimiquement.	5,36	— pur bruni.	2,50
Cuivre en lames.	4,90	— déposé chimiquement et bruni. .	2,25

D'où l'on conclut que les pouvoirs émissifs donnés par Leslie et par Melloni pour les métaux sont trop grands.

435. **Comparaison des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs.** — De ses expériences sur les pouvoirs absorbants et les pouvoirs émissifs des différentes substances comparées au noir de fumée, Leslie avait conclu que, pour un même corps, le pouvoir émissif est toujours égal au pouvoir absorbant; c'est-à-dire que si une substance émet deux, trois fois plus de chaleur que le noir de fumée, elle en absorbe aussi deux, trois fois davantage.

Cette loi a été longtemps admise comme générale; mais Kirch-

hoff ayant trouvé que les pouvoirs émissif et absorbant d'une même substance ne varient pas dans le même rapport quand la température s'élève ou quand la source de chaleur change, la loi de Leslie est soumise aux deux conditions suivantes :

1° Lorsqu'on compare le pouvoir émissif d'un corps à son pouvoir absorbant, la température doit être sensiblement la même.

2° La chaleur absorbée et la chaleur émise doivent être de même nature : toutes deux obscures, ou toutes deux lumineuses (418).

Ces restrictions posées, la loi de Leslie se vérifie par l'expérience suivante, dans laquelle on opère sur des substances dont le pouvoir diffusif est négligeable.

436. **Expérience de Ritchie.** — Pour vérifier la loi de Leslie, Ritchie a adopté un appareil qui n'est autre chose qu'un thermomètre différentiel, dont les deux boules de verre sont remplacées

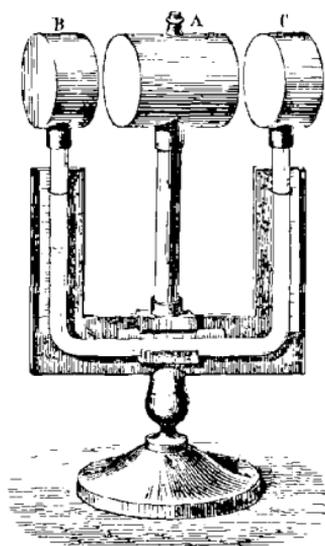


Fig. 344.

par deux réservoirs cylindriques B et C de métal, et pleins d'air (fig. 344). Entre eux en est un troisième, A, plus grand, de même forme, et pouvant être rempli d'eau chaude par une tubulure; de plus, il est mobile et peut être approché plus ou moins de B ou de C. Enfin, les bases de ces trois cylindres, qui sont en regard, sont alternativement recouvertes d'un plaqué d'argent et de noir de fumée; en sorte que deux faces en présence sont l'une argentée, l'autre noircie. Par suite, la face argentée de A rayonne vers la face noire de B, et la face noire de A vers la face argentée de C.

L'expérience étant ainsi disposée, et le réservoir A rempli d'eau chaude, on remarque que, lorsqu'il est à égale distance de B et de C, la colonne de liquide qui est dans le tube reste stationnaire et à la même hauteur dans les deux branches, ce qui montre que les deux réservoirs B et C absorbent la même quantité de chaleur.

Or, si l'on représente par a et e les pouvoirs absorbant et émissif du noir de fumée, par a' et e' ceux de l'argent, la quantité de chaleur absorbée par B, étant en même temps proportionnelle à a et à e' , est représentée par le produit $a \times e'$; de même la cha-

leur absorbée par C est représentée par $a' \times e$. On peut donc poser

$$a \times e' = a' \times e, \quad \text{d'où} \quad \frac{a}{a'} = \frac{e}{e'},$$

égalité qui exprime d'une manière générale que *les pouvoirs absorbants sont proportionnels aux pouvoirs émissifs*.

Si l'on prend le pouvoir absorbant du noir de fumée pour unité des pouvoirs absorbants, et son pouvoir émissif pour unité des pouvoirs émissifs, c'est-à-dire si l'on pose $a=1$, $e=1$, la première égalité ci-dessus donne $a'=e'$; ce qui fait voir que, dans ce cas, *les pouvoirs absorbant et émissif sont égaux*. Il est à remarquer que les deux conditions posées plus haut (435) à la loi de Leslie sont satisfaites dans l'expérience de Ritchie.

437. Causes qui modifient les pouvoirs réflecteur, absorbant et émissif. — Les pouvoirs émissif et absorbant étant proportionnels, toute cause qui modifie l'un modifie nécessairement l'autre dans le même sens. Quant au pouvoir réflecteur, puisqu'il marche dans un ordre inverse des deux autres (433), toute cause qui augmente ceux-ci le diminue, et réciproquement.

On a vu que ces différents pouvoirs varient d'une substance à une autre; que ce sont les métaux qui ont le plus grand pouvoir réflecteur, et le noir de fumée le plus faible. Mais, pour un même corps, ces pouvoirs sont encore modifiés par le degré de poli, par la densité, par l'épaisseur de la substance rayonnante ou réfléchissante, par l'état physique de cette substance, par l'obliquité des rayons incidents ou émis, par la nature de la source de chaleur, et enfin par l'espèce de chaleur, obscure ou lumineuse.

Pouvoir réflecteur. — On a longtemps admis que le pouvoir réflecteur croissait d'une manière générale avec le degré de poli des surfaces, et que les autres pouvoirs, au contraire, diminuaient. Mais Melloni a constaté qu'en rayant une plaque métallique polie, tantôt on diminuait son pouvoir réflecteur, tantôt on l'augmentait, phénomène que ce physicien a expliqué par le plus ou moins de densité que prend la plaque. Si celle-ci a d'abord été écaillée, l'homogénéité a été détruite; les molécules sont plus rapprochées à la surface que dans la masse, et le pouvoir réflecteur est augmenté. Alors, lorsqu'on raye la surface, la masse intérieure, qui est moins dense, est mise à nu, et le pouvoir réflecteur diminue. Au contraire, dans une plaque non écaillée et homogène, le pouvoir réflecteur est augmenté lorsqu'on la raye avec un instrument tranchant, ce qui provient d'une augmentation de densité à la surface, due aux raies qu'on y a tracées.

Le pouvoir réflecteur varie avec l'inclinaison des rayons incidents. Pour les métaux, cette influence est peu sensible; mais,

pour les substances transparentes, la quantité de chaleur réfléchie augmente rapidement avec l'angle d'incidence. Pour le verre, le pouvoir réflecteur absolu, qui est 0,05 pour un angle d'incidence de 20 degrés, devient 0,55 pour un angle d'incidence de 80.

Le pouvoir réflecteur est encore modifié par la source de chaleur : pour l'acier il est 0,60 avec la chaleur solaire, et 0,83 avec la chaleur émise par une lampe Locatelli (sans verre).

Enfin, le pouvoir réflecteur des métaux est plus grand avec la chaleur obscure qu'avec la chaleur lumineuse.

Pouvoir émissif. — L'épaisseur des substances modifie leur pouvoir émissif, ainsi que le prouvent les expériences de Leslie, de Rumford et de Melloni. Ce dernier s'est assuré qu'en vernissant les faces d'un cube métallique rempli d'eau à une température constante, le pouvoir émissif croissait avec le nombre des couches de vernis, jusqu'à 16 couches, et qu'au delà il restait constant, quel qu'en fût le nombre. Il a calculé que l'épaisseur des 16 couches était de $\frac{4}{1000}$ de millimètre. Quant aux métaux, des feuilles d'or de 8, 4 et 2 millièmes de millimètre ayant été successivement appliquées sur les faces d'un cube de Leslie, en verre, la diminution de la chaleur rayonnante fut la même. L'épaisseur de la couche rayonnante est donc sans influence pour les métaux, du moins dans la limite d'épaisseur qu'on peut leur donner.

L'état physique d'une substance change aussi son pouvoir émissif. Ainsi les corps réduits en poudre impalpable paraissent avoir tous le même pouvoir émissif; c'est du moins ce qu'ont observé Masson et M. Courtépée pour seize corps sur vingt, qu'ils ont soumis à l'expérience. M. Tyndall attribue ce résultat à la gomme arabique qui servait à fixer les poudres. En les appliquant à l'eau, il a trouvé des pouvoirs émissifs différents.

Le pouvoir émissif varie encore avec l'inclinaison des rayons sur la surface qui les émet, sauf pour le noir de fumée, avec lequel il est constant sous toutes les inclinaisons. Avec le blanc de céruse, le pouvoir émissif, étant 100 dans la direction normale, n'est plus que 66 sous une inclinaison de 80 degrés. Dans les mêmes conditions d'obliquité, le pouvoir émissif du verre est successivement 90 et 54.

Enfin, pour un même corps, le pouvoir émissif varie avec la température. Par exemple, le pouvoir émissif du borate de plomb diminue lorsqu'on le porte à une température élevée. A 100 degrés, il est très-approximativement le même que celui du noir de fumée, tandis qu'à 550 degrés il n'en est que les 0,75.

Quant aux corps gazeux en combustion, leur pouvoir rayonnant est extrêmement faible, comme on le constate en approchant la

pile thermo-électrique d'une flamme d'hydrogène, quoique la température de cette flamme soit très-élevée. Mais si l'on place dans la flamme une spirale de platine, cette spirale, prenant la température de la flamme, rayonne fortement. C'est par un effet semblable que les flammes des lampes et du gaz d'éclairage rayonnent beaucoup plus que la flamme d'hydrogène, à cause de l'excès de carbone qu'elles contiennent, et qui, n'étant pas brûlé en totalité, devient incandescent dans la flamme.

Pouvoir absorbant. — Melloni a constaté que le pouvoir absorbant varie avec la nature de la source de chaleur. Par exemple, pour une même quantité de chaleur incidente, le carbonate de plomb en absorbe à peu près deux fois plus, si elle est émise par un cube plein d'eau à 100 degrés, que si elle l'est par une lampe. Le noir de fumée seul absorbe toujours la même quantité de chaleur, quelle qu'en soit la source.

Le pouvoir absorbant varie encore avec l'inclinaison des rayons incidents. Il est à son maximum à l'incidence normale, et diminue à mesure que les rayons incidents s'écartent de la normale. C'est une des raisons pour lesquelles le sol s'échauffe plus l'été que l'hiver; car, l'été, les rayons solaires sont moins obliques.

En général, toutes les causes qui modifient le pouvoir émissif modifient dans le même sens le pouvoir absorbant.

438. Applications. — La propriété que possèdent les corps d'absorber, de réfléchir ou d'émettre plus ou moins facilement la chaleur, présente de nombreuses applications dans l'économie domestique et dans les arts. Par exemple, avec les vases dans lesquels on fait chauffer des liquides, tels que les cafetières, il y a avantage à ce que leur surface soit noire et dépolie, puisque alors le pouvoir absorbant est plus grand. L'éclat qu'on est dans l'habitude de leur donner est acheté aux dépens du combustible. S'il s'agit, au contraire, de conserver un liquide chaud le plus longtemps possible, il faut le placer dans un vase de métal poli et brillant, comme les théières d'argent; car le pouvoir émissif étant alors moindre, le refroidissement est plus lent.

Franklin, ayant exposé sur la neige des étoffes de différentes couleurs aux rayons solaires, avait trouvé que les étoffes noires enfonçaient plus ou moins profondément, et que les blanches n'enfonçaient pas du tout; il en avait conclu que les premières absorbaient mieux la chaleur que les dernières. Depuis, on a fait longtemps l'application de l'expérience de Franklin à nos vêtements, admettant que les vêtements blancs sont plus frais que les noirs pendant l'été parce qu'ils absorbent moins la chaleur, et plus chauds l'hiver parce qu'ils émettent moins. A ce sujet, M. Tyn-

dall observe avec raison que si tous les rayons calorifiques étaient lumineux, nous pourrions, avec certitude, de la couleur d'un corps déduire son pouvoir absorbant; mais que la grande partie de la radiation solaire étant invisible (530), la coloration et l'absorption sont deux phénomènes distincts. En effet, le même savant a observé que trois des faces d'un cube de fer-blanc étant l'une blanchie à la craie, l'autre rougie au carmin, la troisième noircie au noir de fumée, et le cube étant rempli d'eau à 100 degrés, les trois faces, présentées à la pile du thermo-multiplicateur, imprimant une égale déviation à l'aiguille du galvanomètre, et si l'on présente la face nue, l'aiguille se rapproche aussitôt du zéro. Mêmes résultats avec un cube dont trois faces sont revêtues respectivement de velours blanc, rouge et noir, et la quatrième nue. Enfin, M. Tyndall a constaté que deux cartes, l'une blanche, l'autre noircie avec de l'iode, étant présentées à un foyer, la première s'échauffe beaucoup plus que la seconde. D'où il conclut que, dans nos vêtements, dans la fourrure des quadrupèdes, le plumage des oiseaux, ce n'est pas la couleur qui a de l'influence, mais la texture et le degré de conductibilité.

CHAPITRE X

TRANSMISSION DE LA CHALEUR AU TRAVERS DES CORPS

439. **Pouvoir diathermane.** — Outre la propriété qu'ont les corps de réfléchir, d'absorber et d'émettre plus ou moins la chaleur, plusieurs laissent passer à travers leur masse, de même que les corps transparents sont traversés par la lumière : tels sont l'air, le sel gemme, le verre. D'autres substances, comme les métaux, sont imperméables à la chaleur.

Melloni a appelé *substances diathermanes* les premières, et *substances athermanes* les dernières; et l'on nomme *pouvoir diathermane* d'une substance le rapport de la quantité de chaleur qu'elle laisse passer à celle qu'elle reçoit.

440. **Expériences de Melloni.** — Pour déterminer les pouvoirs diathermanes, Melloni a fait usage de son *thermo-multiplicateur*, auquel il a appliqué cinq sources de chaleur : 1^o une lampe Locatelli, c'est-à-dire sans verre, avec réflecteur, et à un seul courant d'air (fig. 345); 2^o une lampe d'Argand, c'est-à-dire à double courant d'air et munie d'un verre : lampes Carcel; 3^o un fil de platine contourné en hélice et maintenu au rouge blanc dans la flamme

d'une lampe à alcool (fig. 346); 4° un cube de cuivre rouge noirci à l'extérieur et rempli d'eau maintenue à 100 degrés (fig. 348); 5° enfin, une plaque de cuivre rouge noircie et chauffée à 400 degrés environ par la flamme d'une lampe à alcool (fig. 347).

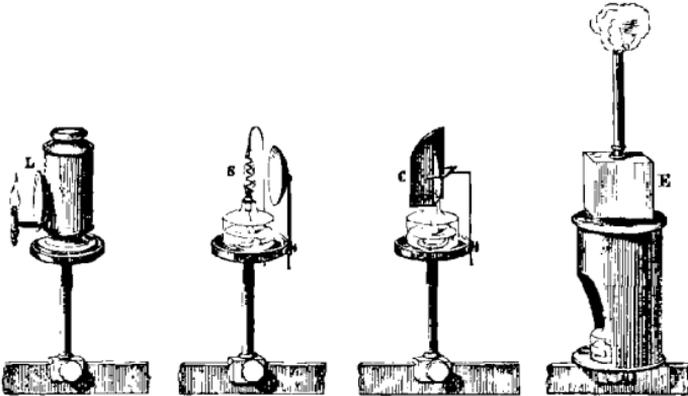


Fig. 345.

Fig. 346.

Fig. 347.

Fig. 348.

De ces cinq sources de chaleur, les trois premières donnent de la chaleur lumineuse, et les deux dernières de la chaleur obscure. Or on verra que, pour une même substance, le pouvoir diathermane n'est pas le même avec ces deux sortes de chaleur (441).

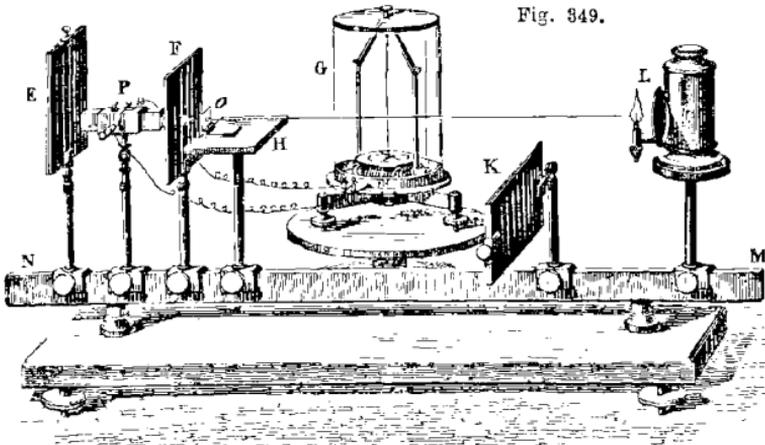


Fig. 349.

Le thermo-multiplicateur était disposé comme le montre la figure 349. Les substances sur lesquelles on expérimentait étaient taillées en plaques d'une épaisseur variable, et fixées en o sur un support H. Après les avoir traversées, les rayons calorifiques ren-

contraient la pile P, et imprimaient à l'aiguille du galvanomètre G une déviation qui mesurait la chaleur transmise. En comparant cette déviation à celle qu'on obtient quand la plaque est enlevée, on a le pouvoir diathermane de celle-ci.

441. **Causes qui modifient le pouvoir diathermane.** — Ces causes sont : 1^o la nature de la source de chaleur; 2^o la substance des écrans; 3^o leur épaisseur.

En représentant par 100 la chaleur incidente, Melloni a obtenu le tableau suivant pour les quantités de chaleur que laissent passer, avec quatre sources différentes, des plaques de diverses substances, mais de même épaisseur.

SUBSTANCES	LAMPE de LOCATELLI	PLATINE incan- descent	CUIVRE chauffé à 400°	CUIVRE chauffé à 100°
Le sel gemme laissé passer.	92	92	92	92
Le spath d'Islande	39	28	6	0
Le verre à glace	39	24	6	0
Le cristal de roche	37	18	6	0
La chaux sulfatée.	14	5	0	0
L'alun	9	2	0	0
La glace pure.	6	0	0	0

Quant à l'influence de l'épaisseur des écrans, l'expérience fait voir que la quantité de chaleur qui traverse un écran décroît quand son épaisseur augmente; mais l'absorption n'est pas proportionnelle à l'épaisseur, car c'est surtout dans les premières couches qu'elle se produit.

Le tableau ci-dessus montre que la chaleur lumineuse est plus transmissible que la chaleur obscure, si ce n'est pour le sel gemme, dont le pouvoir diathermane reste constant et égal à 92 pour toutes les sources de chaleur. Suivant Melloni, il en était encore ainsi pour toutes les épaisseurs, et il regarda le sel gemme comme parfaitement diathermane, la perte de 8 pour 100 de la chaleur qui le traversait étant attribuée uniquement à la réflexion sur les deux faces des plaques. Mais, depuis, M. Desains a reconnu que le pouvoir diathermane du sel gemme décroît quand l'épaisseur augmente et quand la température de la source est moindre; de son côté, Magnus a fait voir que pour certaines sources de chaleur obscure, et particulièrement pour celle émise par une plaque de sel gemme chauffée à 150 degrés, cette substance n'est pas plus diathermane qu'une autre; et que sa diathermanéité, loin d'être constante, varie avec l'épaisseur comme celle de tous les autres

corps. Enfin, le même savant a constaté que la sylvine (chlorure de potassium) a un pouvoir diathermane au moins égal à celui du sel gemme pour toutes les sources de chaleur.

442. Diathermanéité des gaz. — Melloni avait admis que les gaz sont tous parfaitement diathermanes; mais M. Tyndall a trouvé que, tandis que l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, ont un pouvoir diathermane tel, qu'ils n'absorbent qu'une quantité à peine appréciable de la chaleur qui les traverse, les gaz composés, comme l'acide sulfureux, le gaz ammoniac, le gaz oléfiant, arrêtent presque complètement la chaleur, même lorsque la tension des gaz n'est que de quelques centimètres de mercure. M. Tyndall, ayant expérimenté sur de l'air humide, a trouvé qu'il absorbe 70 fois plus de chaleur que l'air sec; d'où il avait conclu que l'air humide a un pouvoir absorbant plus grand que l'air sec. Or, de son côté, Magnus trouvait que l'air sec et l'air humide ont sensiblement le même pouvoir absorbant, et qu'on n'observe de différence que lorsque l'eau se trouve dans l'air à l'état vésiculaire, c'est-à-dire à l'état qu'elle présente lorsque, se condensant dans l'air, elle devient visible. Enfin M. Wild, à Berne, a trouvé que c'est la paroi du tube dans lequel est renfermé l'air humide qui est cause de la discordance entre les résultats obtenus par M. Tyndall et par Magnus. Si, à l'intérieur, la paroi du tube est polie, l'air humide absorbe plus que l'air sec; si, au contraire, elle est noircie ou recouverte de velours, l'air humide absorbe moins. C'est donc à la vapeur qui se condense sur les parois du tube qu'est due la différence des résultats obtenus.

443. Applications des pouvoirs diathermanes. — C'est par suite de leur grand pouvoir diathermane que les couches supérieures de l'atmosphère sont toujours à une basse température, malgré les rayons solaires qui les traversent. L'eau étant peu diathermane, il se produit le phénomène inverse au sein des mers et des lacs. Les couches supérieures participent aux variations de température, suivant les saisons, tandis qu'à une certaine profondeur la température reste constante.

Les propriétés des corps diathermanes ont été utilisées pour séparer la lumière et la chaleur qui rayonnent ensemble d'une même source. Le sel gemme recouvert de noir de fumée arrête complètement la lumière et laisse passer la chaleur. Au contraire, des lames ou des dissolutions d'alun arrêtent la chaleur et donnent passage à la lumière. Ce dernier procédé est appliqué avantageusement dans les appareils qu'on éclaire avec les rayons solaires ou avec la lumière électrique, lorsqu'il est nécessaire d'éviter une chaleur trop intense. L'iode dissous dans le bisulfure de carbone

produit l'effet inverse : il absorbe les rayons lumineux, et laisse passer la chaleur.

Dans les jardins, l'usage des cloches dont on abrite certaines plantes est fondé sur la propriété diathermane du verre, indiquée dans le tableau ci-dessus (441) : cette substance, traversée par les rayons solaires, qui ont une haute température, ne l'est pas par la chaleur obscure qui rayonne du sol.

444. Différentes espèces de rayons calorifiques, thermocrhôte. — Les propriétés que présente la chaleur, dans son passage au travers des corps, ont porté Melloni à faire sur la chaleur la même hypothèse que celle faite depuis longtemps sur la lumière. Ainsi que Newton a admis plusieurs espèces de lumière, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet, qui ne se transmettent pas également au travers des corps diaphanes, et qui peuvent être réunies entre elles ou isolées, de même Melloni a admis l'existence de plusieurs espèces de rayons calorifiques émis simultanément, en proportions variables, par les diverses sources de chaleur, et doués de la propriété de traverser plus ou moins facilement les substances diathermanes. Celles-ci possèdent donc une véritable *coloration* calorifique, c'est-à-dire qu'elles absorbent certains rayons de chaleur et laissent passer les autres, de la même manière qu'un verre bleu, par exemple, est traversé par la couleur bleue, et ne l'est pas par les autres couleurs. Melloni a donné le nom de *thermochrôte* à cette propriété de la chaleur d'être composée de rayons de différentes espèces.

La théorie de Melloni s'explique, dans le système des ondulations, en admettant que les propriétés des différentes espèces de rayons calorifiques sont dues à des nombres de vibrations différents, ou à des ondes calorifiques d'inégale longueur.

Cette théorie est adoptée aujourd'hui par tous les physiciens; nous y reviendrons en traitant du *spectre calorifique*, dont l'étude est intimement liée à celle du spectre lumineux (551).

CHAPITRE XI

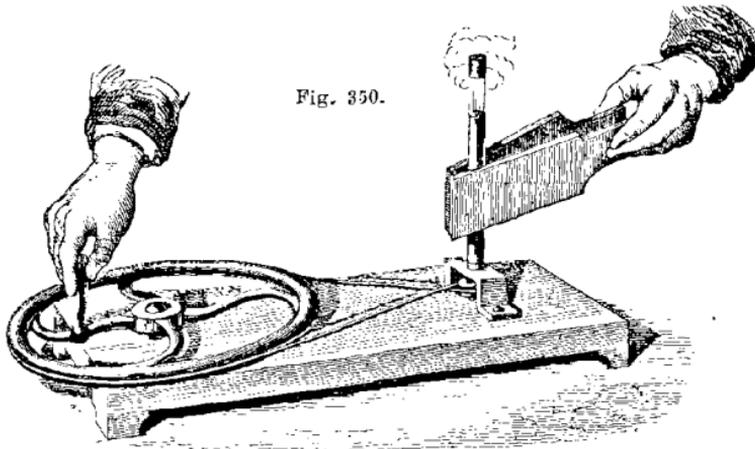
SOURCES DE CHALEUR ET DE FROID

445. Différentes sources de chaleur. — D'après la théorie de la thermo-dynamique, il n'y a en réalité qu'une seule source de chaleur, le mouvement imprimé aux molécules de la matière; seulement, on peut obtenir celui-ci de plusieurs manières; de là : 1^o *sources mécaniques*, comprenant le frottement, la percussion,

la pression et le choc; 2^o *sources physiques*, savoir : la radiation solaire, la chaleur terrestre, les actions moléculaires, les changements d'état et l'électricité; 3^o *sources chimiques*, c'est-à-dire les combinaisons moléculaires, et notamment la combustion.

Sources mécaniques.

446. Chaleur due au frottement. — Le frottement de deux corps l'un contre l'autre développe une quantité de chaleur d'autant plus



grande, que la pression est plus forte et le mouvement plus rapide. Souvent les boîtes des roues de voitures, par leur frottement contre l'essieu, s'échauffent jusqu'à prendre feu. H. Davy a fondu deux morceaux de glace en les frottant l'un contre l'autre, dans une atmosphère au-dessous de zéro. En forant, sous l'eau, une masse de bronze, Rumford a trouvé que, pour obtenir 250 grammes de limaille, la chaleur développée par le frottement est capable d'élever 25 kilogrammes d'eau de zéro à 100 degrés, ce qui représente 2 500 calories. Baumont et Mayer, à Paris, ont construit, en 1855, un appareil dans lequel ils élevaient, en quelques heures, 400 litres d'eau, de 10 à 130 degrés, par le frottement d'un cône de bois recouvert de chanvre, tournant, avec une vitesse de 400 tours par minute, dans un cône de cuivre creux, fixe et plongé dans l'eau d'une chaudière hermétiquement fermée. Les surfaces frottées étaient constamment graissées d'huile.

L'expérience de Rumford et celle de Baumont et Mayer demandent trop de temps pour qu'on puisse les répéter dans un cours; nous empruntons à M. Tyndall un appareil qui, en quelques minutes, fait voir la chaleur développée par le frottement. Il se com-

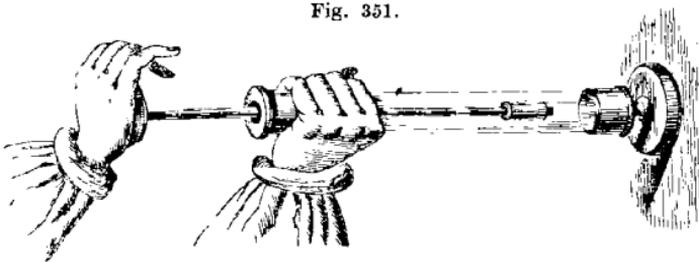
pose d'un tube de laiton, creux et plein d'eau, auquel on imprime un mouvement de rotation rapide au moyen d'une poulie sur laquelle il est fixé, mue par une grande roue et une courroie sans fin (fig. 350). Le tube a 10 centimètres de hauteur et 2 de diamètre. Pour que l'expérience dure moins longtemps, on le remplit d'eau tiède, et on le ferme avec un bouchon, afin que l'eau ne soit pas projetée par l'effet de la rotation. Autour du tube s'applique une pince de bois formée de deux planchettes réunies par une charnière, et entaillées d'une rainure pour mieux embrasser le tube. Tandis que d'une main on fait tourner la grande roue, de l'autre on serre le tube entre les planchettes. Il s'échauffe alors rapidement par le frottement, et bientôt la température de l'eau dépassant 100 degrés, le bouchon est lancé par la tension de la vapeur.

Dans le briquet à pierre, c'est par l'effet du frottement de l'acier contre le silex que les parcelles métalliques qui se détachent s'échauffent jusqu'à prendre feu dans l'air.

Dans toutes ces expériences, la chaleur dégagée par le frottement est due à un mouvement vibratoire imprimé aux molécules des corps; dans toutes, c'est du travail transformé en chaleur.

447. **Chaleur due à la pression et à la percussion.** — Si l'on

Fig. 351.



comprime un corps de manière à augmenter sa densité, sa température s'élève d'autant plus, que la diminution de volume est plus grande. Peu sensible dans les liquides, ce phénomène l'est davantage dans les solides; dans les gaz, qui sont extrêmement compressibles, il y a un dégagement de chaleur considérable, dû au travail consommé pendant la compression.

On démontre le vif dégagement de chaleur qui se produit dans les gaz comprimés au moyen du *briquet à air*. Cet appareil se compose d'un tube de verre à paroi épaisse, dans lequel est un piston de cuir fermant hermétiquement (fig. 351). A la base de ce piston est une cavité où l'on place un petit morceau d'amadou. Le tube étant plein d'air, on enfonce brusquement le piston : l'air

comprimé s'échauffe alors jusqu'à enflammer l'amadou, qu'on voit brûler si l'on retire rapidement le piston. L'inflammation de l'amadou dans cette expérience suppose une température d'au moins 300 degrés. Au moment de la compression, il se produit une lumière assez vive qu'on a d'abord attribuée à la haute température à laquelle l'air est porté; mais on a reconnu qu'elle est due à la combustion de l'huile qui graisse le piston.

C'est par l'élévation de température qu'elle fait naître que la pression suffit pour déterminer la combinaison, et, par suite, la détonation d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène.

La percussion est aussi une source de chaleur, ainsi qu'on le constate en battant sur une enclume un métal malléable.

Dans la percussion comme dans la pression, l'échauffement est dû à un travail extérieur transformé en chaleur.

448. **Expériences de Tyndall sur la compression des gaz.** — On doit à M. Tyndall les deux expériences suivantes, qui font bien voir, dans le phénomène de la compression des gaz, la trans-

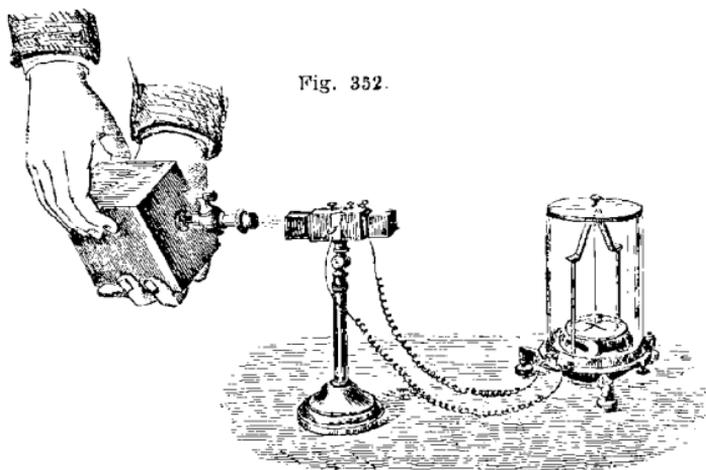


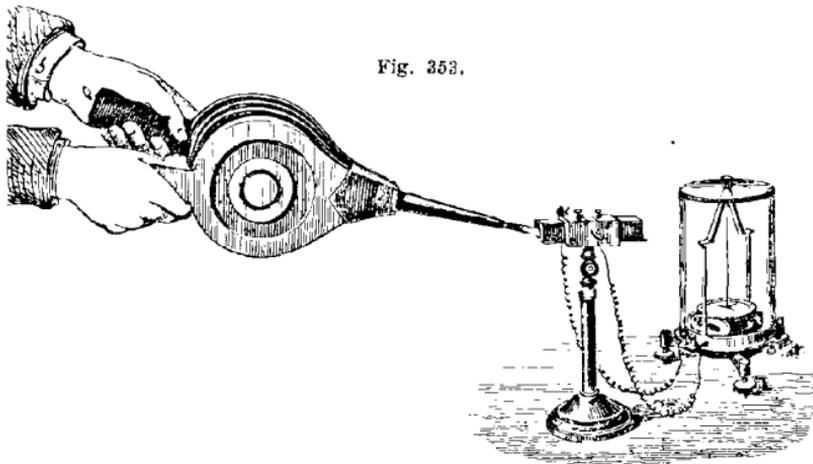
Fig. 352.

formation de la chaleur en travail mécanique, et, réciproquement, du travail mécanique en chaleur.

On prend un vase de métal à parois résistantes, et muni d'un robinet. Ayant vissé une pompe de compression sur ce robinet, on comprime de l'air dans le vase, et comme le gaz s'est échauffé par la pression, on laisse refroidir pendant plusieurs heures, jusqu'à ce qu'il soit revenu à la température ambiante. Lorsqu'on ouvre ensuite le robinet, l'air s'élance violemment. Or l'air ainsi expulsé l'est par la force expansive du gaz intérieur; en un mot, c'est l'air

qui s'expulse lui-même. Il y a donc travail exécuté par le gaz, et, par suite, d'après la théorie dynamique de la chaleur, il doit y avoir disparition de chaleur. En effet, si l'on reçoit le jet de gaz sur la pile thermo-électrique (fig. 352), le galvanomètre indique, par le sens de sa déviation, qu'il y a refroidissement.

Au contraire, si l'on répète l'expérience avec un soufflet ordinaire, et si l'on reçoit encore le jet de gaz sur la pile (fig. 353),



la déviation de l'aiguille du galvanomètre se fait dans le sens opposé, ce qui fait voir qu'il y a échauffement. En effet, dans la première expérience, le travail mécanique de pousser l'air en avant étant exécuté par l'air lui-même, une portion de sa chaleur est consommée dans cet effort; tandis que, dans le cas du soufflet, c'est la main de l'expérimentateur qui exécute le travail. Ici, comme dans le briquet à air, c'est un travail extérieur qui est transformé en chaleur; dans l'expérience de la figure 352, c'est un travail intérieur qui ne se fait qu'avec dépense de chaleur.

449. Chaleur engendrée par le choc. — Lorsqu'on laisse tomber une bille d'ivoire sur un corps dur, elle rebondit en vertu de son élasticité, et par suite ne s'échauffe pas, parce que le travail développé par la chute de la bille est ensuite consommé pour l'élever (38). Mais qu'on laisse tomber une bille de plomb, qui n'est pas élastique et ne rebondit pas, elle s'échauffe sensiblement, sa force vive étant transformée en chaleur (270). De même, lorsqu'on tire une balle contre un mur, celle-ci se trouvant arrêtée brusquement, sa force vive se transforme en travail extérieur qui aplatit le plomb et dégrade le mur, et en travail intérieur qui se manifeste sous forme de chaleur.

En Angleterre, en 1863, pour essayer des plaques de fonte destinées au blindage de frégates cuirassées, on tirait dessus à courte distance avec des canons Armstrong. Or, au moment où les boulets, frappant ces plaques, se trouvaient arrêtés, leur force vive se transformait en chaleur, et ils atteignaient subitement la température rouge.

Sources physiques.

450. **Radiation solaire.** — De toutes les sources de chaleur, la plus intense est le soleil. On ignore la cause de la chaleur émise par cet astre, que les uns ont regardé comme une masse embrasée, éprouvant d'immenses éruptions, et que d'autres ont considéré comme étant composé de couches réagissant chimiquement les unes sur les autres, à la manière des couples de la pile voltaïque, et donnant ainsi naissance à des courants électriques auxquels seraient dues la lumière et la chaleur solaires. Dans l'une et l'autre hypothèse, l'incandescence du soleil aurait son terme.

Depuis la théorie dynamique de la chaleur, on a proposé d'expliquer la continuité de la chaleur du soleil par la chute, sur cet astre, d'une pluie d'astéroïdes. On sait qu'on nomme ainsi les masses météoriques qui traversent l'atmosphère sous le nom d'étoiles filantes, et qui apparaissent en très-grand nombre, surtout dans les nuits des 9, 10 et 11 août et des 12, 13, 14 et 27 novembre de chaque année. Dans la nuit du 27 novembre 1872, de sept heures et demie à une heure, le P. Secchi, à Rome, a observé 13 892 étoiles filantes.

Ces masses, tombant sur le soleil avec des vitesses qui surpassent de beaucoup celles que nous observons à la surface du globe, développeraient, par leur choc, une quantité de chaleur énorme qui réparerait la perte de chaleur du soleil par le rayonnement. Il suffirait pour cela que la couche des astéroïdes tombés annuellement sur le soleil atteignît une épaisseur de 20 mètres, accroissement de volume trop lent pour pouvoir être apprécié par nos instruments. Cette hypothèse a été proposée par le docteur Mayer, et soutenue par Waterston et W. Thomson.

Des tentatives ont été faites pour mesurer la quantité de chaleur émise annuellement par le soleil. Pouillet, au moyen d'un appareil qu'il a nommé *pyrhéliomètre*, a estimé que si la quantité totale de chaleur que la terre reçoit du soleil dans le cours d'une année était tout entière employée à fondre de la glace, elle serait capable d'en fondre une couche d'une épaisseur de 31^m,89 tout autour du globe. Or, d'après la surface que la terre présente au

rayonnement du soleil, et d'après la distance qui l'en sépare, elle ne reçoit que $\frac{1}{238000000}$ de la chaleur émise par cet astre.

451. **Chaleur terrestre.** — Le globe terrestre possède une chaleur propre qu'on désigne sous le nom de *chaleur centrale*. En effet, à une profondeur peu considérable, qui varie suivant les pays, on rencontre une couche dont la température reste constante toute l'année; d'où l'on conclut que la chaleur solaire ne pénètre, au-dessous du sol, qu'à une profondeur déterminée. Puis, au-dessous de cette couche, qu'on désigne sous le nom de *couche invariable*, la température augmente, en moyenne, d'un degré à mesure qu'on s'enfonce de 30 mètres. Cette loi de l'accroissement de la température du sol a été vérifiée, à de grandes profondeurs, dans les mines et dans les puits artésiens. Toutefois elle varie avec la conductibilité des terrains, et est très-modifiée dans les mines par la circulation de l'air et de l'eau. En l'étendant jusqu'à une profondeur de 3 000 mètres, la température de la couche correspondante passerait 100 degrés. Les eaux thermales et les volcans confirment l'existence de la chaleur centrale.

La profondeur à laquelle est la couche invariable n'est pas la même partout : à Paris, elle est de 27 mètres; à cette profondeur, la température est toute l'année de 11°,8.

Diverses hypothèses ont été proposées pour expliquer la chaleur centrale. Celle généralement admise par les géologues est que la terre a été primitivement à l'état liquide par l'effet d'une température élevée, et que, par le rayonnement, la surface terrestre s'est solidifiée peu à peu, de manière à former une écorce solide qui, d'après la loi de l'accroissement de la température avec la profondeur, n'aurait pas plus de 60 kilomètres d'épaisseur, la masse centrale étant tout entière à l'état de fusion. Quant au refroidissement, il ne peut être qu'extrêmement lent, en raison de la faible conductibilité des couches terrestres. C'est par la même cause que la chaleur centrale n'élève pas la température de la surface du sol de plus de $\frac{1}{36}$ de degré.

L'épaisseur de 60 kilomètres admise par les géologues est combattue par plusieurs physiciens. Se fondant sur l'énorme pression que supportent les couches inférieures, M. Hopkins, en Angleterre, observe qu'elles ne peuvent entrer en fusion qu'à une température beaucoup plus élevée qu'à la surface du sol. Il en conclut que l'épaisseur de l'écorce solide du globe doit être bien plus considérable qu'on ne la suppose, et il admet qu'elle est au moins de 1 200 kilomètres. Enfin, MM. Liail, W. Thomson, Huggins, en s'appuyant sur les phénomènes astronomiques de la précession, de la nutation et des marées, ont été conduits

à admettre que la terre est solide dans toute sa masse; et ils expliquent la chaleur centrale par des actions chimiques dues à l'infiltration des eaux de la mer.

452. **Chaleur dégagée par l'imbibition et par l'absorption.** — Les phénomènes moléculaires, comme l'imbibition, l'absorption, les actions capillaires, sont, en général, accompagnés d'un dégagement de chaleur. Pouillet a observé que toutes les fois qu'un liquide est versé sur un solide très-divisé, il y a une élévation de température qui varie selon la nature des substances. Avec les matières inorganiques, comme les métaux, les oxydes, les terres, l'élévation de température est de 2 à 3 dixièmes de degré; mais avec les matières organiques, comme les éponges, la farine, l'amidon, les racines en poudre, les membranes desséchées, l'accroissement de température varie de 1 à 10 degrés.

L'absorption des gaz par les corps solides présente le même phénomène. Dobereiner a trouvé que, si l'on place dans l'oxygène du platine très-divisé, comme on l'obtient à l'état de précipité chimique, sous le nom de *noir de platine*, ce métal absorbe plusieurs centaines de fois son volume d'oxygène, et la température s'élève alors assez pour donner naissance à des combustions très-intenses. L'éponge ou *mousse de platine*, qui s'obtient en précipitant le chlorure de platine par le sel ammoniac, produit le même effet. Un jet d'hydrogène dirigé dessus prend feu par le dégagement de chaleur dû à l'absorption.

C'est sur ce principe qu'est fondé le *briquet à mousse de platine*. Cet appareil se compose de deux vases de verre (fig. 354); le premier, A, pénètre dans le vase inférieur B, au moyen d'une tubulure usée à l'émeri, qui le ferme hermétiquement. Au bout de cette tubulure est une masse de zinc Z plongeant dans de l'eau chargée d'acide sulfurique. La réaction de l'eau, de l'acide et du métal produit un dégagement d'hydrogène qui, ne trouvant d'abord aucune issue, refoule l'eau du vase B dans le vase A, jusqu'à ce que, le zinc ne plongeant plus, la réaction s'arrête. Le bouchon du vase supérieur est usé latéralement de manière à en laisser sortir l'air à mesure que l'eau s'élève. Une tubulure de

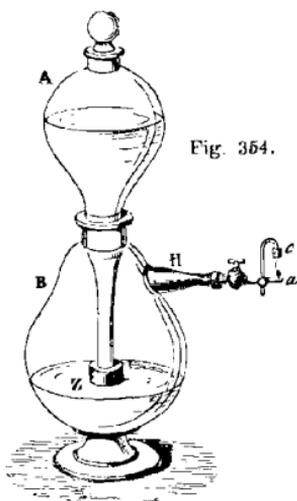


Fig. 354.

cuire H, fixée sur le côté du vase B, porte un petit cône *a* percé d'un orifice au-dessus duquel, dans une capsule *c*, est une éponge de platine.

Par suite, dès qu'on ouvre le robinet qui ferme le tube H, l'hydrogène se dégage et s'enflamme au contact du platine. Il faut avoir soin de ne présenter celui-ci au courant d'hydrogène que lorsque ce gaz a entraîné tout l'air qui peut se trouver dans le vase B; sinon il y aurait une vive détonation due à la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène contenus dans ce vase.

M. Fabre, qui a fait des recherches sur la chaleur dégagée lorsqu'un gaz est absorbé par le charbon (167), a trouvé que la chaleur dégagée par l'absorption de 1 gramme d'acide sulfureux ou de protoxyde d'azote surpasse de beaucoup la chaleur qui résulte de la liquéfaction d'un poids égal des mêmes gaz; pour l'acide carbonique, la chaleur dégagée par l'absorption dépasse même celle qui le serait par la solidification de ce gaz. D'où l'on doit conclure que la chaleur produite par l'absorption des gaz ne peut s'expliquer complètement en admettant que le gaz absorbé se liquéfie et même se solidifie dans les pores du charbon, mais qu'il faut admettre, en outre, une action spéciale entre les molécules du charbon et celles du gaz, action que Mitscherlich a désignée sous le nom d'*affinité capillaire*.

La chaleur produite dans les changements d'état a déjà été traitée aux articles *Solidification* et *Liquéfaction* (336 et 368); quant à la chaleur développée par l'électricité, cette question trouvera sa place dans la théorie des phénomènes électriques.

Sources chimiques.

453. **Combinaisons chimiques, combustion.** — Les combinaisons chimiques sont généralement accompagnées d'un dégagement de chaleur plus ou moins abondant. Quand elles s'opèrent lentement, comme lorsque le fer s'oxyde à l'air, la chaleur dégagée est insensible: mais si elles se produisent vivement, le dégagement de chaleur est très-intense, et il y a alors *combustion*.

On nomme ainsi toute combinaison chimique qui se fait avec dégagement de chaleur et de lumière. Dans les combustions que nous présentent les foyers, les lampes, les bougies, c'est le carbone et l'hydrogène du bois, de l'huile, de la cire, qui se combinent avec l'oxygène de l'air. Mais il se produit des combustions dans lesquelles l'oxygène ne joue aucun rôle. Par exemple, si, dans un flacon plein de chlore, on projette de l'antimoine très-divisé, ou des fragments de phosphore, ces corps s'unissent au chlore avec un vif dégagement de chaleur et de lumière.

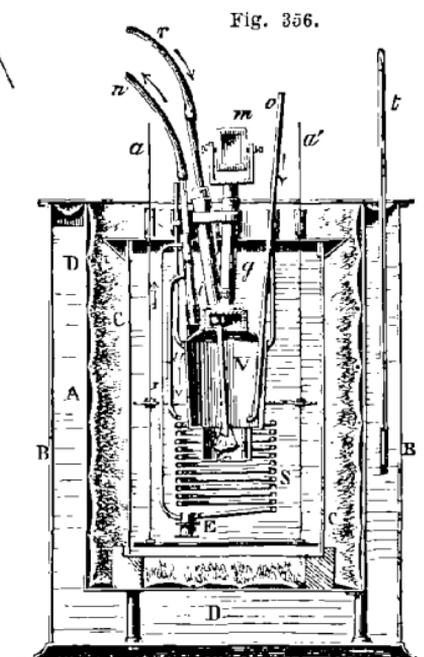
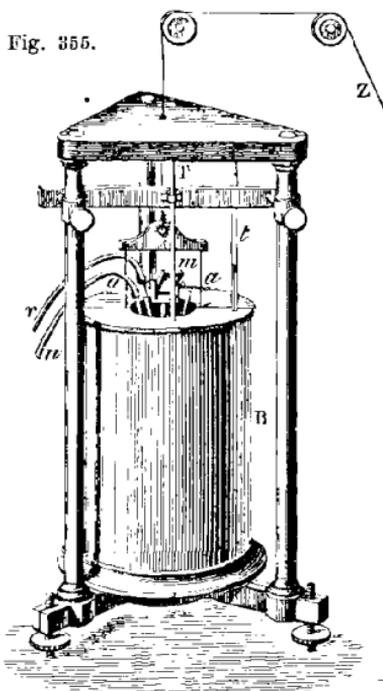
Plusieurs combustibles brûlent avec flamme. Une *flamme* n'est autre chose qu'un gaz ou une vapeur portés à une haute température par l'effet d'une combinaison chimique. Son pouvoir éclairant varie avec les produits qui se forment pendant la combinaison. La présence d'un corps solide dans une flamme en augmente le pouvoir éclairant. Les flammes d'hydrogène, d'oxyde de carbone, d'alcool, sont pâles, parce qu'elles ne renferment que des produits gazeux. Mais les flammes des bougies, des lampes, du gaz d'éclairage, ont un grand pouvoir éclairant, parce qu'elles contiennent un excès de carbone qui, n'éprouvant qu'une combustion incomplète, devient incandescent dans la flamme. On donne une intensité beaucoup plus grande à une flamme en y plaçant des fils de platine ou de l'amiante. La température d'une flamme n'est pas en rapport avec son pouvoir éclairant. La flamme d'hydrogène, qui est la plus pâle, est celle dont la température est plus élevée.

454. Chaleur dégagée pendant la combustion. — Plusieurs physiciens, et particulièrement Lavoisier, Rumford, Despretz, Dulong, Hess, Silbermann et M. Fabre, se sont occupés de rechercher les quantités de chaleur dégagées par les différents corps pendant la combustion et pendant les combinaisons.

Pour ces expériences, Lavoisier s'est servi du calorimètre de glace qui a été décrit précédemment (398). Rumford a fait usage d'un calorimètre connu sous son nom, et qui consiste en une cuve rectangulaire de cuivre, remplie d'eau. Dans cette cuve est un serpentín qui traverse le fond de la caisse, et se termine, en dessous, en forme d'entonnoir renversé. C'est sous cet entonnoir qu'on fait brûler le corps sur lequel on veut expérimenter. Les produits de la combustion, en se dégageant dans le serpentín, échauffent l'eau de la caisse, et, d'après l'élévation de température, on apprécie ensuite la chaleur dégagée. Despretz et Dulong ont successivement modifié le calorimètre de Rumford, en faisant brûler les corps, non plus au-dessous de la cuve qui contient l'eau à échauffer, mais dans une chambre à combustion placée au sein même du liquide; l'oxygène nécessaire à la combustion arrivait par un tube à la partie inférieure de la chambre, et les produits de la combustion se dégageaient par un autre tube placé à la partie supérieure, et contourné en serpentín dans la masse du liquide qu'on voulait échauffer. Enfin, c'est surtout par Silbermann et par M. Fabre que le calorimètre a été habilement perfectionné, de manière à éviter toutes les causes d'erreur, et à pouvoir déterminer non-seulement la quantité de chaleur dégagée dans la combustion, mais aussi dans les autres actions chimiques.

455. Calorimètre à eau de Fabre et Silbermann. — Représenté

dans son ensemble dans la figure 355, et en coupe verticale, sur une échelle double, dans la figure 356, ce calorimètre consiste en un vase cylindrique de cuivre argenté C, C, contenant deux litres d'eau, et fermé par un couvercle. Au centre de ce dernier



est une large ouverture par laquelle on introduit la chambre à combustion V et ses accessoires, laquelle est en cuivre doré et suspendue au couvercle par trois tiges.

Une caisse cylindrique A, en cuivre argenté à l'intérieur, enveloppe tout le calorimètre, et dans l'intervalle qui l'en sépare est une peau de cygne dont le duvet est en dedans. Le tout est plongé dans une seconde caisse B, B, remplie d'eau et destinée à arrêter la chaleur qui rayonne de l'extérieur. Un thermomètre T donne la température de l'eau du calorimètre, et un thermomètre *t* celle de l'eau de la caisse B.

L'oxygène arrive à la chambre V par deux tubes *o* et *r*, dont le premier sert à insuffler le gaz pour activer plus ou moins la combustion, tandis que le second, en communication avec un gazomètre, entretient la chambre V à une pression constante. Au couvercle de cette chambre est fixée une tige qui porte à sa partie

inférieure une capsule *c*, dans laquelle sont placés les corps solides qu'on veut brûler. Ayant soulevé le couvercle, on enflamme le corps qui est dans la capsule et on le met rapidement en place. Les produits gazeux qui se forment alors se dégagent par une tubulure *i*, descendent par un tube *u* dans un serpentin *S*, et de là gagnent l'atmosphère par les tubes *x* et *n*. Les produits volatils qui se condensent dans le serpentin sont recueillis dans un réservoir *E*. Pour expérimenter avec les liquides combustibles, on les brûle à l'aide d'une lampe à mèche d'amiante; si ce sont des gaz qu'on veut brûler, on les fait arriver par le tube *r*.

Le tube *g*, fixé sur le couvercle de la chambre, sert, au moyen d'un miroir incliné *m*, à observer comment se comporte la combustion et quand elle est terminée; il est fermé intérieurement par des plaques athermanes (439). Enfin, dans l'eau du calorimètre est un agitateur annulaire supporté par deux tiges *a*, *a'*, et mû à la main ou par un mouvement d'horlogerie.

Dans cet appareil, comme dans les autres calorimètres à eau, c'est du poids du corps brûlé et de la température communiquée à l'eau du vase *C*, qu'on déduit par le calcul la chaleur dégagée pendant la combustion, en ayant soin de tenir compte de la chaleur perdue par le rayonnement.

En prenant pour unité de chaleur la quantité nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 gramme d'eau, Fabre et Silbermann ont obtenu les nombres suivants :

Chaleur de combustion pour 1 gramme de combustible.

Hydrogène avec oxygène.	54 462		Graphite naturel.	7 756
— avec chlore.	23 783		Diamant	7 770
Essence de térébenthine.	16 852		Alcool absolu.	7 184
Ether sulfurique.	9 027		Oxyde de carbone.	2 403
Charbon de bois	8 080		Soufre natif.	2 262

436. **Lois de la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques.** — Des travaux de Dulong, de Despretz, de Hess, de Fabre et Silbermann, et d'autres physiciens, on a tiré les lois suivantes sur la production de la chaleur dans les actions chimiques :

1° Un corps qui brûle produit toujours la même quantité de chaleur pour arriver au même degré d'oxydation, soit qu'il l'atteigne immédiatement, soit qu'il n'y arrive que progressivement. Par exemple, 1 gramme de carbone qui se transforme directement en acide carbonique dégage la même quantité de chaleur que s'il s'était d'abord transformé en oxyde de carbone, puis celui-ci en acide carbonique.

2° Dans une combinaison chimique, quelle qu'en soit la durée, la quantité de chaleur dégagée est toujours la même.

3^o La chaleur dégagée dans la combustion d'un corps composé est plus faible que la somme des quantités de chaleur qu'on obtient en brûlant séparément chacun de ses éléments.

457. **Appareils pour obtenir de très-hautes températures.** — La combustion du charbon de bois et celle du coke par l'air ont été longtemps les seules sources de chaleur utilisées dans l'industrie pour obtenir de hautes températures. Elles suffisent pour fondre le fer, mais non le platine. On fondait ce métal par le courant électrique, mais en petite quantité. M. H. Sainte-Claire Deville, le premier, est parvenu à le fondre en grande masse par la combustion du gaz d'éclairage avec l'oxygène seul. L'appareil de ce savant consiste en deux tuyaux concentriques de cuivre, terminés chacun par un bout de platine. L'oxygène arrive d'un gazomètre par le tuyau central, et l'hydrogène carboné par l'intervalle compris entre les parois des tuyaux. Ce jet, après avoir été enflammé, pénètre dans un moufle de chaux, percé latéralement d'une petite ouverture par laquelle se dégagent les produits de la combustion. Quand le moufle est fortement échauffé, on introduit par cette ouverture des plaques de platine qui fondent presque instantanément. En quelques minutes, on peut ainsi fondre 1 kilogramme de platine. Le métal liquéfié est alors tellement incandescent, qu'il répand, lorsqu'on ouvre le moufle, un éclat comparable à celui de la lumière électrique.

On parvient aussi à fondre le platine par la combustion du gaz d'éclairage avec l'air; mais il faut que celui-ci soit comprimé au moins à deux atmosphères.

On doit à Bunsen un appareil connu sous le nom de *brûleur de Bunsen*, dont l'usage est très-répandu dans les laboratoires. Il consiste encore en deux tuyaux concentriques; le gaz d'éclairage arrive par le tuyau central, et l'air est aspiré entre les deux tuyaux par le tirage. Un seul brûleur suffit pour fondre l'argent.

CHAUFFAGE

458. **Différentes sortes de chauffage.** — Le *chauffage* est un art qui a pour objet d'utiliser, dans l'économie domestique et dans l'industrie, les sources de chaleur que nous offre la nature.

La source de chaleur principalement en usage jusqu'à nos jours est la combustion du bois, du charbon, de la houille, du coke, de la tourbe et de l'anthracite. Depuis quelques années on utilise le gaz d'éclairage et les huiles essentielles pour le chauffage.

D'après les appareils qui servent à la combustion, on peut distinguer cinq sortes de chauffage : 1^o chauffage à foyer extérieur,

les cheminées; 2^o chauffage à foyer intérieur, les poêles; 3^o chauffage par l'air chaud, calorifères; 4^o chauffage par la vapeur; 5^o chauffage par la circulation d'eau chaude.

459. **Cheminées.** — On sait que les cheminées sont des foyers ouverts, adossés à un mur, et surmontés d'un tuyau par lequel se dégagent les produits de la combustion. Leur invention paraît dater du 1^{er} siècle de l'ère chrétienne. Dans les temps plus reculés, le foyer était placé au milieu de la pièce à chauffer, et la fumée s'échappait par une ouverture pratiquée sur le comble des habitations. C'est pourquoi Vitruve défend d'enrichir d'ouvrages somptueux les appartements d'hiver, afin qu'ils ne soient pas endommagés par la fumée et par la suie.

Les premières cheminées, quoique placées contre les murs, n'étaient pas entourées de chambranles, mais seulement surmontées d'une *hotte* qui donnait dégagement à la fumée. Ce n'est que dans les temps modernes qu'on a donné aux cheminées la forme qu'elles ont aujourd'hui. Ce sont des physiciens qui les ont successivement perfectionnées, et particulièrement Philibert Delorme, Gauger, Franklin, Montgolfier et Rumford.

Quelques perfectionnements qu'on ait apportés à la construction des cheminées, elles sont encore le mode de chauffage le plus imparfait et le plus dispendieux; car elles n'utilisent, avec le bois, qu'environ 6 pour 100 de la chaleur totale dégagée par le combustible, et 13 avec le coke et la houille. Cette perte énorme de chaleur provient de ce que le courant d'air nécessaire à la combustion entraînant toujours une portion considérable de la chaleur produite, celle-ci va se perdre en grande partie dans l'atmosphère. C'est ce qui avait fait dire à Franklin que, si l'on voulait, pour une quantité de combustible donnée, obtenir le moins de chaleur possible, il faudrait adopter les cheminées. Néanmoins elles sont et seront toujours le mode de chauffage le plus agréable et le plus sain, par la présence du feu et par le renouvellement continu qu'elles entretiennent dans l'air des appartements.

460. **Tirage des cheminées.** — On entend par *tirage* d'une cheminée un courant de bas en haut qui s'établit dans le tuyau par l'effet de l'ascension des produits de la combustion; quand le courant est rapide et continu, on dit que la cheminée *tire* bien.

Le tirage est dû à la différence de température à l'intérieur et à l'extérieur; car, en vertu de cette différence, les matières gazeuses qui remplissent le tuyau étant moins denses que l'air de l'appartement, l'équilibre est impossible (172). En effet, le poids de la colonne gazeuse CD (fig. 357), dans le tuyau, étant moindre que celui de

la colonne d'air extérieure AB, de même hauteur, il en résulte, de l'extérieur vers l'intérieur, un excès de pression qui refoule les produits de la combustion d'autant plus rapidement, que la différence de poids entre les deux masses gazeuses est plus grande.

On constate très-bien l'existence des courants que font naître dans les gaz les différences de température, au moyen de l'expérience suivante. On ouvre une porte mettant en communication une pièce chauffée avec une 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 et plus dense qui vient le remplacer, arrive par le bas.

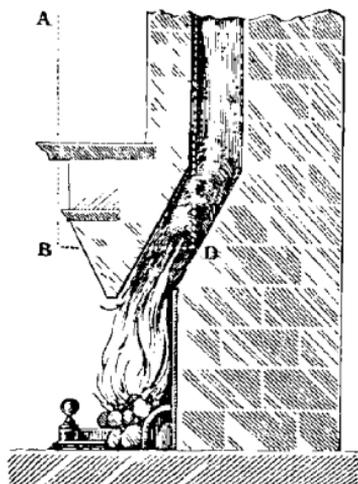


Fig. 357.

Pour avoir un bon tirage, une cheminée doit satisfaire aux conditions suivantes :

1^o La section du tuyau doit avoir la dimension strictement nécessaire pour l'écoulement des produits de la combustion; autrement, si cette section est trop grande, il s'établit à la fois des courants ascendants et des courants descendants, et la cheminée fume. Il est bon de placer au sommet du tuyau une buse conique plus étroite que lui, afin que la fumée sorte avec une vitesse suffisante pour résister à l'action du vent.

2^o Le tuyau 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 de pression sera d'autant plus grand, que la colonne d'air échauffé sera plus haute.

3^o 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, la combustion ne pourrait se prolonger, ou il s'établirait des courants d'air descendants qui rabattraient la fumée. L'air entre ordinairement en quantité suffisante par les joints des portes et des croisées.

4^o On doit toujours éviter de faire communiquer entre eux

deux tuyaux de cheminée; car si l'un tire plus que l'autre, il se produit dans ce dernier un courant d'air descendant qui ramène la fumée.

461. **Poêles.** — Les *poêles* sont des appareils de chauffage à foyer isolé, placés au milieu même de la masse d'air qu'on veut échauffer, en sorte que la chaleur rayonne dans toutes les directions autour du foyer. A la partie inférieure est la prise d'air nécessaire à la combustion, dont les produits se dégagent, à la partie supérieure, par des tuyaux de tôle plus ou moins longs. Ces produits gazeux sortant ainsi très-refroidis, on parvient à utiliser la presque totalité de la chaleur développée; aussi ce mode de chauffage est-il le plus économique; mais il est loin d'être aussi salubre que les cheminées, car il ne donne qu'une ventilation très-faible, et même nulle, quand la prise d'air se fait à l'extérieur, comme cela a lieu dans les poêles suédois. Les poêles ont, en outre, l'inconvénient de répandre une odeur désagréable et nuisible, surtout lorsqu'ils sont de fonte ou de tôle, ce qui peut être attribué à la décomposition des matières organiques qui sont dans l'air par leur contact avec les parois chaudes des tuyaux; et aussi à ce que la fonte étant, à une température élevée, perméable aux gaz des foyers (168), ces gaz vicient l'air.

462. **Chauffage par la vapeur.** — La propriété qu'ont les vapeurs de restituer leur chaleur de vaporisation, lorsqu'elles se condensent, a été utilisée pour le chauffage des bains, des ateliers, des édifices publics, des serres, des étuves. Pour cela, on produit la vapeur dans des chaudières analogues à celles des machines à vapeur; puis on la fait circuler dans des tuyaux placés dans le lieu qu'il s'agit de chauffer. La vapeur se condense dans ces tuyaux et leur cède toute sa chaleur latente, qui devient libre au moment de la condensation. Cette chaleur se transmet ensuite à l'air extérieur ou au liquide dans lequel sont placés les tuyaux de conduite.

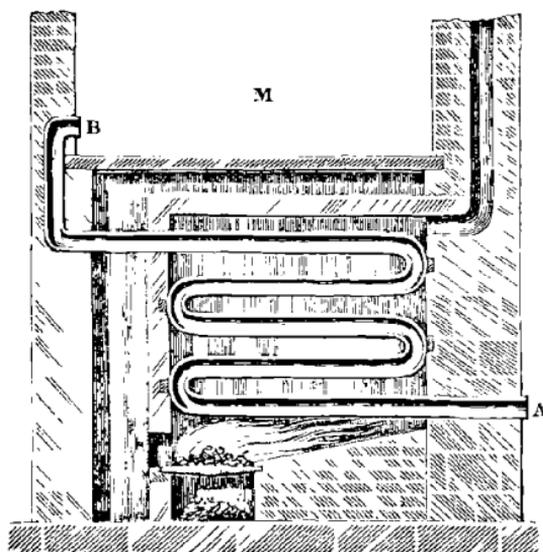
463. **Chauffage par l'air chaud.** — Le chauffage par l'air chaud consiste à chauffer de l'air dans la partie inférieure d'un édifice, et à le laisser ensuite s'élever jusqu'aux étages supérieurs, en vertu de sa moindre densité, dans des tuyaux de conduite placés dans les murs. L'appareil est disposé comme le montre la figure 358. Un fourneau F, établi dans les caves, contient, à la suite les uns des autres, un système de tubes recourbés AB, dont un seul est visible dans le dessin. C'est par l'orifice inférieur A, qui est la *prise d'air*, que l'air extérieur pénètre dans les tubes; là il s'échauffe, et, s'élevant dans le sens des flèches, pénètre dans les appartements M par l'orifice supérieur B, qu'on nomme *bouche de chaleur*. Dans les différents étages, chaque pièce a ainsi une ou plusieurs bou-

ches de chaleur, qui se placent le plus bas possible, l'air chaud tendant toujours à monter.

Le conduit O est un tuyau de cheminée ordinaire par lequel se dégagent du fourneau les produits de la combustion.

Ces appareils, nommés *calorifères*, sont beaucoup plus écono-

Fig. 358.



miques que les cheminées; mais ils ne peuvent ventiler aussi bien les appartements, et, par conséquent, sont moins salubres.

464. Chauffage par circulation d'eau chaude. — Le chauffage par circulation d'eau chaude consiste en un mouvement circulaire continu d'eau qui, après s'être échauffée dans une chaudière, s'élève dans une série de tubes; puis, après s'être refroidie, revient à la chaudière par une série semblable.

Le premier appareil propre à ce genre de chauffage fut inventé par Bonnemain, en France, vers la fin du siècle dernier. La figure 359 représente la disposition adoptée par M. Léon Duvoir pour chauffer un édifice de plusieurs étages. L'appareil de chauffage, qui est dans les caves, consiste en une chaudière *oo*, en forme de cloche, et à foyer intérieur *F*. A la partie supérieure de la chaudière est fixé un long tube *M*, qui se rend à un réservoir *Q*, placé dans les combles de l'édifice qu'on veut chauffer. Ce réservoir porte, à sa partie supérieure, une tubulure *n* fermée par une soupape *s* qu'on charge plus ou moins, de manière à limiter la tension de la vapeur dans l'intérieur de l'appareil.

La chaudière et le tube M étant remplis d'eau, ainsi qu'une partie du réservoir Q, à mesure que l'eau s'échauffe dans la chaudière, il se produit, dans le tube M, un courant ascendant d'eau chaude

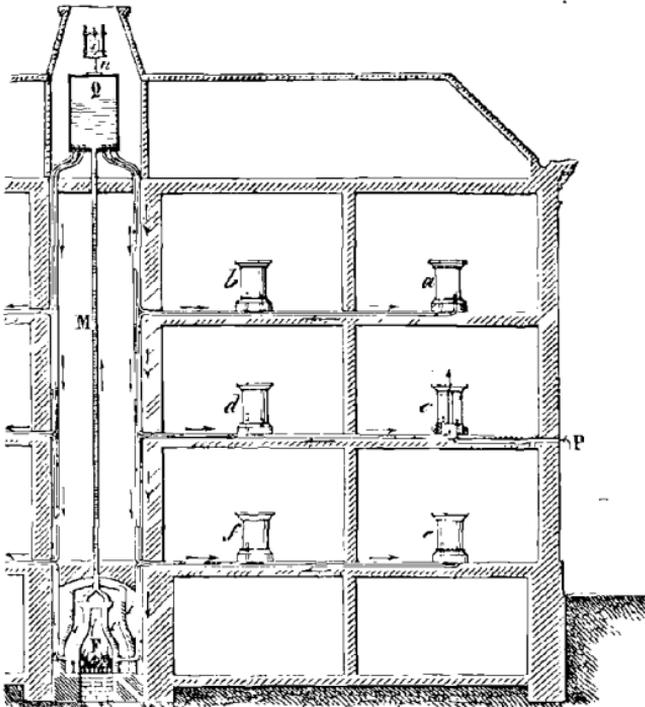


Fig. 359.

jusqu'au réservoir Q, tandis qu'en même temps s'établissent des courants descendants d'eau moins chaude et plus dense, partant de la partie inférieure de ce réservoir, et se rendant respectivement par autant de tubes dans des récipients *b*, *a*, remplis d'eau. Puis de ceux-ci partent de nouveaux tubes dans lesquels le courant descendant se continue jusqu'à d'autres récipients *d*, *c*, et *f*, *e*; enfin, de ces derniers, le courant se continue, par des tubes de retour, jusqu'à la partie inférieure de la chaudière.

Pendant ce double parcours, l'eau chaude cédant sa chaleur sensible aux tubes et aux récipients, ceux-ci s'échauffent et deviennent de véritables poêles à eau. On en calcule facilement le nombre et les dimensions, pour chauffer un espace déterminé, en s'appuyant sur cette donnée de l'expérience et de la théorie, qu'un litre d'eau suffit pour communiquer la chaleur nécessaire à 3 200

litres d'air. Deux de ces poêles peuvent, pendant les froids, entretenir 600 à 700 mètres cubes d'air à 15 degrés.

Dans l'intérieur des récipients *a, b, c, d, e, f*, sont des tubes de fonte remplis d'air pris à l'extérieur par des tubes P, placés au-dessous du plancher. Cet air s'échauffe dans les tubes, et se dégage ensuite à la partie supérieure des récipients.

Le principal avantage de ce mode de chauffage est de donner une température sensiblement constante, la masse d'eau contenue dans les récipients et dans les tubes ne se refroidissant que lentement; aussi l'usage en est-il très-répandu pour les serres, les étuves, l'incubation artificielle, et, en général, dans tous les cas où l'on a besoin d'une température uniforme.

SOURCES DE FROID

465. Diverses sources de froid. — Les sources de froid sont : le passage de l'état solide à l'état liquide, celui de l'état liquide à l'état de vapeur ou de gaz, la dilatation des gaz, le rayonnement en général, et particulièrement le rayonnement nocturne. Ayant déjà fait connaître les deux premières (341 et 366), nous ne parlerons ici que des deux dernières.

466. Froid produit par la dilatation des gaz. — On a vu (447) que, par la compression des gaz, la température s'élève; réciproquement, la raréfaction d'un gaz est accompagnée d'un abaissement de température, par suite de la disparition de chaleur occasionnée par le travail intérieur du gaz. Ce phénomène se trouve déjà démontré par l'expérience de M. Tyndall donnée plus haut (448); on le constate encore en plaçant le thermomètre de Bréguet (290) sous le récipient de la machine pneumatique : à chaque coup de piston, le gaz se dilate et l'aiguille avance vers le zéro.

467. Froid dû au rayonnement nocturne. — Pendant le jour, la surface du sol reçoit du soleil plus de chaleur qu'elle n'en émet vers les espaces célestes, et la température s'élève. C'est l'inverse pendant la nuit : la chaleur que rayonne alors la terre n'est plus compensée, et de là un abaissement de température d'autant plus grand, que le ciel est moins nuageux ; car, lorsqu'il y a des nuages, ceux-ci émettent vers le sol des rayons d'une intensité bien moins faible que celle des rayons venant des espaces célestes. On observe, en effet, dans certains hivers, que les rivières ne gèlent pas, quoique le thermomètre soit pendant plusieurs jours au-dessous de — 5 degrés, le ciel étant couvert ; tandis que, dans d'autres hivers moins rigoureux, les rivières gèlent lorsque le ciel est serein. Le pouvoir émissif a aussi une grande influence sur le re-

froidissement produit par le rayonnement nocturne : plus ce pouvoir est grand, plus le refroidissement est considérable.

On verra, en MÉTÉOROLOGIE, que c'est le refroidissement dû au rayonnement nocturne qui est cause du phénomène de la rosée.

Au Bengale, le refroidissement nocturne est utilisé pour obtenir artificiellement de la glace. A cet effet, pendant les nuits serènes, on expose sur le sol, en ayant soin de les isoler sur des substances non conductrices, comme de la paille ou des feuilles sèches, de grands vases plats, remplis d'eau. Là, par l'effet du rayonnement nocturne, ces vases se refroidissent assez pour que l'eau se congèle, même quand l'air est à 10 degrés au-dessus de zéro.

CHAPITRE XII

MACHINES A VAPEUR

468. Objet des machines à vapeur. — Les *machines à vapeur* sont des appareils qui servent à utiliser la force élastique de la vapeur d'eau comme force motrice. Dans les machines généralement usitées, la vapeur, en vertu de sa force élastique, imprime à un piston un mouvement rectiligne alternatif, qui est ensuite transformé en mouvement circulaire continu, à l'aide de divers organes mécaniques. Ces machines sont dues à Watt, célèbre ingénieur anglais.

Toute machine à vapeur se composant de deux parties bien distinctes, l'appareil où se produit la vapeur et la machine proprement dite, nous décrirons d'abord le premier appareil.

469. Générateur de vapeur. — On appelle *générateur*, ou *chaudière*, l'appareil qui sert à la production de la vapeur. La figure 360 représente une vue longitudinale, et la figure 361 une coupe transversale d'un générateur de machine fixe. Ceux des locomotives et des bateaux à vapeur en diffèrent beaucoup. Ce générateur consiste en un long cylindre de tôle PQ fermé à ses deux extrémités par deux calottes sphériques. Au-dessous sont deux cylindres B, B, d'un plus petit diamètre, également de tôle, et communiquant avec le générateur chacun par deux tubulures. Ces cylindres se nomment *bouilleurs*. Destinés à recevoir le coup de feu du foyer, ils sont complètement remplis d'eau, tandis que le cylindre PQ l'est seulement à un peu plus de moitié. Au-dessous des bouilleurs est le foyer, dans lequel on brûle de la houille ou du coke. Afin de multiplier la surface de chauffe et d'utiliser toute la chaleur entraînée par les produits de la combustion, on fait circuler ceux-ci dans des conduits de briques qui entourent les parois des bouilleurs et du générateur. Ces conduits, qu'on nomme *carneaux*, divisent le fourneau en deux compartiments horizontaux E, F, et D, C, D (fig. 361). En outre, le compartiment supérieur est partagé en trois carneaux distincts D, C, D, par deux cloisons verticales, qui ne sont pas représentées dans le dessin et correspondent des deux côtés aux bouilleurs. La flamme et les produits de la combustion, rasant d'abord le dessous des bouilleurs d'avant en arrière, reviennent en sens contraire par le carneau central; puis, se divisant, ils se rendent enfin par les carneaux latéraux D, D, dans le tuyau K de la cheminée, d'où ils se perdent dans l'atmosphère.

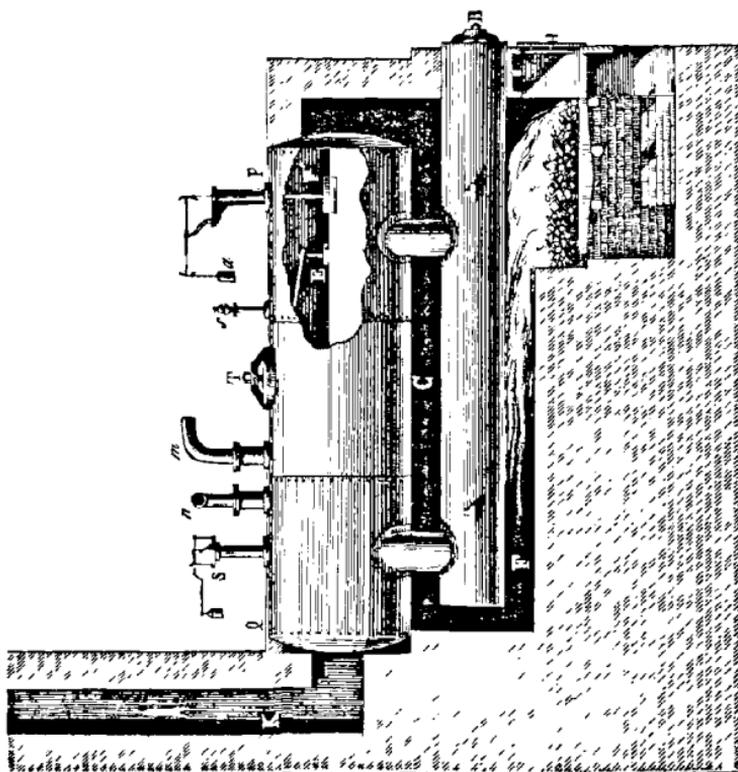


Fig. 360.

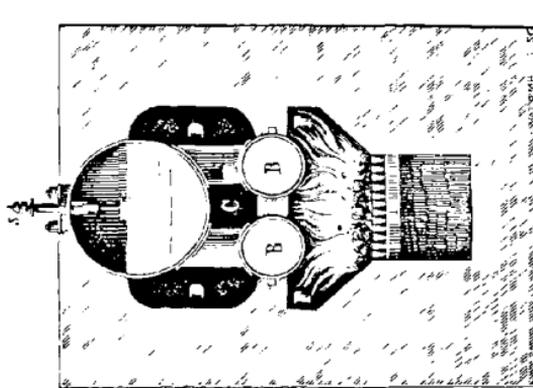


Fig. 361.

Légende explicative des figures 360 et 361.

- B, B *Bouilleurs* au nombre de deux; ils sont toujours pleins d'eau, et, placés au centre du foyer, ils reçoivent directement le coup de feu.
- C, D, D *Carneaux* qui entourent les bouilleurs et les parois inférieures du générateur. Ils servent à utiliser la chaleur entraînée par les produits de la combustion.
- E *Flotteur* du sifflet d'alarme s.
- F, F *Foyer.*
- F' *Flotteur* destiné à indiquer le niveau de l'eau dans la chaudière. Il se compose d'une pierre rectangulaire plongeant en partie dans l'eau, comme le montre la déchirure pratiquée dans la paroi du générateur. Cette pierre, qui est suspendue à l'extrémité d'un levier, est maintenue en équilibre par la perte de poids qu'elle éprouve dans l'eau et par un contre-poids *a*. Tant que l'eau s'élève à la hauteur voulue, le levier qui soutient le flotteur reste horizontal; mais il incline vers F' lorsqu'il n'y a pas assez d'eau, et en sens contraire, s'il y en a trop. Dans l'un comme dans l'autre cas, le chauffeur est prévenu pour régler convenablement l'introduction de l'eau d'alimentation.
- K *Tuyau* de cheminée par lequel se dégagent les produits de la combustion. C'est pour activer le tirage qu'on donne à ce tuyau une très-grande hauteur.
- P, Q *Générateur* cylindrique de tôle, relié aux bouilleurs par quatre tubulures, et rempli d'eau à un peu plus de moitié.
- S *Soupage de sûreté*, déjà décrite en parlant de la marmite de Papin (364).
- T *Trou d'homme*, qui s'ouvre pour les nettoyages et les réparations du générateur. Le trou d'homme est à fermeture *autoclave*, c'est-à-dire se fermant elle-même. Pour cela, cette fermeture consiste en un couvercle appliqué intérieurement contre les bords de la paroi. Là, une vis de pression non-seulement le maintient, mais le presse de bas en haut contre ces mêmes bords. Dans cette position, plus la tension de la vapeur est élevée, plus le couvercle est pressé contre la paroi, et plus la fermeture est hermétique.
- a *Contre-poids* du flotteur.
- m *Tube* qui laisse dégager la vapeur pour se rendre à la machine.
- n *Tube* qui donne entrée à l'eau d'alimentation du générateur.
- s *Sifflet d'alarme*, ainsi nommé parce qu'il sert à donner l'alarme lorsqu'il n'y a plus assez d'eau dans la chaudière, circonstance qui peut amener une explosion lors de la rentrée de l'eau, parce qu'alors les parois étant rouges, il se produit un excès de vapeur au moment où l'eau rentre. Tant que le niveau n'est pas trop bas dans la chaudière, la vapeur ne passe pas dans le sifflet; mais si le niveau baisse au-dessous de la hauteur convenable, un petit flotteur E, qui ferme le pied du sifflet, descend et donne issue à la vapeur. Celle-ci, en s'échappant, vient raser les bords d'un disque métallique mince, et, le mettant en vibration, lui fait rendre un son très-aigu, qui avertit le chauffeur.

470. *Machines à vapeur à double effet.* — On nomme *machines à double effet* celles dans lesquelles la vapeur agit alternativement en dessus et en dessous du piston pour lui imprimer un mouvement rectiligne alternatif, qu'on transforme ensuite en mouvement circulaire continu.

La figure 362 donne une vue d'ensemble d'une machine à vapeur à double effet, et les figures 363 et 364 représentent une coupe verticale du cylindre et de la distribution de vapeur. Cette machine est toute de fonte, et supportée par un bâti NN de même métal.

Sur la droite du dessin est un cylindre *p*, dans lequel la vapeur arrive du gé-

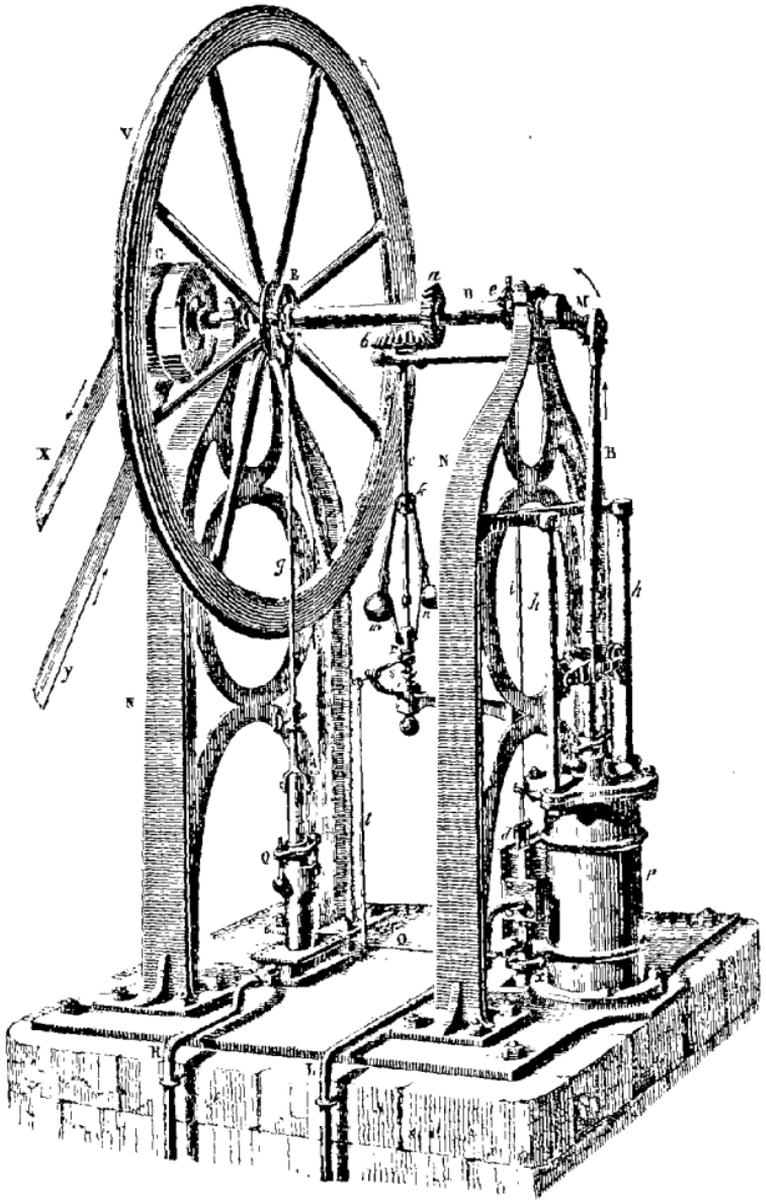


Fig. 362 ($h = 2^m$).

nérateur par un tube α . C'est dans ce cylindre, dont la figure 364 montre la coupe verticale, qu'est le piston T, sur lequel la vapeur agit alternativement de haut en bas et de bas en haut. La tige A du piston, participant à ce double mouvement, le transmet à une longue pièce B qu'on nomme *bielle*, et qui s'articule d'un bout à l'extrémité de la tige A, et de l'autre à une pièce plus petite M, qui est la *manivelle*. Du double mouvement ascendant et descendant de la bielle, la manivelle reçoit un mouvement circulaire continu qu'elle transmet à l'*arbre de couche* D, auquel elle est invariablement fixée.

A son autre extrémité, cet arbre de couche porte une poulie G, sur laquelle passe une *courroie sans fin* XY. C'est cette courroie qui, entraînée par la poulie, transmet au loin le mouvement à des machines-outils, telles que tours, laminoirs, scieries, presses à imprimer, etc. A côté de la poulie G en est une seconde qui n'est pas fixée à l'arbre, et qu'à cause de cela on nomme *poulie folle*. Elle sert à arrêter le mouvement des machines-outils que fait marcher la machine à vapeur sans arrêter cette dernière. Pour cela, au moyen d'une fourchette de fer qui n'est pas représentée dans le dessin, et qui embrasse la courroie, on fait passer celle-ci de la poulie G sur la poulie folle. La courroie ne transmettant plus alors la force motrice, les machines qu'elle faisait mouvoir s'arrêtent.

Sur l'arbre de couche est en outre une grande roue de fonte V qu'on nomme *volant*. Cette roue, qui a une très-grande masse, est nécessaire pour régulariser le mouvement de la machine. En effet, chaque fois que le piston arrive au haut et au bas de sa course, il éprouve un arrêt très-court, pendant lequel le mouvement de toute la machine tend à être suspendu. Mais alors le volant, par un effet d'inertie et en vertu de sa vitesse acquise, entraîne l'arbre de couche avec lui et maintient ainsi le mouvement régulier.

471. **Régulateur à force centrifuge.** — Le mouvement des machines à vapeur tend sans cesse à s'accélérer ou à se retarder, soit parce que la tension de la vapeur varie dans le générateur, soit parce que le nombre des machines-outils auxquelles le mouvement est transmis est plus ou moins considérable. C'est pourquoi Watt a ajouté à ses machines un *régulateur à force centrifuge*. On nomme ainsi un appareil dans lequel la force centrifuge est utilisée pour régler la vapeur qui arrive à la machine, de manière à l'augmenter quand la vitesse est trop faible et à la diminuer quand la vitesse est trop grande.

Le régulateur à force centrifuge consiste en un parallélogramme articulé *kmnr* (fig. 362), fixé sur une tige verticale *c*, à laquelle l'arbre de couche transmet son mouvement de rotation à l'aide de deux roues d'angle *a* et *b*. Les branches latérales du parallélogramme sont chargées de deux boules de fonte *m* et *n*, qui, par leur poids, tendent sans cesse à le fermer. Au contraire, la force centrifuge qui résulte de la rotation des boules avec la tige *c* tend constamment à les faire diverger et à ouvrir le parallélogramme. De là, suivant le plus ou moins de vitesse de la machine, un mouvement de haut en bas ou de bas en haut, qui se transmet à une douille *r*, glissant le long de la tige *c*. C'est cette douille qui, par une suite de leviers *s*, *t*, O, fait ouvrir ou fermer une valve *v* (fig. 363) placée dans le tuyau α par lequel arrive la vapeur. Cette valve est disposée de manière qu'elle se ferme d'autant plus, que les boules du régulateur divergent davantage. Par suite, lorsque la vitesse de la machine dépasse la limite voulue, la vapeur arrive en moins grande quantité, et, la force motrice diminuant, le mouvement se ralentit.

472. **Pompe alimentaire.** — Il est nécessaire d'alimenter le générateur d'eau, à mesure que celle-ci se vaporise. Or c'est la machine à vapeur elle-même qui est chargée de ce travail. Pour cela, on y ajoute une pompe Q, aspirante et foulante, dont la tige *g* reçoit son mouvement de va-et-vient d'un excentrique E placé sur l'arbre de couche. Cette pompe, qu'on désigne sous le nom de *pompe alimentaire*, aspire l'eau d'un puits et la refoule par un tube de cuivre R dans le générateur.

478. **Distribution de vapeur.** — Pour compléter la description de la machine à vapeur, il reste à faire connaître la *distribution de vapeur*, c'est-à-dire le mécanisme qui sert à faire passer la vapeur alternativement au-dessus et au-dessous du piston. Les figures 363 et 364 donnent une coupe de ce mécanisme. La vapeur arrivant du générateur par le tube x se rend dans une boîte

Fig. 363.

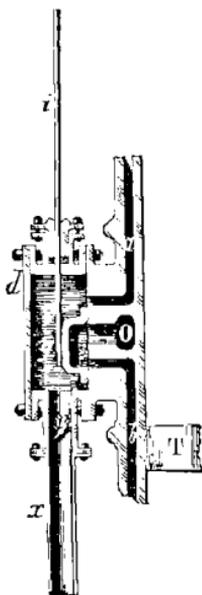
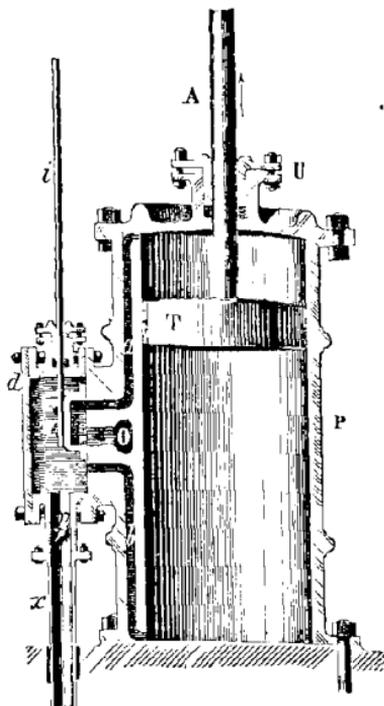


Fig. 364.



de fonte d , qui est la *boîte à distribution*. De celle-ci, dans l'épaisseur même des parois du cylindre, partent deux conduits a et b , dirigeant la vapeur, l'un au-dessus, l'autre au-dessous du piston. Une pièce mobile y , qu'on nomme la *glissière*, ou le *tiroir*, ferme toujours un de ces conduits. Dans la figure 364, c'est le conduit supérieur a qui se trouve fermé, et la vapeur arrivant en dessous du piston le fait monter.

La glissière est fixée à une tige i , qui reçoit d'un excentrique e (fig. 362) un mouvement alternatif de bas en haut et de haut en bas, en vertu duquel la glissière prend successivement les positions représentées dans les figures 363 et 364.

Tant que la vapeur arrive en dessous du piston (fig. 364), la partie supérieure du cylindre est en communication, par le conduit a , avec une cavité O d'où part un tuyau L (fig. 362). C'est par ce tuyau que se dégage la vapeur qui vient d'agir sur le piston. Puis, quand la vapeur arrive au-dessus du piston (fig. 363), c'est la partie inférieure du cylindre qui communique, par le conduit b , avec la même cavité O et avec le tuyau L . Les conduits a et b servent donc alternativement à l'arrivée et à la sortie de la vapeur.

Dans les machines à haute pression (476), la vapeur qui se dégage par le tuyau L va se perdre dans l'atmosphère; mais dans les machines à basse ou à

moyenne pression, la vapeur se rend dans un vase clos, nommé *condenseur*. Ce vase est plein d'eau froide, au contact de laquelle la vapeur se condense; ce qui fait gagner une atmosphère, puisque le vide tend toujours à se produire sur la face du piston opposée à celle qui reçoit l'action de la vapeur. Toutefois, quoique une pompe spéciale renouvelle constamment l'eau du condenseur, la chaleur que lui cède la vapeur en se condensant la maintient toujours à près de 40 degrés, température à laquelle la tension de la vapeur dans le condenseur est bien inférieure à celle de la vapeur qui arrive du générateur (350).

La machine représentée dans la figure 382 est une *machine à haute pression, sans condenseur*. De plus, c'est une *machine à bielle articulée*, système dû à l'ingénieur anglais Maudslay. La machine de Watt, identique sous tous les autres rapports, est à *balancier*; c'est-à-dire que le mouvement de la tige du piston se transmet à l'extrémité d'un énorme balancier de fonte, mobile en son milieu sur deux tourillons, et c'est ensuite ce balancier qui, à son autre extrémité, communique le mouvement à la bielle, à la manivelle et à l'arbre de couche. L'emploi des machines à bielle articulée est aujourd'hui le plus répandu.

474. *Locomotives*. — On appelle *machines locomotives*, ou simplement *locomotives*, des machines à vapeur qui, montées sur un train de voiture, se déplacent elles-mêmes en transmettant le mouvement aux roues.

Les locomotives sont à bielle articulée; mais le volant des machines fixes est supprimé. La forme du générateur est aussi complètement modifiée. Les parties principales de ces machines sont le *châssis*, la *boîte à feu*, le *corps cylindrique* de la chaudière, la *boîte à fumée*, les *cylindres à vapeur* avec leurs tiroirs, les *roues motrices* et l'*alimentation*.

Le châssis est un cadre de bois de chêne porté par les essieux des roues et soutenant lui-même toutes les parties de la machine. Le dessin (fig. 365) représente le mécanicien qui dirige la locomotive, monté sur la plate-forme de tôle qui recouvre le châssis, au moment où il se dispose à ouvrir la *prise de vapeur* I, placée dans la partie supérieure de la boîte à feu Z. A la partie inférieure de celle-ci est le foyer, d'où la flamme et les produits de la combustion se rendent dans la boîte à fumée Y, puis dans le tuyau de cheminée, après avoir traversé 126 tubes de cuivre, plongés dans l'eau de la chaudière.

Légende explicative de la figure 365.

- A Tuyau de cuivre rouge recevant la vapeur par l'extrémité I, et se bifurquant à l'autre extrémité pour la conduire aux deux cylindres qui contiennent les pistons moteurs
- B Poignée du levier de changement de marche. Elle transmet le mouvement à la tringle C, qui le communique à la distribution de vapeur.
- C Tringle du changement de marche.
- D Partie inférieure de la boîte à feu contenant les grilles du foyer.
- E Tuyau d'échappement de la vapeur après que celle-ci a agi sur les pistons.
- F Cylindre de fonte renfermant un piston moteur. De chaque côté de la locomotive il y en a un pareil. C'est afin de laisser apercevoir le piston qu'on a dessiné le cylindre entr'ouvert.
- G Tringle qui sert à ouvrir le tiroir I pour laisser passer la vapeur dans le tube A. Dans le dessin, le mécanicien tient à la main le levier qui fait tourner cette tringle.
- H Robinet de vidange de la chaudière.
- I Tiroir s'ouvrant et se fermant à la main pour la prise de vapeur.
- K Grande bielle motrice à fourchette réunissant la tête de la tige du piston à la manivelle M de la grande roue.
- L Lampe à réflecteur servant à indiquer, pendant la nuit, l'approche de la locomotive.

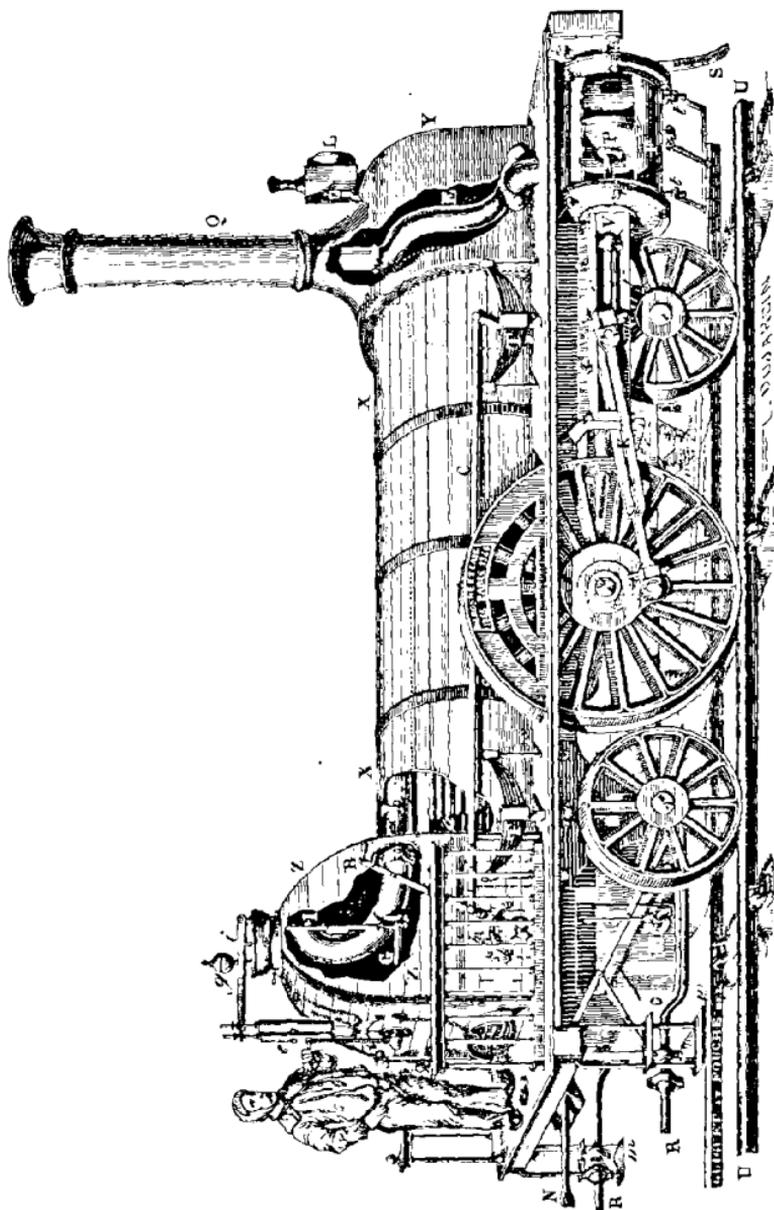


Fig. 365 (1 = 5m, 68).

- M Manivelle qui transmet à l'essieu de la grande roue le mouvement du piston.
- N Bouton d'attelage du tender qui suit la locomotive.
- O Porte du foyer par laquelle le chauffeur introduit le coke.
- P Piston métallique dont la tige s'articule à la bielle K.
- Q Tuyau de tôle par lequel se dégage la fumée, ainsi que la vapeur qui sort des cylindres.
- R, R Tuyaux conduisant l'eau du tender à deux pompes foulantes qui alimentent la chaudière, mais qui ne sont pas visibles dans le dessin.
- S Chasse-pierres destiné à écarter les pierres ou tout autre objet encombrant la voie.
- T, T Ressorts qui supportent la chaudière.
- U, U Rails de fer maintenus sur la voie par des coussinets de fonte fixés sur des traverses de bois.
- V Encadrement de la boîte à étoupe des cylindres.
- X, X Corps de la chaudière, recouvert de douves d'acajou destinées à diminuer la perte de chaleur par leur faible conductibilité. On voit, au-dessous du tube A, jusqu'où s'élève le niveau de l'eau dans la chaudière. Au milieu même de l'eau sont des tubes de cuivre *a*, dans lesquels passent les produits de la combustion pour se rendre dans la boîte à fumée.
- Y Boîte à fumée dans laquelle débouchent les tubes *a*.
- Z, Z Boîte à feu surmontée d'un dôme dans lequel se rend la vapeur.
- a* Tubes de cuivre au nombre de 125, ouverts aux deux bouts, et se terminant d'une part à la boîte à feu, de l'autre à la boîte à fumée. Ce sont ces tubes qui transmettent la chaleur du foyer à l'eau de la chaudière et la vaporisent.
- b* Secteur-guide placé sur le côté de la boîte à feu, et portant des crans dans lesquels peut engrener le bras de levier B. Le cran extrême d'avant correspond à la marche en avant; le cran extrême d'arrière à la marche en arrière; le cran du milieu est un point mort. Les crans intermédiaires entre celui-ci et les crans extrêmes donnent la détente pour la marche en avant ou en arrière (477).
- c* Étuis contenant des ressorts à boudin qui règlent le jeu des soupapes *f*.
- g* Sifflet d'alarme se faisant entendre à 2 000 mètres.
- f* Soupapes de sûreté.
- m, m* Marchepleds pour monter sur le tablier de la locomotive.
- n* Tube de cristal placé devant le mécanicien, et indiquant le niveau de l'eau dans la chaudière, avec laquelle il communique par ses deux bouts.
- r, r* Guides qui maintiennent rectiligne le mouvement de la tête du piston.
- t, t* Robinets de purge après la mise en train et l'échauffement des cylindres.
- v* Tringle qui transmet le mouvement aux robinets de purge.

475. **Machines à réaction; éolipyle.** — On nomme *machines à réaction* des machines dans lesquelles la vapeur agit par réaction, à la manière de l'eau dans le tourniquet hydraulique (86). L'idée en est déjà bien ancienne: 120 ans avant J.-C., Héron, le même qui inventa la fontaine qui porte son nom, a décrit l'appareil suivant, connu sous le nom d'*éolipyle à réaction*.

C'est une sphère creuse de métal (fig. 366), pouvant tourner librement autour de deux tourillons. Aux extrémités d'un même diamètre, sont deux tubulures percées latéralement et en sens contraires d'orifices par lesquels se dégage la vapeur. Pour introduire de l'eau dans la sphère, on la chauffe afin de raréfier l'air, puis on la plonge dans l'eau froide; l'air se contracte, et le liquide pénètre dans la boule. Si l'on chauffe alors l'appareil jusqu'à l'ébullition, la vapeur qui se dégage lui imprime un mouvement rapide de rotation, dû à la pression de la vapeur sur la paroi opposée à l'orifice de sortie.

Diverses tentatives ont été faites dans le but d'utiliser en grand la réaction de la vapeur comme force motrice; on a aussi essayé de la faire agir par im-

pulsion, en dirigeant un jet de vapeur sur les palettes d'une roue tournante; mais, dans ces différents procédés, la vapeur a toujours été loin de rendre l'effet utile qu'on obtient en la faisant agir par expansion sur un piston.

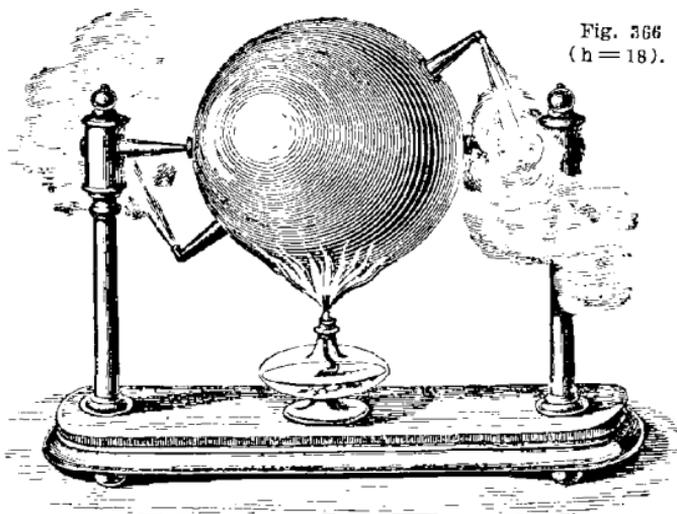


Fig. 366
(h = 18).

476. **Machines à basse, à haute et à moyenne pression.** — Une machine est dite à *basse pression*, lorsque la tension de la vapeur ne dépasse pas 1 atmosphère et $\frac{1}{4}$; à *moyenne pression*, lorsque la tension est comprise entre 2 et 4 atmosphères; et à *haute pression*, quand la tension surpasse 4 atmosphères.

477. **Machines à détente et sans détente.** — Si la vapeur arrive en plein sur le piston, pendant toute la durée de sa course, sa force élastique reste sensiblement la même, et l'on dit que la vapeur agit *sans détente*; mais si, par une disposition convenable du tiroir, la vapeur cesse d'arriver sur le piston, lorsque celui-ci est seulement aux deux tiers ou aux trois quarts de sa course, alors elle *se détend*, c'est-à-dire qu'en vertu de la force expansive due à sa haute température, elle agit encore sur le piston et achève de lui faire parcourir sa course. De là la distinction de *machines avec détente* et de *machines sans détente*. La détente économise la vapeur et, par suite, le combustible.

Enfin, on appelle *machines à condensation* celles qui sont munies d'un condenseur où la vapeur se liquéfie après qu'elle a agi sur le piston, et *machines sans condensation* celles qui n'ont pas de condenseur : telles sont les locomotives.

478. **Cheval-vapeur.** — En mécanique appliquée, on entend par *travail mécanique* d'un moteur le produit de l'effort qu'il exerce par le chemin parcouru par cet effort, et l'on a vu qu'on prend pour unité de travail mécanique le *kilogrammètre*, qui est le travail nécessaire pour élever 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur, en 1 seconde (37).

Dans la mesure du travail des machines à vapeur, on prend pour unité le *cheval vapeur*, qui représente le *travail nécessaire pour élever 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en 1 seconde*; c'est-à-dire qu'il équivaut à 75 kilogrammètres. Le travail d'un cheval-vapeur est à peu près double de celui d'un cheval de trait ordinaire.

On comptait en Angleterre, en 1866, 3 650 000 chevaux-vapeur.

LIVRE VII

LUMIÈRE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION, VITESSE ET INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE

479. **Lumière, hypothèses sur sa nature.** — La *lumière* est l'agent qui produit en nous, par son action sur la rétine, le phénomène de la vision. La partie de la physique qui fait connaître la théorie de la lumière est désignée sous le nom d'*optique*.

Pour expliquer l'origine de la lumière, on a adopté les mêmes hypothèses que pour la chaleur : celle de l'*émission* et celle des *ondulations*. Dans cette dernière, seule admise aujourd'hui, et soutenue successivement par Descartes, Grimaldi, Huyghens, Euler, Thomas Young, Malus et Fresnel, les molécules des corps lumineux sont animées d'un mouvement vibratoire infiniment rapide, qui se communique à l'éther (269). Dans cette hypothèse, un ébranlement en un point quelconque de l'éther se propage dans tous les sens sous la forme d'ondes sphériques lumineuses, de même que le son est propagé dans l'air par les ondes sonores. Toutefois les vibrations de l'éther ne se produisent pas perpendiculairement à la surface de l'onde lumineuse, comme dans la propagation du son, mais suivant cette surface même, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction que suit la lumière en se propageant ; ce qu'on exprime en disant que les vibrations sont *transversales*. On peut se former une idée de ces vibrations en secouant une corde par un bout : le mouvement se transmet en serpentant jusqu'à l'autre bout ; la propagation se fait donc dans le sens de la corde, mais les vibrations se font en travers. Or, l'éther pénétrant les milieux qui remplissent l'œil, les ondes lumineuses vont frapper le nerf optique épanoui au fond de cet organe, en sorte que la sensation de la lumière, comme celle du son et de la chaleur, a pour cause une communication de mouvement.

Les ondulations de l'éther, qui produisent la lumière, ne diffèrent que par la durée de la période de vibration, des ondulations

qui engendrent la chaleur. Ces dernières sont trop lentes pour ébranler la rétine, et par suite la chaleur est invisible. Ce n'est qu'au delà d'une certaine vitesse de vibration que les ondulations de l'éther deviennent lumineuses, et l'on verra même (630) que c'est la fréquence plus ou moins grande de ces ondulations qui fait naître en nous la sensation des différentes couleurs.

480. Corps lumineux, éclairés, diaphanes, translucides, opaques. — On nomme corps lumineux ceux qui émettent de la lumière, comme le soleil et les corps en ignition. Les corps lumineux ne sont pas les seuls visibles pour nous; les corps non lumineux le sont aussi, mais à la condition d'être éclairés, c'est-à-dire de recevoir de la lumière d'une source quelconque. Cette lumière étant ensuite renvoyée dans toutes les directions par un effet de réflexion (490), c'est elle qui nous les fait voir.

Les corps *diaphanes* ou *transparents* sont ceux qui laissent facilement passer la lumière, et au travers desquels on distingue les objets: tels sont l'eau, les gaz, le verre poli. Les *corps translucides* sont ceux au travers desquels on perçoit encore la lumière, mais sans pouvoir reconnaître la forme des objets: tels sont le verre dépoli, le papier huilé. Enfin, on appelle *corps opaques* ceux au travers desquels il n'y a pas transmission de lumière, comme les bois, les métaux. Toutefois il n'y a pas de corps complètement opaques; tous sont plus ou moins translucides lorsqu'ils sont réduits en feuilles assez minces. Foucault a fait voir qu'en argentant, sous une très-faible épaisseur, la surface extérieure des objectifs de lunette, la couche d'argent est tellement transparente qu'on observe très-bien le soleil au travers, observation qui se fait sans danger pour la vue, la plus grande partie de la chaleur et de la lumière solaire étant réfléchi par la couche d'argent ¹.

481. Propagation de la lumière dans un milieu homogène, rayon lumineux. — Un *milieu* est l'espace plein ou vide dans lequel se produit un phénomène. L'air, l'eau, le verre, sont des milieux

¹ « Certains corps sont transparents, parce que l'éther et leurs atomes sont entre eux dans des rapports tels, que les ondes qui produisent la lumière passent entre les atomes sans leur céder le mouvement dont elles sont animées. Dans les corps colorés (547), certaines ondes sont arrêtées ou absorbées, mais celles qui donnent au corps transparent sa couleur passent sans perte. Par exemple, les ondes bleues traversent sans empêchement aucun la solution de sulfate de cuivre, tandis que les ondes rouges sont éteintes. Donc, pour ce qui concerne les ondes lumineuses, les corps exercent comme un pouvoir d'élection, séparant certaines ondes pour les détruire, et laissant passer les autres. La transparence pour une onde n'implique pas du tout la transparence pour les autres ondes, et nous pouvons raisonnablement conclure de ce fait que la transparence pour la lumière n'implique pas la transparence pour la chaleur rayonnante, comme le confirme l'expérience (441). » (Tyndall, *Chaleur*.)

dans lesquels se propage la lumière. Un milieu est dit *homogène* lorsqu'en toutes ses parties sa composition et sa densité sont les mêmes.

Dans tout milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite. En effet, si l'on interpose un corps opaque sur la ligne droite qui joint l'œil à un corps lumineux, la lumière est interceptée. On peut remarquer encore que la lumière qui pénètre dans une chambre noire par une petite ouverture trace dans l'air un trait lumineux rectiligne, qui devient visible en éclairant les poussières légères en suspension dans l'atmosphère.

Toutefois la lumière change de direction lorsqu'elle rencontre un obstacle qu'elle ne peut pénétrer, ou lorsqu'elle passe d'un milieu dans un autre; ces phénomènes seront décrits bientôt sous les noms de *réflexion* ou de *réfraction* (490 et 515).

On nomme *rayon lumineux* la direction suivant laquelle les ondulations de l'éther transmettent la lumière. Un ensemble de rayons, parallèles, divergents ou convergents, prend le nom de *faisceau*, et un faisceau très-délié celui de *pinceau*.

482. **Ombre, pénombre, reflet.** — L'*ombre* d'un corps est le lieu

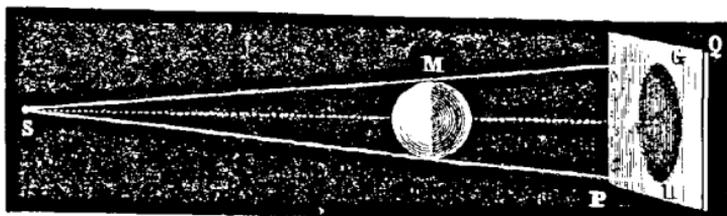


Fig. 367.

de l'espace où il empêche la lumière de pénétrer. Pour déterminer l'étendue et la forme de l'ombre projetée par un corps, on distingue deux cas : celui où la source lumineuse est un point unique, et celui où elle est un corps d'une étendue quelconque.

Dans le premier cas, soient S (fig. 367) le point lumineux, et M le corps qui porte ombre et que nous supposons sphérique. Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie SG se meuve autour de la sphère M, en lui restant tangente et en passant constamment par le point S, cette droite engendre une surface conique qui, au delà de la sphère, sépare la portion de l'espace qui est dans l'ombre de celle qui est éclairée. Dans le cas que nous considérons, si l'on place au delà du corps opaque un écran PQ, le passage de l'ombre à la lumière sur cet écran a lieu brusquement; mais ce n'est pas ce qui a lieu dans les cas ordinaires, où le corps lumineux a toujours une certaine étendue.

Supposons, en effet, que le corps éclairant et le corps éclairé soient deux sphères SL et MN (fig. 368). Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie AG se meuve tangentiellement à ces sphères, en coupant constamment la ligne des centres au point A, elle engendre une surface conique qui a pour sommet ce point, et qui limite, derrière la sphère MN, un espace MGHN complètement privé de lumière. Si actuellement une seconde droite LD, coupant la ligne des centres en B, tourne encore tangentiellement aux deux sphères de manière à engendrer une nouvelle surface conique DBC, qui a son sommet en B, toute la partie extérieure à cette surface reste complètement dans la lumière. En effet, si l'on place un écran PQ au delà du corps opaque, tout point o de cet écran, en dehors de la surface DBC, peut être joint par une droite à tous les points

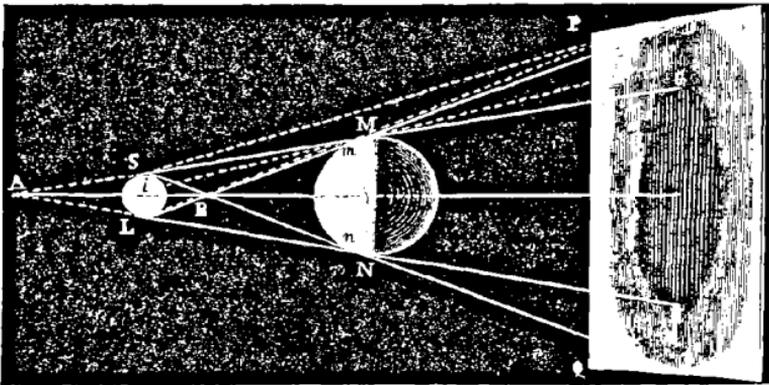


Fig. 368.

de SL sans interposition du corps opaque; mais tout point o' , compris entre les deux surfaces coniques, ne peut recevoir de lumière que des points de SL situés au-dessus de $o'i$; donc le point o' est moins éclairé que le point o . Enfin, un point quelconque de la partie centrale GaHb, ne pouvant recevoir de lumière d'aucune partie du corps SL, est complètement dans l'ombre. La portion annulaire DhCgGbHa, plus éclairée que la partie centrale et moins éclairée que le reste de l'écran, se désigne sous le nom de *pénombre*; son éclat croît de G vers D.

Si l'on trace sur la sphère opaque deux cercles MN et mn , qui passent par les points de contact des tangentes AG et BD, on a une zone $mnMN$ à laquelle aussi correspond une pénombre.

Les ombres telles qu'on vient de les construire sont les *ombres géométriques*; les *ombres physiques*, c'est-à-dire celles qu'on observe réellement, ne sont pas aussi bien limitées. On remarque, en

effet, qu'une certaine quantité de lumière passe dans l'ombre, et que, réciproquement, de l'ombre se trouve dans la partie éclairée. Ce phénomène sera décrit plus tard sous le nom de *diffraction* (627).

Lorsqu'un corps opaque intercepte la lumière par une de ses faces, la face opposée n'est jamais complètement obscure; elle est toujours plus ou moins éclairée par la lumière que réfléchissent les corps voisins. C'est l'effet de cette réverbération qu'on nomme *reflet*. Or, la lumière réfléchie par un corps coloré participant de la couleur propre de ce corps, les reflets prennent eux-mêmes la teinte des objets environnants. Les peintres dans leurs tableaux, les décorateurs dans le choix des draperies, les femmes dans celui de leurs parures, utilisent avec art les effets de lumière que produisent les reflets.

483. **Images à travers les petites ouvertures.** — Lorsqu'on reçoit sur un écran les rayons lumineux qui pénètrent *par une petite*

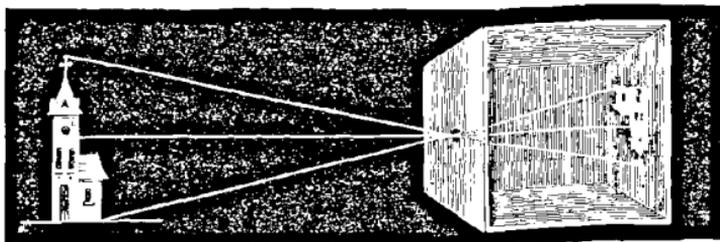


Fig. 369.

ouverture dans une chambre noire, on obtient, des objets extérieurs, des images qui présentent les phénomènes suivants : 1^o elles sont renversées; 2^o leur forme est indépendante de la forme de l'ouverture.

Le renversement des images résulte de ce que les rayons qui proviennent des objets extérieurs et pénètrent dans la chambre noire, se croisent en passant dans l'ouverture, comme le montre la figure 369. Continuant à se propager en ligne droite, les rayons partis des points les plus élevés rencontrent l'écran aux points les plus bas, et, réciproquement, ceux qui viennent des points inférieurs rencontrent l'écran aux points les plus hauts. De là le renversement de l'image. A l'article *Chambre obscure* (585), on verra comment on augmente l'éclat et la netteté des images au moyen de verres convergents, et par quel procédé on les redresse.

Pour montrer comment la forme de l'image est indépendante de celle de l'ouverture, lorsque celle-ci est suffisamment petite et que l'écran est assez éloigné, soit une ouverture triangulaire O (fig. 370),

pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et soit un écran *ab* sur lequel on reçoit l'image d'une flamme *AB* placée à l'extérieur. De chaque point de la flamme pénètre un faisceau divergent qui vient former sur l'écran une image triangulaire semblable à l'ouverture, comme le montre le dessin. Or c'est la réunion de toutes ces images partielles qui produit une image totale de même forme que l'objet éclairant. En effet, si l'on conçoit qu'une droite indéfinie se meuve dans l'ouverture du volet, supposée très-petite,

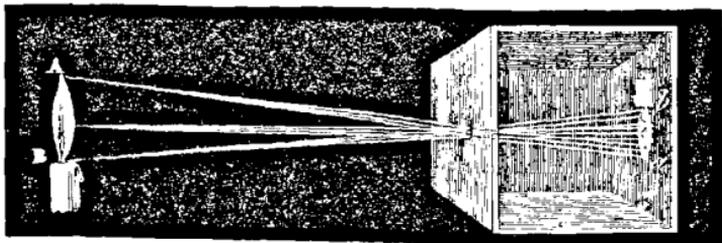


Fig. 370.

avec la condition que cette droite reste toujours tangente à l'objet lumineux *AB*, elle décrit, dans son mouvement, deux surfaces coniques ayant pour sommet commun l'ouverture même de la chambre noire, et pour base, l'une le corps lumineux, l'autre la partie éclairée de l'écran, c'est-à-dire l'image. Si l'écran est perpendiculaire à la droite qui joint le centre de l'ouverture au centre du corps lumineux, l'image est semblable à ce corps; si l'écran est oblique, l'image est allongée dans le sens de l'obliquité. C'est ce qu'on observe dans l'ombre portée par le feuillage des arbres : les faisceaux lumineux qui passent à travers les feuilles donnent des images du soleil qui sont rondes ou elliptiques, suivant que la surface sur laquelle elles se projettent est perpendiculaire ou oblique aux rayons solaires, et cela, quelle que soit, entre les feuilles, la forme des intervalles à travers lesquels passe la lumière.

484. Vitesse de la lumière. — La lumière se propage avec une vitesse telle, qu'on ne peut, à la surface de la terre, constater aucun intervalle appréciable, quelle que soit la distance, entre l'instant où un phénomène lumineux se produit et celui où l'œil le perçoit : aussi est-ce au moyen d'observations astronomiques que cette vitesse a d'abord été déterminée. C'est Remer, astronome danois, qui, le premier, en 1675, déduisit la vitesse de la lumière de l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter.

On sait que Jupiter est une planète autour de laquelle tournent quatre satellites, de même que la lune tourne autour de la terre.

Son premier satellite (le plus rapproché de la planète) fait ses immersions, c'est-à-dire entre dans l'ombre projetée par Jupiter, à des intervalles de temps égaux, qui sont de $42^{\text{h}} 28^{\text{m}} 36^{\text{s}}$. Il y a donc périodiquement éclipse du satellite à chacun de ces intervalles. Avant Rømer, Dominique Cassini avait construit des tables qui devaient servir à prédire les éclipses des satellites de Jupiter.

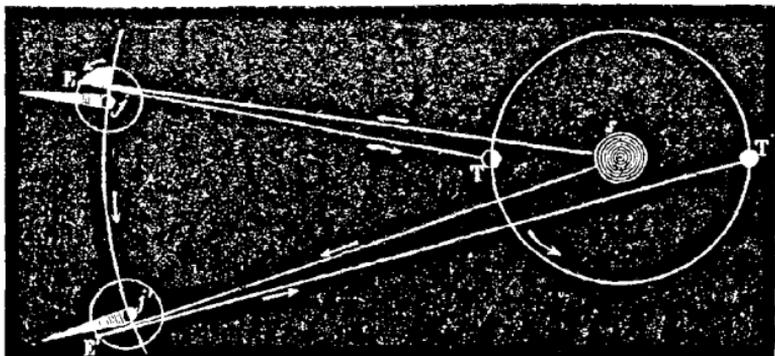


Fig. 371.

En faisant usage de ces tables, Rømer observa que leurs indications étaient, tantôt en avance, tantôt en retard sur ces éclipses. Quand Jupiter était en opposition, c'est-à-dire lorsque la terre était entre cette planète et le soleil, il y avait avance; et au contraire, au moment des conjonctions, c'est-à-dire quand le soleil était entre la terre et Jupiter, il y avait retard. C'est cette observation qui conduisit Rømer à la découverte de la vitesse de la lumière.

En effet, à l'opposition et dans les positions voisines, le soleil étant en s (fig. 371), la terre en T , et Jupiter en j , la distance de la terre à Jupiter, et, par suite, à son satellite E , est sensiblement $sj - Ts$, c'est-à-dire la différence entre la distance du soleil à Jupiter et celle de la terre au soleil; tandis qu'aux conjonctions, par exemple quand la terre est en T' et Jupiter en j' , la distance de la terre à Jupiter est sensiblement $sj' + T's$. La distance $T'j'$ surpassant Tj de deux fois la distance de la terre au soleil, la lumière solaire réfléchiée par le satellite E vers la terre a à parcourir dans le second cas un chemin plus grand que dans le premier de deux fois sT ; de là la cause du retard observé par Rømer.

Pour évaluer ce retard, concevons qu'on observe une éclipse du satellite E , c'est-à-dire l'instant de son immersion dans le cône d'ombre projetée par Jupiter, lorsque cette planète est en j et la terre en T ; puis une seconde éclipse quand ces deux astres sont en j' et en T' , c'est-à-dire lorsque la distance de la terre à Jupiter est

augmentée de tout le diamètre de l'orbite terrestre. Or, au lieu de trouver que le temps écoulé entre ces deux observations soit un multiple de $42^h 28^m 36^s$ par le nombre d'éclipses qui s'est produit pendant le passage de la terre de T en T', on trouve un intervalle plus grand de 16 minutes 26 secondes. C'est donc pour parcourir la distance TT', c'est-à-dire deux fois celle de la terre au soleil, qu'il a fallu à la lumière 16 minutes 26 secondes. D'où l'on conclut que, pour parcourir la distance de la terre au soleil, la lumière emploie 8 minutes 13 secondes; ce qui, d'après cette distance, représente une vitesse, par seconde, de 308 000 kilomètres.

Cette vitesse est celle trouvée par Struve par l'observation de l'aberration des étoiles fixes; la vitesse trouvée par Rømer était un peu plus grande.

Les étoiles les plus rapprochées de la terre sont au moins 206 265 fois plus éloignées que le soleil. La lumière qu'elles nous envoient met donc plus de trois années et un quart pour arriver jusqu'à nous. Quant aux étoiles qui ne sont visibles qu'à l'aide du télescope, elles sont à une distance telle de la terre, qu'il faut des milliers d'années pour que leur lumière nous arrive. Ces astres seraient donc éteints depuis des siècles, que nous continuerions à les contempler et à étudier leur mouvement.

* 485. **Expérience de Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière.** — Malgré l'extrême vitesse de la lumière, Foucault est parvenu à la déterminer expérimentalement à l'aide d'un appareil fondé sur l'emploi du miroir tournant, déjà adopté par Wheatstone pour mesurer la vitesse de l'électricité.

Avant de décrire cet appareil, il importe d'observer que ce qui suit suppose connues les propriétés des miroirs et des lentilles, données plus loin aux paragraphes 500 et 533. La figure 372 représente, en plan horizontal, les principales dispositions de l'appareil de Foucault. Le volet K d'une chambre obscure est percé d'une ouverture carrée, derrière laquelle est tendu verticalement un fil de platine *o*. Un faisceau de lumière solaire, réfléchi extérieurement sur un miroir, pénètre dans la chambre obscure par l'ouverture carrée, rencontre le fil de platine, et de là se dirige sur une lentille achromatique L, à long foyer, placée à une distance du fil de platine moindre que le double de la distance focale principale. L'image du fil de platine tend alors à aller se former sur l'axe de la lentille, avec des dimensions plus ou moins amplifiées. Mais le faisceau lumineux, après avoir traversé la lentille, rencontre un miroir plan *m*, tournant avec une grande vitesse, sur lequel il se réfléchit et va former, dans l'espace, une image du fil de platine, qui se déplace avec une vitesse angulaire double de celle du miroir *l*. Cette image est réfléchie par un miroir M concave et fixe, dont le centre de courbure coïncide avec l'axe de rotation du miroir tournant *m* et avec son centre de figure. Le faisceau réfléchi sur le miroir M revient sur lui-même, se réfléchit de nouveau sur le

1. Pour le démontrer, soient *mn* (fig. 373) le miroir tournant, O un objet fixe placé au-devant et formant son image en O'. Quand le miroir arrive dans la position *m'n'*, l'image se fait en O''. Or les deux angles O'OO'' et *mcm'* sont égaux, comme ayant les côtés perpendiculaires chacun à chacun; mais l'angle inscrit O'OO'' n'a pour mesure que la moitié de l'arc O'O'', tandis que l'angle au centre *mcm'* a pour mesure l'arc *mm'* tout entier. Donc l'arc O'O'' est double de *mm'*, ce qui démontre que la vitesse angulaire de l'image est double de celle du miroir.

miroir m , traverse une seconde fois la lentille, et vient former une image du fil de platine qui paraît sur ce fil même tant que le miroir m tourne lentement.

Pour voir cette image sans masquer le faisceau qui entre par l'ouverture o , on place une glace de verre V , à faces parallèles, entre la lentille et le fil de platine, et on l'incline de manière que les rayons réfléchis viennent tomber sur un pulsant oculaire P .

Cela posé, si le miroir m est au repos, ou s'il tourne avec une petite vitesse,

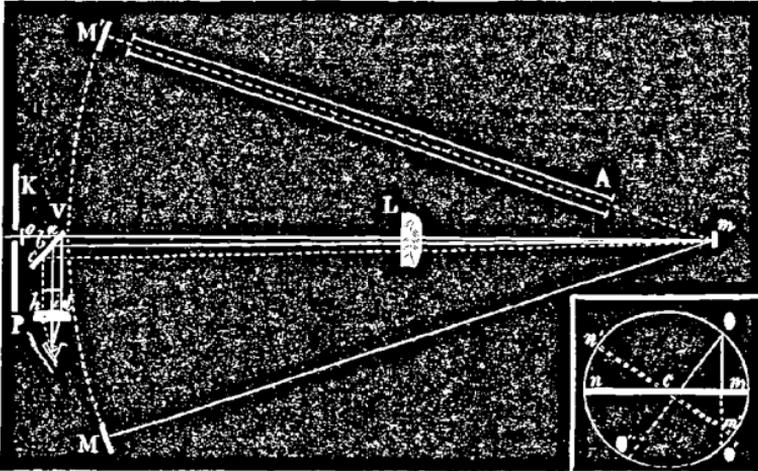


Fig. 372.

Fig. 373.

le rayon de retour Mm rencontre le miroir m dans la même position où il était lors de la première réflexion; il reprend donc la même direction qu'il a déjà suivie, rencontre en a la glace V , s'y réfléchit partiellement, et vient former en d , à une distance ad , égale à ao , l'image que regarde l'œil avec l'oculaire P . En tournant, le miroir m fait reparaître cette image à chaque révolution, et si sa vitesse de rotation est uniforme, l'image reste immobile dans l'espace. Pour des vitesses qui ne dépassent pas 30 tours par seconde, les apparitions successives sont distinctes; mais, au delà de 30 tours, il y a persistance des impressions dans l'œil, et l'image apparaît absolument calme.

Enfin, si le miroir m tourne suffisamment vite, il a changé sensiblement de position dans le temps que la lumière met à faire le double parcours de m en M et de M en m ; le rayon de retour, après sa réflexion sur le miroir m , prend alors la direction mb et vient former son image en i ; c'est-à-dire que l'image a éprouvé une déviation totale di . Rigoureusement parlant, il y a déviation aussitôt que le miroir tourne, même lentement; mais elle n'est appréciable que lorsqu'elle acquiert une certaine grandeur, ce qui exige une vitesse de rotation assez rapide ou une distance Mm suffisamment grande; car la déviation croît nécessairement comme le temps que la lumière met à revenir sur elle-même.

Dans l'expérience de Foucault, la distance Mm était seulement de 4 mètres, et en donnant alors au miroir m une vitesse de 600 à 800 tours par seconde, on obtient des déviations de 2 à 3 dixièmes de millimètre.

En posant $Mm = l$, $Lm = l'$, $oL = r$, et en représentant par n le nombre de tours par seconde, par δ la déviation absolue di , et par v la vitesse de la lumière,

Foucault est arrivé à la formule $V = \frac{8\pi l^2 nr}{\delta(l+l')}$, et a trouvé que la vitesse de la lumière est de 298 000 kilomètres.

L'appareil de Foucault permet d'expérimenter sur les liquides. Pour cela, un tube A, long de 3 mètres et plein d'eau distillée, est interposé entre le miroir tournant *m* et un miroir concave *M'* identique avec le miroir *M*. Les rayons lumineux, réfléchis dans la direction *mm'* par le miroir tournant, traversent deux fois la colonne d'eau A, avant de revenir sur le miroir *V*. Or le rayon de retour vient alors se réfléchir en *c* et faire son image en *h*; la déviation est donc plus grande pour les rayons qui ont traversé l'eau que pour ceux qui se sont propagés dans l'air seul, ce qui indique que la vitesse de la lumière est moindre dans l'eau que dans l'air.

Cette conséquence est la partie importante de l'expérience de Foucault. En effet, la théorie ayant fait connaître que, dans le système des ondulations, c'est dans le milieu le plus réfringent que la vitesse de la lumière est moindre, tandis que c'est le contraire qui aurait lieu dans le système de l'émission, le résultat obtenu par Foucault montre que c'est le système des ondulations qui doit être exclusivement adopté; car on verra (529) que l'eau est plus réfringente que l'air.

Quant au mécanisme dont s'est servi Foucault pour imprimer une grande vitesse au miroir tournant, il consiste en une petite turbine à vapeur ayant quelque rapport avec la sirène, et rendant, comme elle, un son d'autant plus élevé, que la rotation est plus rapide; c'est même d'après la hauteur du son que rend l'appareil qu'on apprécie sa vitesse de rotation.

* 486. **Expérience de Fizeau.** — M. Fizeau, en 1849, a mesuré directement la vitesse de la lumière, en cherchant le temps qu'il lui fallait pour se propager de Suresnes à Montmartre, puis pour revenir de Montmartre à Suresnes. L'appareil employé par ce savant consistait en une roue dentée, tournant avec plus ou moins de vitesse, et dont l'intervalle entre les dents était rigoureusement égal à leur épaisseur. Cette roue et le mécanisme qui la faisait marcher étant à Suresnes, un faisceau de lumière parallèle passait entre deux dents, et allait se réfléchir sur un miroir placé à Montmartre. Là, le faisceau dirigé par un système de tubes et de lentilles revenait vers la roue. Tant que celle-ci était au repos, le faisceau repassait exactement entre les mêmes dents qu'à son départ; mais la roue tournant suffisamment vite, une dent prenait la place d'un intervalle, et le faisceau, que l'observateur recevait à travers un oculaire, était intercepté. En tournant plus vite, il reparaisait quand l'intervalle entre les deux dents suivantes avait pris la place du premier au moment du retour du faisceau.

D'après la dimension de la roue, sa vitesse de rotation, sa distance au miroir réfléchissant, distance qui était de 8 633 mètres, M. Fizeau a trouvé que la vitesse de la lumière est de 312 000 kilomètres, nombre plus grand que celui fourni par l'observation des phénomènes astronomiques.

M. Cornu, dans une première expérience faite par la méthode de la roue dentée de M. Fizeau, avait trouvé 298 400 kilomètres. Les deux stations, distantes de 10 310 mètres, étaient l'une un pavillon de l'École polytechnique, l'autre une des casernes du Mont-Valérien.

Dans des recherches faites en 1874, le même savant a obtenu, en prenant la moyenne de quinze expériences, le nombre 300 400 kilomètres pour vitesse de la lumière.

Les stations étaient la terrasse de l'Observatoire et le sommet de la tour de Montlhéry; la vitesse de la roue dentée dépassait 1 600 tours par seconde, et un chronographe et un enregistreur électriques construits par M. Bréguet donnaient la mesure du temps en millèmes de seconde.

487. **Lois de l'intensité de la lumière.** — En prenant pour *intensité* d'une lumière la quantité reçue sur l'unité de surface d'un

corps éclairé, cette intensité est soumise aux deux lois suivantes :

1^o *L'intensité de la lumière reçue normalement sur une surface donnée est en raison inverse du carré de la distance à la source lumineuse.*

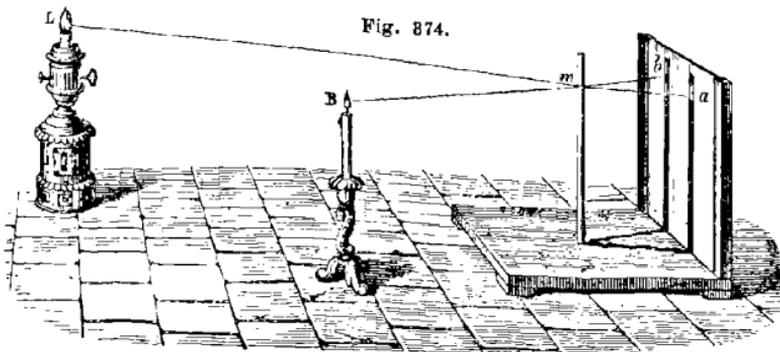
2^o *L'intensité de la lumière reçue obliquement est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons lumineux avec la normale à la surface éclairée.*

Ces deux lois se démontrent identiquement par le même raisonnement que les 1^{re} et 3^e lois correspondantes pour la chaleur (420), en substituant une source de lumière à la source de chaleur (fig. 332 et 337). De plus, la loi du cosinus s'applique aussi aux rayons émis obliquement par une surface lumineuse, dont les rayons sont d'autant moins intenses, qu'ils sont plus inclinés sur la surface qui les émet (2^e loi de la chaleur).

C'est la divergence des rayons lumineux émis d'une même source qui fait que l'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance. Pour des rayons lumineux parallèles, l'intensité reste constante, dans le vide du moins; car, dans l'air et dans les autres milieux transparents, l'intensité de la lumière décroît par un effet d'absorption (561), mais beaucoup plus lentement que le carré de la distance n'augmente.

On va voir ci-après (489) comment la première loi de l'intensité de la lumière se vérifie au moyen du photomètre.

488. **Photomètres.** — On nomme *photomètres* des appareils



propres à comparer les intensités relatives de deux lumières. On en a imaginé un grand nombre; mais tous laissent à désirer sous le rapport de la précision.

Nous ne décrivons que le photomètre de Rumford; il se compose d'un écran de verre dépoli devant lequel est fixée une tige opaque *m* (fig. 374). A une certaine distance sont placées les lu-

mières qu'on veut comparer, par exemple une lampe et une bougie, de manière que chacune projette sur l'écran une ombre de la tige. Les ombres ainsi projetées sont d'abord d'inégale intensité; mais, en reculant la lampe, ou en l'approchant peu à peu, on obtient une position où l'intensité des deux ombres a et b est la même, ce qui indique que l'écran est également éclairé par les deux lumières. Alors les intensités de ces deux lumières sont directement proportionnelles aux carrés de leurs distances aux ombres projetées; c'est-à-dire que si la lampe est, par exemple, 3 fois plus éloignée que la bougie, cela indique qu'elle éclaire 9 fois plus.

En effet, soient i et i' les intensités de la lampe et de la bougie à l'unité de distance, et d et d' leurs distances respectives aux ombres projetées. D'après la première loi de l'intensité de la lumière (487), l'intensité de la lampe à la distance d est $\frac{i}{d^2}$, et celle de la bougie $\frac{i'}{d'^2}$ à la distance d' . Or, sur l'écran, ces deux intensités sont égales; on a donc l'égalité $\frac{i}{d^2} = \frac{i'}{d'^2}$, d'où $\frac{i}{i'} = \frac{d^2}{d'^2}$; ce qu'il fallait démontrer.

489. **Vérification de la première loi de l'intensité.** — On vérifie, avec le photomètre de Rumford, que l'intensité de la lumière est

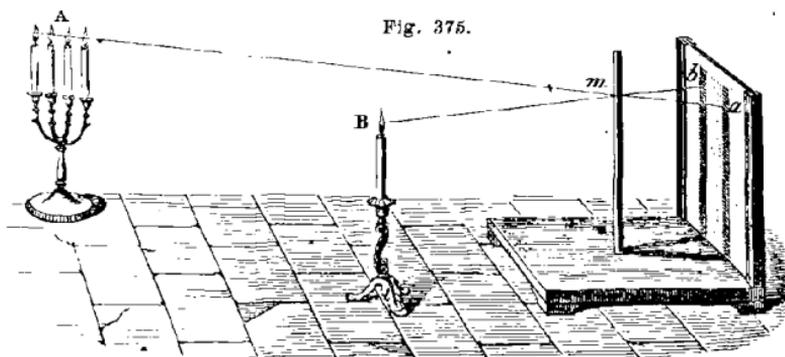


Fig. 375.

en raison inverse du carré de la distance, en disposant l'expérience comme le montre la figure 375. Ayant placé une bougie à une certaine distance Bb de l'écran du photomètre, on dispose quatre bougies, identiques avec la première, en ligne droite avec la tige m , puis on les écarte jusqu'à ce que les deux ombres a et b portées sur l'écran apparaissent de même teinte. Or, si l'on mesure alors la distance moyenne Aa des quatre bougies à l'écran, on trouve qu'elle est double de Bb . Ce qui vérifie la loi, puisque quatre bougies, à une distance de 2 mètres par exemple, éclairent

comme une seule à une distance de 1 mètre. On vérifie de même que neuf bougies à une distance de 3 mètres éclairent encore comme une seule à la distance de 1 mètre.

CHAPITRE II

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE, MIROIRS

490. **Lois de la réflexion de la lumière.** — Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une surface polie, il se réfléchit suivant les deux lois ci-après, qui sont les mêmes que pour la chaleur :

1^o *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

2^o *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

Les mots *rayon incident*, *rayon réfléchi*, *angle d'incidence*, *angle de réflexion*, étant pris ici dans le même sens qu'au paragraphe 424, nous n'avons pas à les définir de nouveau.

1^{re} *Démonstration.* —

Les deux lois ci-dessus se démontrent expérimentalement au moyen de l'appareil représenté dans la figure 376. Il consiste en un cercle de cuivre gradué, disposé verticalement sur trois pieds à vis calantes. En A est le zéro de la graduation, qui est tracée à droite et à gauche jusqu'à 90 degrés. Deux alidades de cuivre I et K tournent librement sur un tourillon central derrière le cercle. Elles portent deux petits tubes *i* et *c* dirigés rigoureusement vers le centre, et destinés à livrer passage respectivement aux rayons incident et réfléchi. Sur l'alidade I est en outre monté un miroir M qu'on incline à volonté.

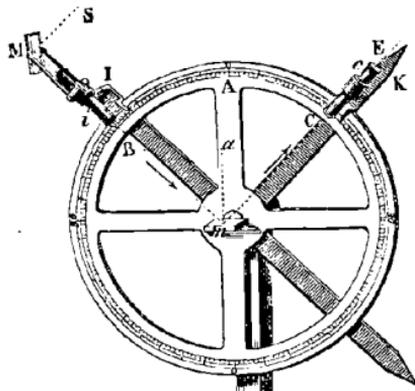


Fig. 376.

Ces détails connus, ayant écarté plus ou moins l'alidade I du zéro de la graduation, on incline le miroir M de manière qu'un rayon lumineux S, après s'être réfléchi sur ce miroir, aille passer dans le tube i , et tomber sur un second miroir m disposé horizontalement au centre et en avant du cercle; là, le rayon se réfléchit une seconde fois pour prendre la direction mE . Posant alors la main sur l'alidade K, on l'écarte ou on l'approche du point A jusqu'à ce que, plaçant l'œil en E, on reçoive à travers le tube c le rayon réfléchi mE . Or, si on lit actuellement sur le cercle gradué les nombres de degrés que contiennent les arcs AB et AC, on trouve qu'ils sont égaux. Donc il en est de même des angles d'incidence et de réflexion Bma et amC mesurés par ces arcs; ce qui vérifie la première loi.

La deuxième loi se trouve également vérifiée; en effet, dans l'appareil, les axes des tubes i et c sont dirigés dans un même plan parallèle à celui du cercle gradué, et, par suite, perpendiculaire à la surface du petit miroir m .

2^e *Démonstration.* — On peut encore démontrer les lois de la réflexion de la lumière par l'expérience suivante, qui offre plus de

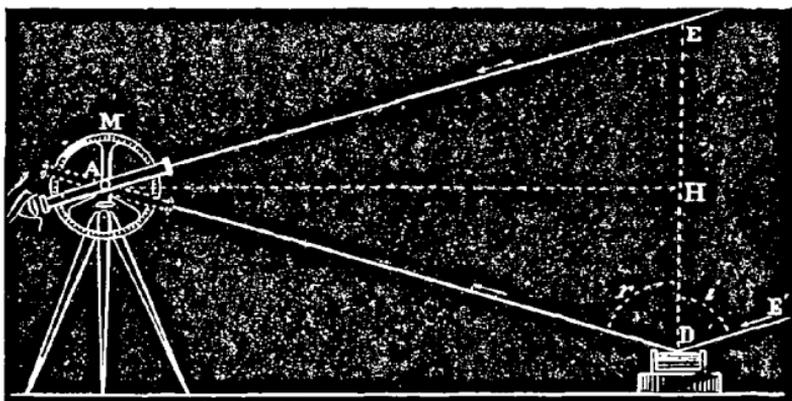


Fig. 377.

précision que la précédente. On dispose verticalement un cercle gradué M (fig. 377), au centre duquel est une lunette mobile dans un plan parallèle au limbe; et on place, à une distance convenable, un petit vase plein de mercure, destiné à présenter un miroir plan parfaitement horizontal. Cela fait, on regarde avec la lunette, suivant une direction AE, une étoile remarquable, de première ou de deuxième grandeur; puis on incline la lunette de manière à recevoir un rayon AD, venant de la même étoile, après

qu'il s'est réfléchi en D sur la surface brillante du mercure. Or on trouve ainsi que les deux angles formés par les rayons EA et DA, avec l'horizontale AH, sont égaux; d'où il est facile de conclure que l'angle d'incidence E'DE est égal à l'angle de réflexion EDA. En effet, DE étant la normale à la surface du mercure, cette droite est perpendiculaire à AH, le triangle AED est isocèle, et les angles ADE et AED sont égaux; mais les deux rayons lumineux AE et DE' étant parallèles à cause de la grande distance de l'étoile, les angles AED et EDE' sont égaux comme alternes-internes; donc $EDE' = EDA$, ce qu'on voulait démontrer.

491. **Réflexion irrégulière.** — La réflexion sur les corps polis, suivant les deux lois ci-dessus (490), se désigne sous le nom de *réflexion régulière, ou réflexion spéculaire*; mais la quantité de lumière ainsi réfléchie est loin de représenter toute la lumière incidente. Celle-ci, lorsque le corps réfléchissant est opaque, se partage en deux parties: l'une qui est réfléchie régulièrement, l'autre *irrégulièrement, c'est-à-dire dans toutes les directions* (426).

La lumière réfléchie irrégulièrement se désigne sous le nom de *lumière diffuse*; c'est elle qui nous fait voir les corps. En effet, la lumière réfléchie régulièrement ne donne pas l'image du corps qui la réfléchit, mais bien celle du corps qui l'émet. Par exemple, si l'on reçoit dans une chambre obscure un faisceau de lumière solaire sur un miroir bien poli, plus celui-ci réfléchit régulièrement la lumière, moins il est visible des diverses parties de l'enceinte. L'œil qui reçoit alors le faisceau réfléchi ne voit pas le miroir, mais seulement l'image du soleil. Qu'on affaiblisse le pouvoir réflecteur du miroir en projetant dessus une poussière légère, la lumière diffuse augmente, l'image solaire s'affaiblit, et le miroir devient visible de toutes les parties de l'enceinte.

492. **Intensité de la lumière réfléchie.** — Pour un même corps, l'intensité de la lumière réfléchie régulièrement augmente avec le degré de poli et avec l'angle que les rayons incidents font avec la normale à la surface réfléchissante. Par exemple, si l'on regarde très-obliquement une feuille de papier blanc placée devant une bougie, on aperçoit, par réflexion, une image de la flamme, ce qui n'a pas lieu pour des rayons moins obliques.

Pour des corps de nature différente, polis avec le même soin, l'angle d'incidence étant le même, l'intensité varie avec la substance; elle varie encore avec le milieu dans lequel est plongé le corps réfléchissant. Par exemple, le verre poli, plongé dans l'eau, perd une grande partie de son pouvoir réfléchissant.

RÉFLEXION PAR LES SURFACES PLANES

493. **Miroirs.** — On nomme *miroir* tout corps dont la surface parfaitement polie réfléchit régulièrement la lumière en reproduisant l'image des objets qu'on lui présente. Suivant leur forme, on divise les miroirs en *miroirs plans, concaves, convexes, sphériques, paraboliques, coniques, etc.*

494. **Formation des images dans les miroirs plans.** — La détermination de la position et de la grandeur des images se réduisant à la recherche des images d'une suite de points, soit d'abord un

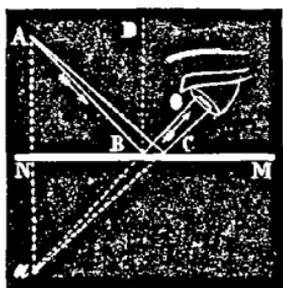


Fig. 378.

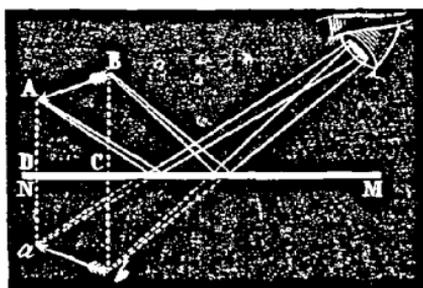


Fig. 379.

point unique A, lumineux ou éclairé, placé devant un miroir plan MN (fig. 378). Tout rayon AB, parti de ce point et rencontrant le miroir, se réfléchit suivant la direction BO, en faisant l'angle de réflexion DBO égal à l'angle d'incidence ABD. Si l'on abaisse du point A une perpendiculaire AN sur le miroir, et si, au-dessous de celui-ci, on prolonge le rayon OB jusqu'à ce qu'il rencontre cette perpendiculaire en un point *a*, on forme deux triangles ABN et BNa, qui sont égaux, comme ayant un côté commun BN compris entre deux angles égaux, savoir : les angles ANB et BNa, qui sont droits, et les angles ABN et NBa, qui sont égaux entre eux comme l'étant tous deux à l'angle OBM. De l'égalité de ces triangles, il résulte que *a*N est égal à AN ; c'est-à-dire qu'un rayon quelconque AB prend, après la réflexion, une direction telle, que son prolongement au-dessous du miroir vient couper la perpendiculaire Aa en un point *a* situé précisément à la même distance du miroir que le point A lui-même. Cette propriété, n'étant pas particulière au rayon AB, s'applique à tout autre rayon AC parti du point A. On tire de là cette conséquence importante, que tous les rayons émis par le point A, et réfléchis sur le miroir, *suivent, après la réflexion, la même direction que s'ils étaient tous partis du*

point *a*. Or l'œil voyant toujours les objets dans la direction des rayons lumineux qu'il perçoit, l'image du point *A* lui apparaît en *a*, comme si ce point y était réellement. Donc, dans les miroirs plans, l'image d'un point se fait derrière le miroir, à une distance égale à celle du point donné, et sur la perpendiculaire abaissée de ce point sur le miroir.

Il est évident qu'on obtiendra l'image d'un objet quelconque en construisant, d'après la règle ci-dessus, l'image de chacun de ses points, ou du moins de ceux qui suffisent pour en déterminer la position et la forme. La figure 379 montre comment se produit, d'après ce principe, l'image *ab* d'un objet quelconque *AB*.

De cette construction on déduit que, dans les miroirs plans, l'image est de même grandeur que l'objet; car, si l'on rabat le trapèze *ABCD* sur le trapèze *CDab*, on voit facilement qu'ils coïncident et que l'objet *AB* se confond avec son image.

Il découle encore de la construction ci-dessus que, dans les miroirs plans, l'image est *symétrique* de l'objet, et non *renversée*, en attachant au mot *symétrique* le même sens qu'en géométrie, où deux points sont *symétriques* par rapport à un plan lorsqu'ils sont situés sur une même perpendiculaire à ce plan et à une distance égale, l'un d'un côté du plan, l'autre de l'autre côté : conditions auxquelles satisfont successivement tous les points de l'objet *AB* et de son image *ab* dans la figure 379.

495. Images virtuelles et images réelles. — Il y a à distinguer deux cas relativement à la direction des rayons réfléchis par les miroirs, selon que ces rayons sont divergents ou convergents. Dans le premier cas, les rayons réfléchis ne se rencontrent pas; mais si on les conçoit prolongés de l'autre côté du miroir, leurs prolongements concourent en un même point (fig. 378 et 379). L'œil, impressionné alors comme si les rayons étaient partis de ce point, y voit une image. Or celle-ci n'existe pas réellement, puisque les rayons lumineux ne passent pas de l'autre côté du miroir; elle n'est qu'une illusion de l'œil; c'est pourquoi on lui donne le nom d'*image virtuelle*, c'est-à-dire qui tend à se produire, mais qui en réalité ne se produit pas. Telles sont toujours les images données par les miroirs plans.

Dans le second cas, où les rayons réfléchis sont convergents, comme on en verra bientôt un exemple dans les miroirs concaves, ces rayons vont concourir vers un point situé en avant du miroir et du même côté que l'objet. Là ils forment une image à laquelle on donne le nom d'*image réelle*, pour exprimer qu'elle existe réellement; car elle peut être reçue sur un écran et agir chimiquement sur certaines substances. En résumé, on peut donc dire

que les images réelles sont celles qui sont formées par les rayons réfléchis eux-mêmes, et les images virtuelles celles qui sont données par leurs prolongements.

496. **Images multiples dans les miroirs de verre.** — Les miroirs métalliques, qui n'ont qu'une seule surface réfléchissante, ne produisent qu'une seule image; mais il n'en est plus ainsi des miroirs de verre. Ceux-ci donnent naissance à plusieurs images, qu'on observe facilement lorsqu'on regarde obliquement dans une glace l'image d'une bougie. On voit une première image peu intense, puis une deuxième très-apparente, et derrière celle-ci plusieurs autres dont l'intensité décroît successivement.

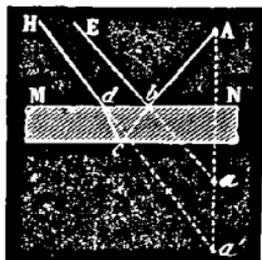


Fig. 380.

Ce phénomène s'explique par les deux surfaces réfléchissantes que présentent les miroirs de verre. Lorsque les rayons partis du point A (fig. 380) rencontrent la première surface, une partie est réfléchié et donne du point A une première image a , formée par le prolongement des rayons bE réfléchis par cette surface; l'autre partie pénètre dans le verre, se réfléchit en c sur la couche de tain qui recouvre la face postérieure du miroir, et revient à l'œil suivant le rayon dH , en donnant l'image a' . Celle-ci, distante de la première du double de l'épaisseur du miroir, est plus intense qu'elle, la couche métallique qui recouvre la seconde face du miroir réfléchissant mieux que le verre.

Quant aux autres images qui se produisent, elles résultent de ce fait général, que toutes les fois qu'un faisceau de lumière se présente pour passer d'un milieu dans un autre, par exemple de l'air dans le verre ou du verre dans l'air, jamais tout le faisceau ne passe, mais seulement une partie, l'autre étant réfléchié par la surface qui sépare les deux milieux. Par suite, lorsque le faisceau cd , réfléchi sur la couche de tain, se présente pour sortir du verre en d , une partie se réfléchit intérieurement sur la face MN , et revient vers la couche de tain, qui la renvoie de nouveau vers la face supérieure. Là, une portion sort et donne une troisième image, tandis que l'autre portion, revenant vers la couche de tain, s'y réfléchit, et, sortant en partie du verre par la face MN , donne une quatrième image; et ainsi de suite jusqu'à ce que, la lumière s'affaiblissant graduellement, les images cessent d'être visibles.

497. **Images multiples par deux miroirs plans inclinés.** — Lors-

qu'un objet est placé entre deux miroirs formant entre eux un angle droit ou aigu, il se produit de cet objet des images dont le nombre augmente avec l'inclinaison des miroirs. S'ils sont d'abord perpendiculaires l'un à l'autre, on aperçoit trois images disposées comme le montre la figure 381, O étant le point lumineux. Les rayons OC et OD, partis de ce point, donnent, après une seule réflexion, l'un l'image O', l'autre l'image O''; et le rayon OA, qui a subi deux réflexions, en A et en B, donne la troisième image O'''.

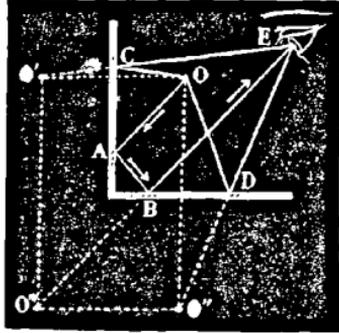


Fig. 381.

Si l'angle des miroirs est de 60 degrés, il se forme cinq images; s'il est de 45 degrés, il s'en produit sept. Le nombre des images continue ainsi à croître à mesure que l'angle diminue, ce qui provient de ce que les rayons lumineux subissent successivement d'un miroir à l'autre un nombre de réflexions croissant.

C'est sur la propriété des miroirs inclinés qu'est fondé le *kaléïdoscope*, appareil formé d'un tube de carton dans lequel sont deux miroirs inclinés de 45 degrés, ou trois miroirs inclinés de 60. Des objets très-irréguliers, comme de la mousse, de la dentelle, étant placés à une extrémité, entre

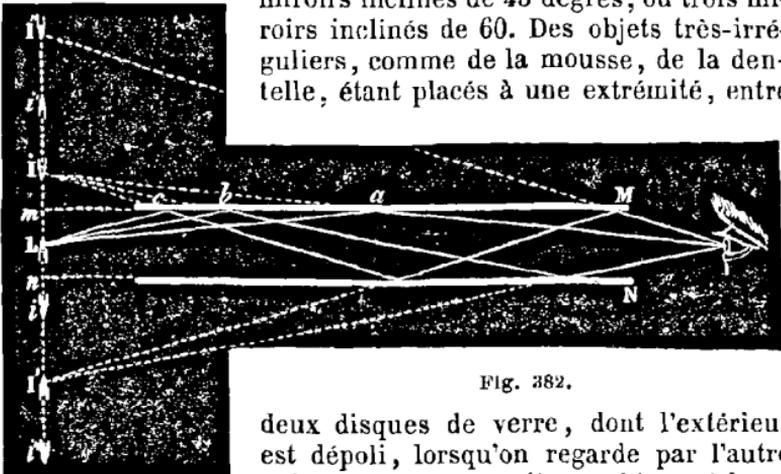


Fig. 382.

deux disques de verre, dont l'extérieur est dépoli, lorsqu'on regarde par l'autre extrémité, on aperçoit ces objets et leurs images symétriquement disposés, ce qui donne un ensemble très-varié et souvent très-agréable.

498. **Images multiples par deux miroirs parallèles.** — Dans le cas de deux miroirs parallèles, le nombre des images des objets

placés entre eux est théoriquement infini. Physiquement, ce nombre est limité, parce que la lumière incidente ne se réfléchissant jamais en totalité, les images perdent de plus en plus de leur éclat et finissent par s'éteindre tout à fait.

La figure 382 montre comment le faisceau La , réfléchi une fois sur le miroir M , donne en I l'image de l'objet L , à une distance $mI = mL$; puis le faisceau Lb , réfléchi une fois sur le miroir M et une fois sur le miroir N , fournit l'image I' à une distance $nI' = nI$; de même le faisceau Lc , après deux réflexions sur M et une sur N , forme l'image I'' à une distance $mI'' = mI'$; et ainsi de suite jusqu'à l'infini. Quant aux images i, i', i'' , elles sont formées de la même manière par les rayons de lumière qui, partis de l'objet L , tombent d'abord sur le miroir N .

RÉFLEXION PAR LES SURFACES COURBES

499. **Miroirs sphériques.** — On a déjà vu (493) qu'on distingue plusieurs sortes de miroirs courbes; les plus fréquemment employés sont les miroirs sphériques et les miroirs paraboliques.

On appelle *miroirs sphériques* ceux dont la courbure est celle d'une sphère. Suivant que la réflexion s'opère sur la face interne ou externe du miroir, il est dit *concave* ou *convexe*. Le centre

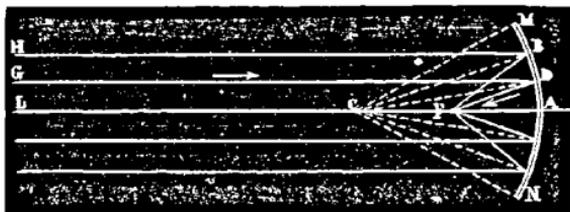


Fig. 383.

C de la sphère creuse dont le miroir fait partie (fig. 383) est le *centre de courbure*, ou le *centre géométrique*; le point A , milieu de l'arc MN , est le *centre de figure*. La droite indéfinie AL , menée par les centres A et C , est l'*axe principal* du miroir; toute droite qui passe par le centre C , sans passer par le point A , est un *axe secondaire*.

On nomme *section principale* d'un miroir toute section qu'on obtient en le coupant par un plan qui passe par l'axe principal. Dans tout ce qui suit sur les miroirs, on ne considérera que des lignes situées dans une même section principale. Enfin, l'*ouverture* d'un miroir est l'angle MCN formé en joignant le centre aux deux extrémités de l'arc MN .

La théorie de la réflexion de la lumière sur les miroirs courbes se déduit très-simplement des lois de la réflexion sur les miroirs plans, en considérant la surface des premiers comme formée d'une infinité de surfaces planes infiniment petites, qui en sont les *éléments*. La *normale* à la surface courbe, en un point donné, est alors la perpendiculaire à l'élément correspondant, ou, ce qui est la même chose, au plan tangent qui le contient. Or on démontre, en géométric, que, dans la sphère, la perpendiculaire au plan tangent menée par le point de contact passe par le centre; d'où la normale à tout miroir sphérique, en un point quelconque, s'obtient en joignant ce point au centre de courbure par une droite.

500. **Foyers des miroirs sphériques concaves.** — Dans les miroirs courbes, on nomme *foyers* des points où vont concourir les rayons réfléchis ou leurs prolongements; de là deux sortes de foyers, les *foyers réels* et les *foyers virtuels* (495). Dans les miroirs concaves, que nous allons d'abord étudier, on rencontre ces deux sortes de foyers; de plus, les foyers se subdivisent en *foyers principaux* et en *foyers conjugués*.

1^o *Foyer principal.* — Le caractère distinctif du foyer principal est d'être à position fixe, à égale distance du centre de courbure et du centre de figure, tandis que la position du foyer conjugué est variable. Pour obtenir d'abord le foyer principal, soit un faisceau de rayons parallèles à l'axe principal, ce qui suppose le corps éclairant placé à une distance infinie, et soit GD un de ces rayons (fig. 383). D'après l'hypothèse ci-dessus, que les miroirs courbes sont formés d'une suite d'éléments plans infiniment petits, ce rayon se réfléchit, sur l'élément qui correspond au point D, selon les lois de la réflexion sur les miroirs plans (490); c'est-à-dire que, CD étant la normale au point d'incidence D, l'angle de réflexion CDF est égal à l'angle d'incidence GDC et dans la même section principale. Par suite, dans le triangle DFC, les côtés DF et CF sont égaux, comme opposés à des angles égaux; car les angles DCF et FDC sont tous deux égaux à l'angle CDG, le premier comme alterne-interne, le second d'après les lois de la réflexion. D'ailleurs, FD approche d'autant plus d'égaliser FA, que l'arc AD est plus petit. Donc, lorsque cet arc n'est que d'un petit nombre de degrés, on peut admettre que *les droites AF et FC sont égales, et que le point F est le milieu de AC.*

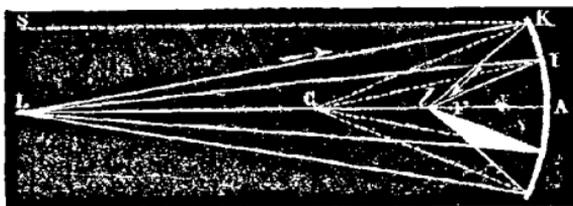
Tant que l'ouverture MCN du miroir ne dépasse pas 8 à 9 degrés, tout autre rayon HB, parallèle à l'axe, vient ainsi, après la réflexion, passer très-approximativement par le point F. Donc, lorsqu'un faisceau parallèle à l'axe tombe sur un miroir concave, *tous les rayons vont sensiblement, après la réflexion, concou-*

rir en un même point F situé à égale distance du centre de courbure et du miroir. Ce point est le *foyer principal*, et la distance FA est la *distance focale principale*.

Réciproque. — Tous les rayons parallèles à l'axe allant concourir en F , réciproquement, si l'on suppose en F un point lumineux, les rayons émis de ce point prennent, après la réflexion, des directions DG , BH ..., parallèles à l'axe principal : en effet, les angles de réflexion sont alors changés en angles d'incidence, et ceux d'incidence en angles de réflexion, mais ces angles restent toujours égaux. Donc, un point lumineux étant placé au foyer principal d'un miroir concave, les rayons partis de ce point, qui tombent sur le miroir, donnent, après la réflexion, un faisceau parallèle à l'axe.

2^o *Foyer conjugué.* — Soit maintenant le cas où les rayons lumineux qui tombent sur le miroir sont émis d'un point L (fig. 384)

Fig. 384.



situé sur l'axe, au delà du foyer principal, à une distance telle, que les rayons incidents ne soient plus parallèles, mais divergents. Le rayon incident LK faisant alors avec la normale CK un angle d'incidence LKC , plus petit que l'angle SKC que fait avec la même normale le rayon SK parallèle à l'axe, l'angle de réflexion correspondant au rayon LK devra aussi être plus petit que l'angle CKF correspondant au rayon SK . Le rayon LK devra donc, après la réflexion, rencontrer l'axe en un point l situé plus près du centre C que le foyer principal F . Tant que l'ouverture du miroir ne dépasse pas un petit nombre de degrés, tous les rayons émis de L viennent, après la réflexion, concourir très-sensiblement au même point l . Ce point est appelé *foyer conjugué* du point L , pour indiquer la liaison entre les points L et l , liaison telle, qu'ils sont réciproques l'un de l'autre ; c'est-à-dire que, si le point lumineux était transporté en l , son foyer conjugué le serait en L , LK devenant le rayon incident, et KL le rayon réfléchi.

Pour démontrer que les rayons partis du point L et réfléchis sur le miroir vont très-approximativement concourir en l , observons que dans le triangle LKl , la droite CK étant la bissectrice de l'angle K , on a, d'après un théorème connu de

géométrie, $\frac{LK}{Kl} = \frac{LC}{Cl}$ [1]. D'ailleurs, l'ouverture du miroir étant supposée d'un petit nombre de degrés, LK est sensiblement égal à LA, et lK à lA. L'égalité [1] peut donc être remplacée par $\frac{LA}{lA} = \frac{LC}{Cl}$, et cette dernière peut prendre la forme $\frac{LA}{LC} = \frac{lA}{Cl}$ [2]. Or l'égalité [2] subsiste pour tous les rayons partis du point L, et le rapport $\frac{LA}{LC}$ est constant tant que la distance LA est la même. Donc, pour les rayons émis du même point L, le rapport $\frac{lA}{Cl}$ est lui-même constant; ce qui ne peut se réaliser qu'à la condition que tous les rayons réfléchis aillent concourir en l. En effet, pour tout rayon qui rencontrerait l'axe plus loin ou plus près du centre que le point l, les deux termes lA et Cl variant en sens contraires, le rapport $\frac{lA}{Cl}$ ne serait pas constant.

A l'inspection de la figure 384, on reconnaît facilement que lorsque l'objet L s'approche ou s'éloigne du centre C, son foyer conjugué s'en approche ou s'en éloigne avec lui; car les angles d'incidence et de réflexion croissent ou décroissent ensemble.

Si l'objet L vient à coïncider avec le centre C, l'angle d'incidence est nul, et comme il en doit être de même de l'angle de réflexion, le rayon incident revient sur lui-même, et le foyer coïncide avec l'objet. Lorsque l'objet lumineux passe au delà du centre C, entre ce point et le foyer principal, le foyer conjugué à son tour passe de l'autre côté du centre, et il s'en éloigne à mesure que le point lumineux s'approche du foyer principal. Si le point lumineux coïncide avec le foyer principal, les rayons réfléchis, étant parallèles à l'axe, ne se rencontrent plus, et, par conséquent, il n'y a pas de foyer, ou, ce qui revient au même, il se fait à l'infini.

3^o *Foyer virtuel.* — Soit enfin le cas où l'objet est placé en L (fig. 385), entre le foyer principal et le miroir. Un rayon quelconque LM, émis du point L, fait alors, avec la normale CM, un angle d'incidence LMC plus grand que FMC; l'angle de réflexion doit donc être plus grand que l'angle CMS. Il suit de là que le rayon réfléchi ME est divergent par rapport à l'axe AK. La même chose ayant lieu pour tous les rayons émis du point L, ces rayons ne se rencontrent pas; mais si on les conçoit prolongés de l'autre côté du miroir, on reconnaît, par les mêmes considérations que ci-dessus (2^o), que leurs prolongements vont concourir en un même point l situé sur l'axe; en sorte que l'œil qui les reçoit éprouve la même impression que si ces rayons étaient émis du point l. Il se produit donc pour l'œil, en ce point, un *foyer virtuel*, effet analogue à celui que présentent les miroirs plans (495).

Il est à remarquer que le *foyer principal et le foyer conjugué*

gué sont toujours placés du même côté que l'objet par rapport au miroir, tandis que le foyer virtuel est situé de l'autre côté.

4^e Foyer conjugué sur un axe secondaire. — Jusqu'ici on a supposé le point lumineux placé sur l'axe principal même, et

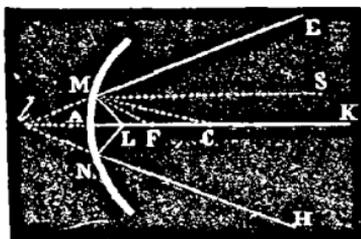


Fig. 385.

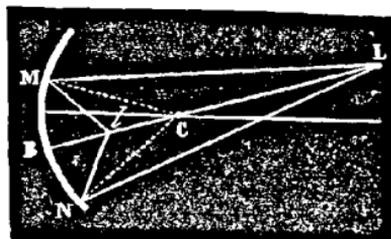


Fig. 386.

alors le foyer se forme sur cet axe; dans le cas où le point lumineux est situé sur un axe secondaire LB (fig. 386), en appliquant à cet axe les mêmes raisonnements qu'à l'axe principal, on reconnaît que le foyer du point L se fait en un point l situé sur l'axe secondaire, et que, selon la distance du point L au miroir, ce foyer est un foyer principal, conjugué ou virtuel par rapport à l'axe LB.

501. **Détermination expérimentale des foyers des miroirs concaves.** — On détermine expérimentalement le foyer principal d'un miroir concave en recevant sur le miroir un faisceau solaire dans une direction parallèle à l'axe principal; cherchant, avec un écran de verre dépoli ou de carton, le lieu où la lumière réfléchi se concentre avec plus d'éclat, là est le foyer principal.

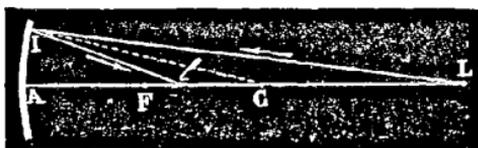
Le foyer conjugué se détermine de même en plaçant une bougie allumée au point dont on veut avoir le foyer, et en cherchant le lieu où le faisceau réfléchi présente le maximum d'éclat.

502. **Détermination graphique des foyers des miroirs concaves.** — *Foyer principal.* — Les centres de courbure et de figure d'un miroir concave étant connus, son foyer principal se détermine en prenant le milieu du rayon de courbure. Pour un axe secondaire quelconque, le foyer principal s'obtient de la même manière.

Foyer conjugué. — 1^o Soit d'abord le cas où le point lumineux L, dont on cherche le foyer conjugué, est situé sur l'axe principal au delà du centre de courbure (fig. 387). Tirant un rayon incident quelconque LI, la normale IC, et faisant l'angle de réflexion CIl égal à CIL, le point l , où le rayon réfléchi rencontre l'axe principal, est le foyer conjugué de L. Réciproquement, si le point lumineux est en l , son foyer conjugué L se détermine par la même construction.

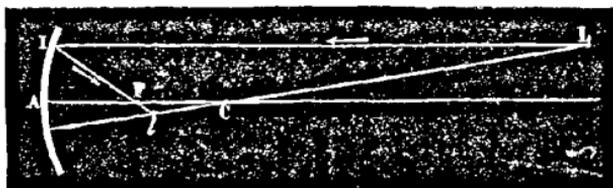
2° Soit le point lumineux en dehors de l'axe, en L (fig. 388). Étant mené l'axe secondaire IC, remarquons, une fois pour toutes, que tout axe secondaire, de même que l'axe principal, *représente un rayon lumineux incident*, mais un rayon qui se confond avec la normale et avec le rayon réfléchi. Cela posé, on

Fig. 387.



pourrait trouver le foyer conjugué du point L par la construction ci-dessus; mais il est plus simple de mener le rayon LI parallèle à l'axe principal. Dans ce cas, le rayon réfléchi devant passer par le foyer principal (500, 1°), on obtient immédiatement sa direction en joignant les points I et F par une droite;

Fig. 388.



celle-ci, prolongée, va couper l'axe secondaire IC en un point l qui est le foyer conjugué cherché, puisque c'est en ce point que concourent les rayons partis du point L.

Foyer virtuel. — Ce foyer se détermine identiquement par les mêmes constructions que celles des figures 387 et 388.

On verra ci-après (509) qu'on détermine aussi les foyers par le calcul, lorsqu'on connaît la distance du point lumineux au miroir et le rayon de courbure de celui-ci.

503. Construction des images réelles dans les miroirs concaves. — Un objet quelconque étant placé devant un miroir concave, l'image qu'en donne celui-ci se construit sans difficulté en s'appuyant sur ce qui vient d'être dit de la construction des foyers.

En effet, soit un objet AB, placé devant un miroir concave, au delà du centre (fig. 389). Se bornant à chercher la position des points extrêmes de l'image, et ne considérant qu'une section principale du miroir et les lignes qui y sont contenues, on tire d'abord les axes secondaires AE et BI des points A et B; puis, menant du point A un rayon AD parallèle à l'axe principal, ce rayon va passer, après la réflexion, par le foyer principal F (500), et for-

mer en a , sur l'axe secondaire AE, l'image du point A. De même, le rayon BG, mené du point B parallèlement à l'axe, va former

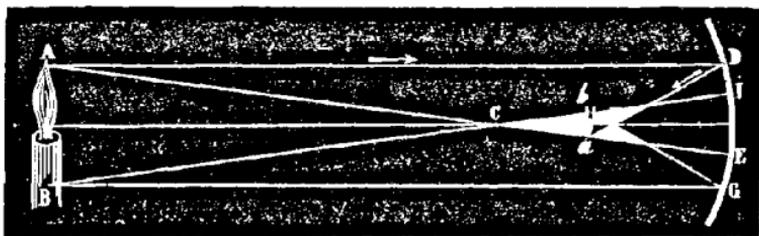


Fig. 389.

en b l'image du point B. On a donc en ab l'image de AB. Cette image est réelle, renversée, placée entre le centre de courbure et le foyer principal, et d'autant plus petite par rapport à l'objet, que celui-ci est plus éloigné.

Réciproquement, si l'objet lumineux ou éclairé, dont on cherche l'image, est placé en ab (fig. 389), entre le foyer principal et le centre, son image se forme en AB. Elle est encore réelle et renversée, mais plus grande que l'objet, et d'autant plus grande, que ab est plus près du foyer principal.

Si l'objet est placé au foyer principal même (fig. 390), il ne se produit aucune image. En effet, les rayons AI et AK émis du point A donnant, après la réflexion, un faisceau KIGH parallèle à

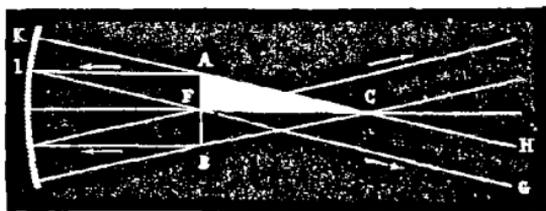


Fig. 390.

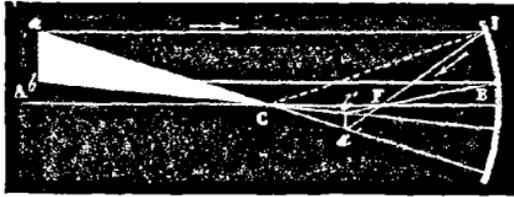
l'axe secondaire CK, et les rayons émis du point B un faisceau parallèle à BC (300, réciproque), ces faisceaux ne peuvent former ni foyers ni images.

Enfin, lorsque l'objet ab a tous ses points hors de l'axe principal (fig. 391), on trouve par la construction ci-dessus que l'image se forme en $a'b'$, de l'autre côté de l'axe AB.

Images aériennes. — Il est à remarquer qu'on peut voir les images réelles de deux manières : en les recevant sur un écran qui, par réflexion, les fait voir dans toutes les directions ; ou bien, en plaçant l'œil en deçà de l'image, de façon à recevoir les rayons

réfléchis qui la produisent. On aperçoit alors, dans l'espace, une image qu'on désigne sous le nom d'*image aérienne*.

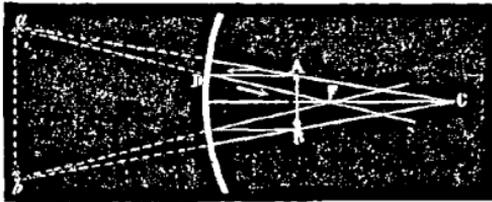
Fig. 391.



504. Construction des images virtuelles dans les miroirs concaves. — On a vu qu'il n'y a foyer virtuel dans les miroirs concaves qu'autant que les rayons partent d'un point situé entre le foyer principal et le miroir (500, 3^o); c'est donc dans cette position que doit être l'objet dont on cherche l'image virtuelle.

Cela posé, soit un objet AB placé devant un miroir concave, entre le foyer principal F et le miroir (fig. 392). On trace d'abord les axes secondaires des points A et B, en ayant soin de les prolonger au delà du miroir. Puis, tirant le rayon AD parallèle à l'axe principal, et, par le foyer F, le rayon réfléchi DF, ce dernier, prolongé, donne en *a* l'image virtuelle du point A. De même, le rayon mené du point B parallèlement à l'axe donne en *b* l'image du point B. L'œil qui reçoit le faisceau réfléchi voit donc en *ab*

Fig. 392.



l'image de AB, *virtuelle, redressée, plus grande que l'objet, et située derrière le miroir.*

505. Miroirs convexes, leurs foyers. — Dans les miroirs convexes, il n'y a que des foyers virtuels. Soient, en effet, des rayons SI, TK... (fig. 393) parallèles à l'axe principal d'un miroir convexe. Ces rayons, après leur réflexion, prennent des directions divergentes IM, KH,... qui, prolongées, vont concourir en un point F, qui est le *foyer virtuel principal* du miroir. Au moyen du triangle CKF, qui est isocèle, on démontrerait, de même que dans les miroirs concaves, que F est le milieu de CA.

Si les rayons partent d'un point L situé sur l'axe à une distance

finie, le foyer est encore virtuel, mais vient se faire en l , entre le foyer principal F et le miroir.

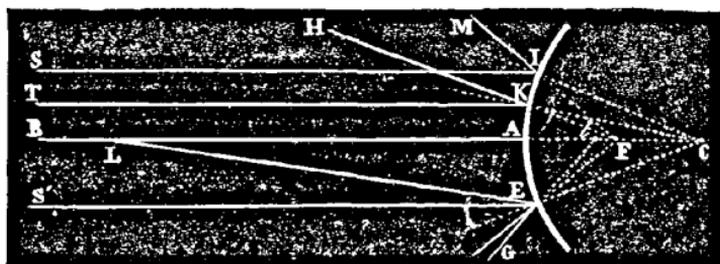


Fig. 393.

506. **Détermination expérimentale du foyer principal dans les miroirs convexes.** — Pour trouver expérimentalement le foyer virtuel principal d'un miroir convexe, on le recouvre de papier, en ayant soin de réserver dans celui-ci, à égale distance du centre de figure A , et dans une même section principale (fig. 394), deux petits trous en H et en I , qui laissent le miroir à nu. On place ensuite devant le miroir un écran MN , percé à son centre d'une ouverture circulaire plus grande que la distance HI . Si l'on reçoit sur le miroir un faisceau de rayons solaires SH , $S'I$, parallèles à l'axe, la lumière se réfléchit en H et en I , sur les parties où le miroir est à découvert, et va former sur l'écran deux

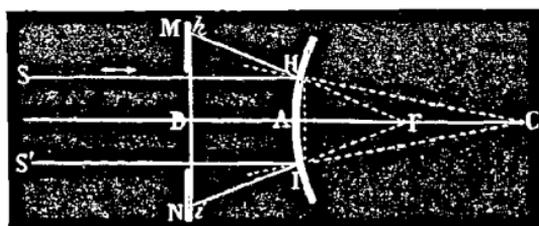


Fig. 394.

images brillantes en h et en i . En reculant l'écran MN , ou en l'approchant, on trouve une position où $hi = 2HI$. La distance AD de l'écran au miroir représente alors la distance focale principale. En effet, l'arc HAI , qui est d'un petit nombre de degrés, se confondant sensiblement avec sa corde, les triangles semblables FHI et Fhi donnent $\frac{HI}{hi} = \frac{FA}{FD}$; mais HI étant la moitié de hi , FA est la moitié de FD ; donc AD est sensiblement égal à AF . D'ailleurs, puisque les rayons SH et $S'I$ sont parallèles à l'axe, FA est la distance focale principale; donc AD représente bien cette distance.

507. **Détermination graphique du foyer principal dans les miroirs convexes.** — On a vu ci-dessus (fig. 393) que le triangle CFK est isocèle et que le point F est le milieu de AC, ce qui donne le moyen de déterminer le foyer principal quand on connaît les centres de courbure et de figure C et A.

508. **Construction des images dans les miroirs convexes.** — Soit

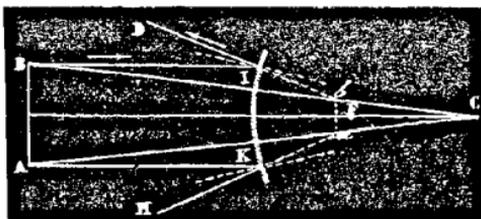


Fig. 395.

un objet AB (fig. 395) placé devant un miroir convexe, à une distance quelconque. Tirant les axes secondaires AC et BC, et des points A et B des rayons AK et BI parallèles à l'axe principal, on sait que le prolongement du rayon réfléchi en K doit aller passer en F; joignant donc le point K au point F par la droite KF, celle-ci coupe l'axe secondaire AC en un point *a* qui est le foyer virtuel de A. Celui de B s'obtenant de même en *b*, l'œil qui reçoit les rayons réfléchis ID et KH voit en *ab* l'image de AB, *image virtuelle, redressée et plus petite que l'objet.*

509. **Formules relatives aux miroirs sphériques.** — La relation qui existe

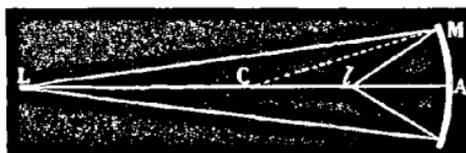


Fig. 396.

entre la position relative d'un objet et celle de son image dans les miroirs sphériques peut se représenter par des formules très-simples. Pour cela, considérons d'abord un miroir concave, et représentons par R son rayon de courbure, par *p* la distance LA de l'objet L au miroir (fig. 396), et par *p'* la distance IA de l'image à ce même miroir. Dans le triangle LMl, la normale MC partageant l'angle LMl en deux parties égales, on peut appliquer ce théorème de géométrie que, dans tout triangle, la bissectrice d'un angle partage le côté opposé en deux segments qui sont entre eux comme les deux côtés de l'angle; c'est-à-dire que

$$\frac{CL}{CL} = \frac{LM}{LM'}, \text{ d'où } CL \times LM = CL \times LM'.$$

Or, si l'arc AM ne dépasse pas 8 à 9 degrés, les lignes ML et Ml sont très-sensiblement égales à AL et à Al, c'est-à-dire à *p* et à *p'*. D'ailleurs,

$$CL = CA - Al = R - p', \text{ et } CL = AL - AC = p - R.$$

Substituant ces diverses valeurs dans l'égalité qui précède, il vient

$$(R - p')p = (p - R)p', \text{ ou } Rp - pp' = pp' - Rp';$$

transposant et réduisant, on trouve $Rp + Rp' = 2pp'$ [1].

Si l'on divise tous les termes de cette égalité par $pp'R$, et qu'on supprime les facteurs communs, elle prend la forme $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$ [2], sous laquelle on la considère ordinairement.

En résolvant l'équation [1] par rapport à p' , on en tire $p' = \frac{pR}{2p - R}$ [3], formule qui fait connaître la distance de l'image au miroir quand on connaît celle de l'objet et le rayon de courbure.

510. **Discussion de la formule des miroirs concaves.** — Cherchons maintenant les différentes valeurs que prend p' suivant celles qu'on donne à p .

1° Soit d'abord l'objet lumineux ou éclairé placé sur l'axe à une distance infinie, cas où les rayons incidents sont parallèles. Pour interpréter la valeur que prend alors p' , il faut diviser par p les deux termes de la fraction $\frac{pR}{2p - R}$, ce qui donne $p' = \frac{R}{2 - \frac{R}{p}}$ [4]. Or, en introduisant dans cette formule la condition que p

est infini, la fraction $\frac{R}{p}$ est nulle, et on a $p' = \frac{R}{2}$, c'est-à-dire que l'image se fait au foyer principal; ce qui devait être, puisque les rayons incidents forment alors un faisceau parallèle à l'axe.

2° Si l'objet s'approche du miroir, p décroît, et, le dénominateur de la formule [4] diminuant, la valeur de p' augmente; par conséquent, l'image s'approche du centre en même temps que l'objet; mais elle est toujours comprise entre le foyer principal et le centre, car tant que p est $> R$, on a $\frac{R}{2 - \frac{R}{p}} > \frac{R}{2}$ et $< R$.

3° Si l'objet coïncide avec le centre, ce qui s'exprime en faisant $p = R$, il vient $p' = R$, c'est-à-dire que l'image coïncide avec l'objet.

4° L'objet lumineux passant entre le centre et le foyer principal, on a $p < R$, et l'on conclut de la formule [4] que p' est $> R$; c'est-à-dire que l'image se fait alors de l'autre côté du centre. Lorsque l'objet est arrivé au foyer principal, on a $p = \frac{R}{2}$, ce qui donne $p' = \frac{R}{0} = \infty$; c'est-à-dire que l'image se fait à l'infini. En effet, les rayons réfléchis sont alors parallèles à l'axe.

5° Enfin, si l'objet passe entre le foyer principal et le miroir, on a $p < \frac{R}{2}$; le dénominateur de la formule [4] étant alors négatif, il en est de même de p' , ce qui indique que la distance p' de l'image au miroir doit se compter sur l'axe en sens contraire de p . En effet, l'image est alors virtuelle et située de l'autre côté du miroir (500, 3°).

En introduisant dans la formule [2] la condition que p' est négatif, cette formule devient $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$; sous cette forme, elle comprend le cas des images virtuelles dans les miroirs concaves.

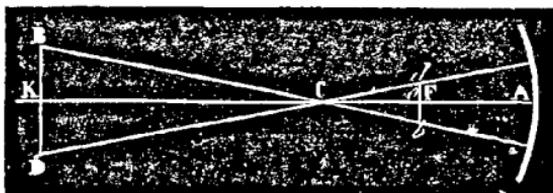
Miroirs convexes. — Dans ces miroirs, l'image étant toujours virtuelle (508), p' et R sont de même signe, puisque l'image et le centre sont d'un même côté du

miroir, tandis que, l'objet étant de l'autre côté, p est de signe contraire; en introduisant cette condition dans la formule [2], on trouve, pour la formule relative aux miroirs convexes $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{R}$ [5]. Du reste, on pourrait la trouver directement par les mêmes considérations géométriques qui ont fait trouver la formule [2] des miroirs concaves.

Il importe d'observer que les différentes formules qui précèdent ne sont pas rigoureuses, puisqu'elles s'appuient sur des hypothèses qui ne le sont pas elles-mêmes, savoir, que les droites LM et l'M (fig. 396) sont égales à LA et à l'A, ce qui n'est vrai qu'à la limite, quand l'angle MCA est nul; mais ces formules approchent d'autant plus d'être exactes, que l'ouverture du miroir est plus petite.

511. **Calcul de la grandeur des images.** A l'aide des formules ci-dessus, on peut facilement calculer la grandeur d'une image, quand on connaît la distance de l'objet, sa grandeur et le rayon du miroir. En effet, si l'on représente

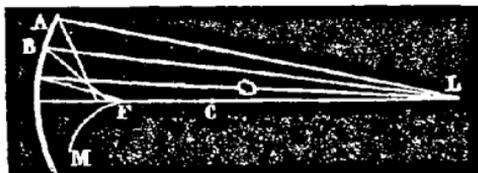
Fig. 397



l'objet par BD (fig. 397), son image par bd , et si l'on suppose connus la distance KA et le rayon AC, on calcule Ao au moyen de la formule [3] du paragraphe 509. Ao une fois connu, on en déduit oC. Or les deux triangles BCD et dCb étant semblables, on a entre leurs bases et leurs hauteurs la proportion $\frac{bd}{BD} = \frac{Co}{CK}$, d'où l'on tire la grandeur bd de l'image.

512. **Aberration de sphéricité, caustiques.** — Dans la théorie des foyers et des images dans les miroirs sphériques, on a déjà remarqué que les rayons réfléchis ne viennent sensiblement concourir en un point unique qu'autant que l'ouverture du miroir ne dépasse pas 8 à 9 degrés (500). Pour une ouverture

Fig. 298



plus grande, les rayons réfléchis près des bords vont rencontrer l'axe plus près du miroir que ceux qui se sont réfléchis à une petite distance du centre de figure. De là résulte, dans les images, un défaut de netteté qu'on désigne sous le nom d'*aberration de sphéricité par réflexion*, pour la distinguer de l'*aberration de sphéricité par réfraction* que présentent les lentilles (542).

Les rayons réfléchis se coupant successivement deux à deux, comme on le voit au-dessus de l'axe FL (fig. 398), leurs points d'intersection forment dans l'espace une surface brillante qu'on nomme *caustique par réflexion*. La courbe EM représente une des branches de la section principale de cette surface.

513. **Applications des miroirs.** — On connaît les applications des miroirs plans

dans l'économie domestique. Ces miroirs sont aussi d'un fréquent usage, dans plusieurs appareils de physique, pour donner à la lumière une direction déterminée. Si c'est la lumière solaire qu'on veut ainsi diriger, on ne peut conserver aux rayons réfléchis une direction constante qu'autant que le miroir est mobile. Il faut, en effet, donner à celui-ci un mouvement qui compense le changement de direction que prennent sans cesse les rayons incidents, en vertu du mouvement apparent du soleil. Ce résultat s'obtient par un mouvement d'horlogerie qui fait varier l'inclinaison du miroir au moyen d'une tige à laquelle celui-ci est fixé. L'appareil ainsi construit a reçu le nom d'*héliostat*. La réflexion de la lumière a encore été utilisée pour mesurer les angles des cristaux avec une grande précision, au moyen d'instruments connus sous le nom de *goniomètres à réflexion*.

Les miroirs sphériques concaves ont aussi reçu de nombreuses applications. On s'en sert comme miroirs grossissants : tels sont les miroirs à barbe. On a déjà vu l'usage qu'on peut en tirer comme miroirs ardents (129) ; ils sont encore employés dans les télescopes. Enfin, ces miroirs peuvent aussi servir comme réflecteurs pour porter la lumière à de grandes distances, en plaçant une source lumineuse à leur foyer principal ; mais, pour cet usage, on doit préférer les *miroirs paraboliques*.

514. **Miroirs paraboliques.** — Les *miroirs paraboliques* sont des miroirs concaves dont la surface est engendrée par la révolution d'un arc de parabole AM autour de son axe AX (fig. 399).

On a vu ci-dessus (512) que, dans les *miroirs sphériques*, les rayons parallèles à l'axe ne viennent qu'approximativement concourir au foyer principal ;

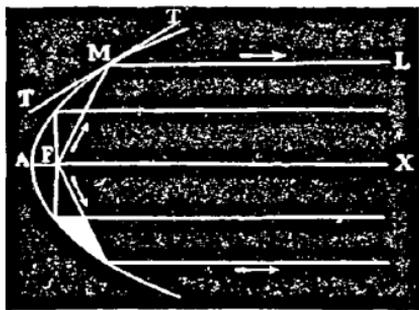


Fig. 399.

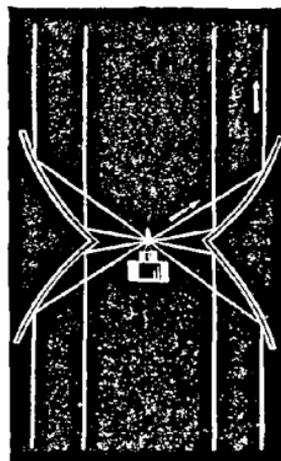


Fig. 400.

il en résulte réciproquement qu'une source de lumière étant placée au foyer principal de ces miroirs, les rayons réfléchis ne forment pas rigoureusement un faisceau parallèle à l'axe. Or ce défaut ne se rencontre pas dans les miroirs paraboliques, qui sont plus difficiles à construire que les miroirs sphériques, mais dont l'usage est bien préférable pour réflecteurs. En effet, c'est une propriété connue de la parabole, qu'en un point quelconque M de cette courbe, le rayon vecteur FM et la droite ML, parallèle à l'axe, font avec la tangente TT' des angles égaux. Par suite, dans ces sortes de miroirs, tous les rayons parallèles à l'axe vont rigoureusement concourir, après la réflexion, au foyer F du miroir ; et, réciproquement, une source de lumière étant placée en ce foyer, les rayons

lumineux qui tombent sur le miroir se réfléchissent en un faisceau rigoureusement parallèle à l'axe. Il suit de là que la lumière ainsi réfléchie tend à conserver la même intensité à une grande distance ; car on sait (487) que c'est surtout la divergence des rayons qui affaiblit l'intensité de la lumière.

C'est d'après la propriété ci-dessus des miroirs paraboliques que les lampes qu'on place sur les voitures publiques, ainsi que celles qui sont à l'arrière et à l'avant des trains de chemin de fer, sont munies de réflecteurs paraboliques. Ces sortes de réflecteurs ont aussi été longtemps en usage pour les phares ; mais on emploie de préférence aujourd'hui des verres lenticulaires.

En coupant par un plan passant par le foyer et perpendiculaire à l'axe deux miroirs paraboliques égaux, et les réunissant suivant leurs intersections, comme le montre la figure 400, en sorte que leurs deux foyers coïncident, on obtient un système de réflecteurs avec lequel une seule lampe éclaire à la fois dans deux directions opposées. C'est ce système qu'on adopte pour les escaliers, afin de les éclairer en même temps dans toute leur étendue.

CHAPITRE III

RÉFRACTION SIMPLE, LENTILLES

515. **Phénomène de la réfraction.** — La *réfraction* est une déviation qu'éprouvent les rayons lumineux lorsqu'ils passent obliquement d'un milieu dans un autre : par exemple, de l'air dans l'eau ou dans tout autre milieu transparent. Nous disons *obliquement* ; car si le rayon lumineux est perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux, il n'y a pas déviation, et le rayon continue à se propager en ligne droite.

Le rayon incident étant représenté par SO (fig. 401), on nomme *rayon réfracté* la direction OH que prend la lumière dans le second milieu, et les angles SOA et HOB que forment ces rayons avec la droite AB, normale à la surface qui sépare les deux milieux, sont nommés, l'un *angle d'incidence*, et l'autre *angle de réfraction*. Suivant que le rayon réfracté s'approche ou s'écarte de la normale, on dit que le second milieu est plus ou moins *réfringent* que le premier.

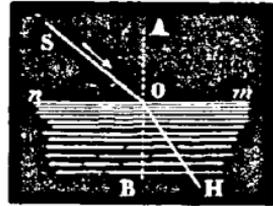


Fig. 401.

Le calcul montre que le sens de la réfraction dépend de la vitesse relative de la lumière dans les deux milieux. Dans le système des ondulations, le milieu le plus réfringent est celui dans lequel la vitesse de propagation est moindre.

La lumière incidente qui se présente pour passer d'un milieu dans un autre ne pénètre jamais complètement dans celui-ci :

une partie se réfléchit à la surface qui sépare les deux milieux ; et l'autre partie pénètre seule dans le second. De là, perte de lumière toutes les fois qu'un faisceau lumineux traverse un milieu transparent.

Dans les milieux non cristallisés, comme l'air, les liquides, le verre ordinaire, le rayon lumineux, simple à l'incidence, reste encore simple après la réfraction ; mais dans certains corps cristallisés, comme le spath d'Islande, le gypse, le rayon incident donne naissance à deux rayons réfractés. Le premier phénomène constitue la *réfraction simple* ; le second, la *double réfraction*. Il ne sera question ici que de la réfraction simple ; la théorie de la double réfraction sera donnée plus tard (617).

516. Lois de la réfraction simple. — Pour interpréter ces lois, rappelons qu'un angle étant donné, si l'on décrit de son sommet, comme centre, avec un rayon égal à l'unité, un arc AB, qui le mesure, on nomme *sinus* de l'angle ACB, ou de l'arc AB (fig. 402), la perpendiculaire BP abaissée d'une extrémité de l'arc sur le rayon qui passe par l'autre extrémité. L'angle BCA croissant de zéro à 90 degrés, le sinus croît de zéro à 1 ; puis, l'angle continuant à croître jusqu'à 180 degrés, le sinus décroît de 1 à zéro. Ajoutons qu'on a calculé des tables, connues sous le nom de *tables des sinus*, qui font connaître le sinus d'un angle quand celui-ci est connu en degrés, et réciproquement.

Cela posé, tout rayon lumineux qui passe d'un milieu dans un autre est soumis aux deux lois suivantes :

1^o *Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant pour deux mêmes milieux, mais variable si les milieux changent.*

2^o *Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux.*

La première de ces lois est connue sous le nom de *loi de Descartes*, qui, le premier, l'a fait connaître.

Pour démontrer les lois de la réfraction, on emploie le même appareil que pour les lois de la réflexion (490), en remplaçant le miroir plan, placé au centre du cercle gradué, par un vase hémicylindrique de verre R rempli d'eau, en sorte que la surface du liquide soit exactement à la hauteur du centre du cercle (fig. 403). De plus, sur le pied de l'appareil on fixe, à l'aide d'une vis de pression, une règle horizontale AB divisée en millimètres. Cette règle, qu'on abaisse ou qu'on élève à volonté, donne la longueur des sinus des angles d'incidence et de réfraction. Enfin, on facilite l'expérience en ajoutant à l'alidade K un écran de verre dépoli, e,

sur lequel on reçoit le rayon réfracté. L'appareil ainsi disposé, on fait arriver un rayon lumineux S sur le miroir M , qu'on incline jusqu'à ce que le rayon réfléchi MO , passant par le tube c , se dirige vers le centre du cercle gradué. Là, le rayon se réfracte à son entrée dans l'eau; mais il en sort sans réfraction, parce

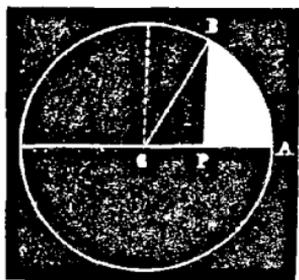


Fig. 402.

qu'à sa sortie sa direction est normale à la paroi cylindrique du vase R . Pour suivre la marche du rayon réfracté, on tourne l'alidade K , jusqu'à ce qu'une image lumineuse apparaisse au centre de l'écran e . L'angle KOE , que fait alors l'alidade K avec la normale IE menée au point d'incidence, est l'angle de réfraction; celui d'incidence est l'angle MOI , égal à FOE , comme opposé par le sommet. Quant aux sinus de ces angles, si du point O comme centre, avec le rayon OK pris pour unité, on décrit l'arc de cercle CD , ils sont représentés, le sinus d'incidence par la droite FH perpendiculaire à IE prolongée, et le sinus de réfraction par la perpendiculaire abaissée de l'extrémité K sur le prolongement de la même droite IE . Ces deux sinus sont mesurés par la règle AB : telle qu'elle est placée dans le dessin, elle mesure le sinus de l'angle de réfraction; remontée jusqu'en F , elle mesure celui de l'angle d'incidence. Or, en lisant successivement sur la règle les longueurs des deux sinus, on trouve des nombres variables avec la position des alidades, mais dont le rapport est constant; c'est-à-dire que le sinus d'incidence devenant deux, trois fois plus grand, il en est de même du sinus de réfraction, ce qui dé-

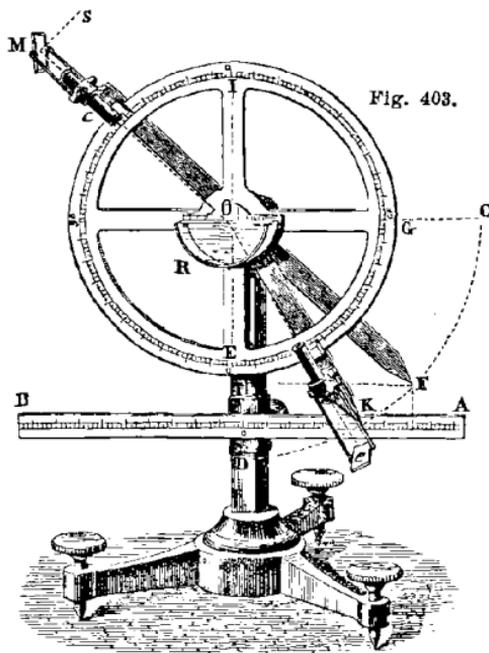


Fig. 403.

montre la première loi. La seconde se trouve démontrée par la disposition même de l'appareil, le plan du limbe gradué étant vertical et, par conséquent, perpendiculaire à la surface du liquide dans le vase R.

517. Indice de réfraction, indice de retour. — L'*indice de réfraction* est le rapport entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction. En représentant par n cet indice, et par i et r les angles d'incidence et de réfraction, on a $\frac{\sin i}{\sin r} = n$. L'indice varie avec les milieux : de l'air à l'eau, il est $\frac{4}{3}$; de l'air au verre, $\frac{3}{2}$. Si la lumière, au lieu de passer de l'air dans une substance, passait du vide dans cette substance, on aurait l'indice de *réfraction absolue*. Les gaz étant très-peu réfringents, l'indice de réfraction absolue diffère très-peu de l'indice de réfraction par rapport à l'air.

Réciproquement, si l'on considère les milieux dans un ordre inverse, c'est-à-dire si la lumière se propage de l'eau dans l'air, ou du verre dans l'air, on constate, au moyen de l'appareil ci-dessus, que les rayons suivent le même chemin, mais en sens contraire, KO devenant le rayon incident, et OM le rayon réfracté. L'indice de réfraction, qui était d'abord n , est donc actuellement $\frac{1}{n}$: par exemple, de l'eau à l'air il est $\frac{3}{4}$, et du verre à l'air $\frac{2}{3}$; c'est-à-dire que de l'air à un milieu quelconque, l'indice étant n , l'*indice de retour* est $\frac{1}{n}$.

518. Effets produits par la réfraction. — Par l'effet de la réfraction, les corps plongés dans un milieu plus réfringent que l'air paraissent rapprochés de la surface de ce milieu ; ils en paraîtraient, au contraire, écartés, s'ils étaient dans un milieu moins réfringent. Soit, par exemple, un objet L plongé dans une masse d'eau (fig. 404). En passant de ce liquide dans l'air, les rayons LA, LB, . . . s'écartent de la normale au point d'incidence et prennent les directions AC, BD, . . . dont les prolongements concourent sensiblement en un point L' situé sur la verticale LK. L'œil qui reçoit ces rayons voit donc l'objet L en L'. Plus les rayons AC, BD, . . . sont réfractés, plus l'objet paraît relevé.

Par le même effet, un bâton plongé obliquement dans l'eau semble brisé (fig. 405), la partie immergée paraissant relevée.

C'est encore par un effet de réfraction que les astres nous paraissent relevés au-dessus de l'horizon. En effet, les couches de l'atmosphère augmentant de densité en se rapprochant du sol, et pour un même gaz la puissance réfractive croissant avec la densité (529),

il en résulte qu'en entrant dans l'atmosphère et en s'y propageant, les rayons lumineux se brisent, comme le montre la figure 406, en décrivant une courbe qui arrive jusqu'à l'œil; c'est donc suivant la tangente à cette courbe que nous voyons l'astre en S' au lieu de le voir en S . L'effet est d'autant plus marqué, que l'astre

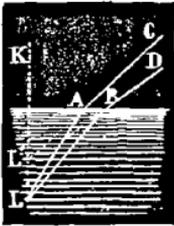


Fig. 404.

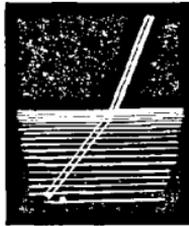


Fig. 405.

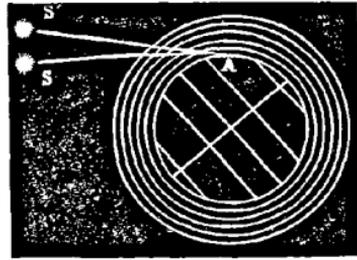


Fig. 406.

est plus voisin de l'horizon. Dans nos climats, la réfraction atmosphérique ne relève pas les astres de plus d'un demi-degré.

519. **Angle limite, réflexion totale.** — Quand un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre moins réfringent, comme de l'eau dans l'air, on a vu (515) que l'angle de réfraction est alors plus grand que l'angle d'incidence. Il suit de là que, quand la lumière se propage dans une masse d'eau, de S en O (fig. 407), il y

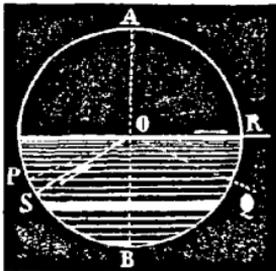


Fig. 407.

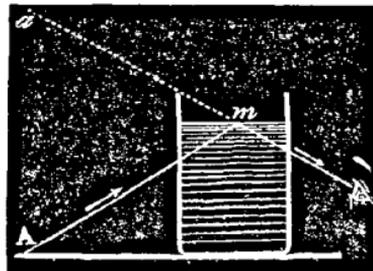


Fig. 408.

a toujours une valeur de l'angle d'incidence SOB pour laquelle l'angle de réfraction AOR est droit, ou pour laquelle le rayon réfracté OR sort parallèle à la surface de l'eau.

L'angle SOB se nomme *angle limite*, parce que, pour tout angle d'incidence plus grand, tel que POB , le rayon incident PO ne peut donner naissance à aucun rayon réfracté. En effet, l'angle AOR augmentant avec SOB , le rayon OR se trouve porté en OQ

c'est-à-dire qu'il n'y a plus de réfraction au point O, mais une réflexion intérieure qu'on nomme *réflexion totale*, parce que la lumière incidente est alors réfléchiée en totalité. De l'eau à l'air, l'angle limite est de $48^{\circ} 35'$; du verre à l'air, il est de $41^{\circ} 48'$.

On constate la réflexion intérieure en plaçant devant un vase de verre rempli d'eau un objet A (fig. 408); puis, regardant de l'autre côté du vase la surface du liquide de bas en haut, comme le montre la figure, on aperçoit en *a*, au-dessus du liquide, l'image de l'objet A, laquelle est formée par les rayons réfléchis en *m*. Si, au contraire, on place l'œil au-dessus de la surface liquide, elle paraît complètement opaque par rapport au point A.

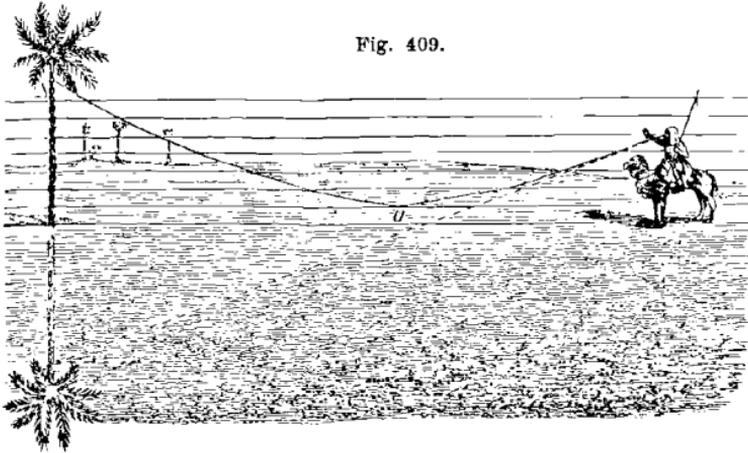
θ étant l'angle limite pour lequel l'angle de réfraction r égale 90 degrés, on a $\sin r = 1$, et, par suite, la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, qui correspond au passage de la lumière d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent, devient $\sin \theta = \frac{1}{n}$. De cette dernière, on déduit l'angle limite quand l'indice est connu, et réciproquement.

520. **Mirage.** — Le *mirage* est une illusion d'optique qui fait voir, au-dessous du sol ou dans l'atmosphère, l'image renversée des objets éloignés. Ce phénomène s'observe fréquemment dans les pays chauds, et particulièrement dans les plaines sablonneuses de l'Égypte. Là, le sol présente souvent l'aspect d'un lac tranquille, sur lequel se réfléchissent les arbres et les villages environnants. Ce phénomène a été observé dès la plus haute antiquité; mais c'est Monge, le premier, qui en a donné l'explication, lorsqu'il faisait partie de l'expédition d'Égypte.

Le mirage est un phénomène de réfraction, qui résulte de l'inégale densité des couches de l'atmosphère lorsqu'elles sont dilatées par leur contact avec le sol fortement échauffé. Les couches les moins denses étant alors les plus inférieures, un rayon lumineux qui se dirige d'un objet élevé A (fig. 409) vers le sol, traverse des couches de moins en moins réfringentes; car on verra bientôt (529) qu'un même gaz est d'autant moins réfringent qu'il est moins dense. L'angle d'incidence croît donc d'une couche à la suivante, et finit par atteindre l'angle limite au delà duquel, à la réfraction, succède la réflexion intérieure (519). Le rayon se relève alors comme le montre la figure, et subit une suite de réfractions successives en sens contraire des premières, car il passe maintenant dans des couches de plus en plus réfringentes. Le rayon lumineux arrive donc à l'œil de l'observateur avec la même direction que s'il était parti d'un point situé au-dessous du sol, et c'est pour cela qu'il

donne une image renversée de l'objet qui l'a émis, comme s'il s'était réfléchi, au point O, sur la surface d'un miroir.

Quelquefois les navigateurs observent dans l'atmosphère l'image renversée des côtes ou des navires éloignés : c'est encore un effet



de mirage, mais qui se produit en sens contraire du premier, et seulement lorsque la mer est plus froide que l'air ; car ce sont alors les couches inférieures de l'atmosphère qui sont les plus denses, à cause de leur contact avec la surface des eaux.

TRANSMISSION DE LA LUMIÈRE A TRAVERS LES MILIEUX DIAPHANES

521. **Milieux à faces parallèles.** — Lorsque la lumière traverse un milieu à faces parallèles, les rayons *émergents*, c'est-à-dire ceux qui sortent, sont parallèles aux rayons incidents.

Pour le démontrer, soient (fig. 410) une glace de verre 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 sa sortie. En A, la lumière éprouve une première réfraction dont

l'indice est $\frac{\sin i}{\sin r}$. En D, elle se

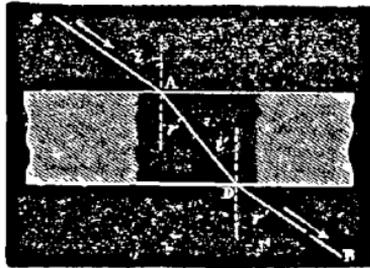


Fig. 410.

réfracte une seconde fois, et l'indice est alors $\frac{\sin i'}{\sin r'}$. Or on a vu (517) que

l'indice de réfraction du verre à l'air est le même que celui de l'air au verre renversé; on a donc $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{\sin r}{\sin i}$.

Mais les deux normales en A et en B étant parallèles, les angles r et i' sont égaux comme alternes-internes. Par conséquent, les numérateurs des deux rapports ci-dessus étant égaux, il en est de même des dénominateurs; d'où l'on conclut que les angles r' et i sont égaux, et, par suite, que DB est parallèle à SA.

522. Prismes. — On nomme *prisme*, en optique, tout milieu transparent compris entre deux faces planes inclinées l'une sur l'autre. L'intersection de ces deux faces est une ligne droite qui est l'*arête* du prisme, et l'angle qu'elles comprennent est son *angle*



Fig. 411.

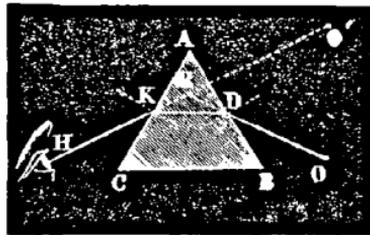


Fig. 412.

réfringent. Toute section perpendiculaire à l'arête est dite *section principale*. Les prismes qu'on emploie pour les expériences sont des prismes triangulaires droits (fig. 411), et leur section principale est un triangle (fig. 412). Dans cette section, le point A prend le nom de *sommet* du prisme, et la droite BC est dite sa *base*, expressions qui, géométriquement, ne conviennent qu'au triangle ABC, et non au prisme.

523. Marche des rayons dans les prismes, angle de déviation. — Les lois de la réfraction connues, il est facile de déterminer la marche de la lumière dans les prismes. Soit, en effet, un point lumineux O (fig. 412) contenu dans le plan de la section principale ABC d'un prisme, et soit OD un rayon incident. Ce rayon se réfracte en D, en se rapprochant de la normale; puisqu'il entre dans un milieu plus réfringent, et prend une direction DK, déterminée par l'égalité $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{3}{2}$, qui donne l'angle r quand on connaît l'angle i . En K, le rayon subit une seconde réfraction; mais passant dans l'air, qui est moins réfringent que le verre, il s'écarte de la normale, et prend une direction KH, donnée par l'égalité $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{2}{3}$ (517). La lumière se réfracte donc deux fois dans le même sens, et l'œil qui reçoit le rayon émergent KH voit l'objet O en

O' ; c'est-à-dire que les objets vus à travers un prisme paraissent relevés vers son sommet. De plus, l'image O' du point O est virtuelle.

La déviation que le prisme imprime à la lumière est mesurée par l'angle OEO' que forment entre eux le rayon incident et le

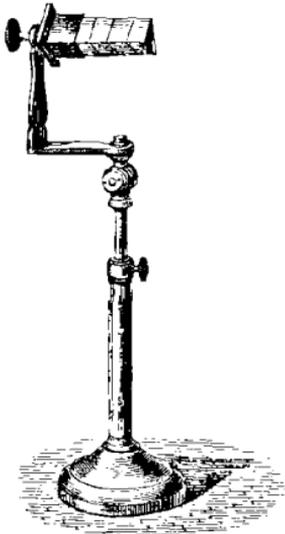


Fig. 413.

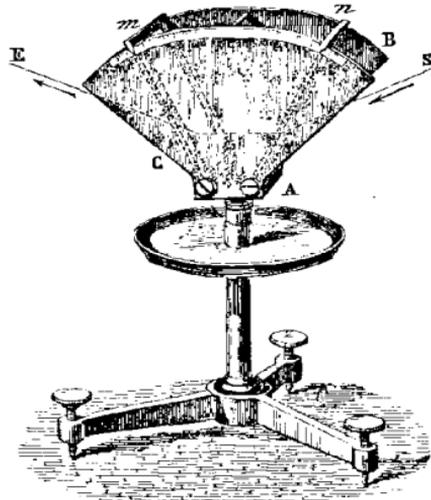


Fig. 414.

rayon émergent, c'est l'angle de déviation. Cet angle augmente avec l'indice de réfraction et avec l'angle réfringent du prisme. Il varie aussi avec 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 (526), quand on connaît l'angle d'incidence du rayon et l'angle réfringent du prisme.

On démontre que l'angle de déviation augmente avec l'indice de réfraction au moyen du *polyprisme*. On nomme ainsi un prisme formé de plusieurs prismes de même angle, réunis par leurs sections à la suite les uns des autres (fig. 413); ils sont de substances inégalement réfringentes, par exemple de verre, de flint, de cristal de roche, de crown. Or, si l'on regarde une ligne droite à travers le polyprisme, les différentes parties en sont vues à des hauteurs inégales. La portion la plus relevée est celle vue à travers le flint, dont l'indice de réfraction est le plus grand; puis celle qui est vue à travers le cristal de roche, et ainsi de suite dans l'ordre des indices de réfraction décroissants; d'où l'on con-

clut que l'angle de déviation dans les différents prismes diminue avec l'indice de réfraction.

Pour montrer que l'angle de déviation croît avec l'angle réfringent du prisme, on fait usage du *prisme à angle variable*. Celui-ci se compose de deux plaques de cuivre parallèles B et C, fixées sur un pied (fig. 414). Entre les plaques sont deux glaces m et n mobiles sur charnières, et pouvant glisser entre les plaques à frottement dur, de manière à fermer hermétiquement. En versant dans le vase ainsi formé de l'eau, ou un autre liquide plus réfringent, et en inclinant plus ou moins les glaces, on a un prisme à angle variable. En recevant sur l'une d'elles un rayon lumineux S, et en inclinant l'autre de plus en plus, l'angle du prisme croît, et on voit la déviation du rayon émergent E augmenter.

524. Application des prismes rectangles comme réflecteurs. —

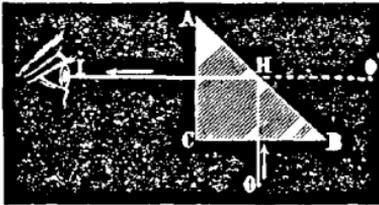


Fig. 415.

Les prismes dont la section principale est un triangle rectangle isocèle offrent une application importante de la réflexion totale (519). En effet, soient ABC (fig. 415) la section principale d'un pareil prisme, O un point lumineux et OH un rayon perpendiculaire à la face BC.

Ce rayon, entrant dans le verre sans se réfracter (515), va faire avec la grande face AB un angle égal à B, c'est-à-dire de 45 degrés, et par suite plus grand que l'angle limite du verre, lequel est de $41^{\circ}48'$ (519). Le rayon OH subit donc en H la réflexion totale, qui lui imprime une direction HI perpendiculaire à la seconde face AC. La grande face du prisme produit donc ici l'effet du miroir plan le plus parfait, et un œil placé en I voit en O' l'image du point O. Cette propriété des prismes rectangles est utilisée dans plusieurs instruments d'optique.

* **525. Condition d'émergence dans les prismes.** — Les rayons lumineux qui se sont réfractés à la première face d'un prisme ne peuvent émerger à la deuxième qu'autant que l'angle réfringent du prisme est moindre que le double de l'angle limite de la substance dont le prisme est formé.

En effet, en représentant par LI (fig. 416) le rayon incident sur la première face, par IE ce rayon réfracté, par PI et PE les normales, on sait que le rayon IE ne peut émerger à la seconde face que si l'angle d'incidence IEP est moindre que l'angle limite (519). Or l'angle d'incidence NIL augmentant, il en est de même de l'angle EIP, tandis que IEP diminue. Par conséquent, plus la direction du rayon LI approche d'être parallèle à la face AB, plus ce rayon tend à donner un rayon émergent à la seconde face.

Soit donc le cas où LI serait parallèle à AB, l'angle τ est alors égal à l'angle limite l du prisme, puisqu'il a sa valeur maximum. D'ailleurs l'angle EPK, ex-

térieur au triangle IPE, égale $r+i'$; mais les angles EPK et A sont égaux comme ayant leurs côtés perpendiculaires; donc $A=r+i'$; donc aussi $A=l+i'$, puisque, dans le cas que nous considérons, $r=l$. Par conséquent, si $A=2l$, ou est $>2l$, on aura $i'=l$, ou $>l$; il ne saurait donc y avoir émergence sur la seconde face, mais réflexion intérieure et émergence seulement à la troisième face BC. A plus forte raison, il en sera de même encore pour les rayons dont l'angle d'incidence est moindre que BIN, puisqu'on a vu ci-dessus que l'angle i' va alors en croissant. Ainsi, dans le cas où l'angle réfringent est égal à $2l$ ou plus grand, aucun rayon lumineux ne peut passer à travers les faces de cet angle.

L'angle limite du verre étant $41^{\circ}48'$, le double de cet angle est plus petit que 90° degrés; d'où l'on conclut qu'on ne peut voir les objets à travers un prisme de verre dont l'angle réfringent est droit. L'angle limite de l'eau étant $48^{\circ}35'$, la lumière peut encore traverser l'angle droit d'un prisme rectangle creux qui serait formé par trois glaces et rempli d'eau.

Lorsqu'on a $A < 2l$, il y a toujours émergence, à la seconde face,

d'une partie de la lumière qui tombe sur la première, et la quantité de lumière qui passe dépend de l'incidence des rayons directs LI. Si A est compris entre l et $2l$, une partie des rayons incidents compris dans l'angle NIB peuvent émerger; mais tous ceux compris dans l'angle NIA éprouvent la réflexion totale sur la face AC. Pour $A > 0$ et $< l$, tous les rayons compris dans l'angle NIB et une partie de ceux contenus dans l'angle NIA peuvent passer.

* 526. **Déviation minimum.** — Lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire

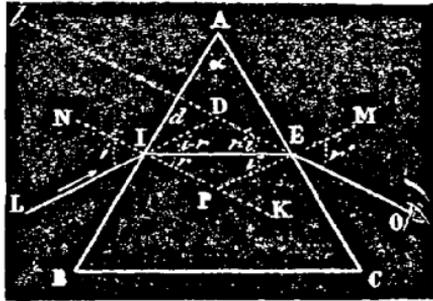


Fig. 416.

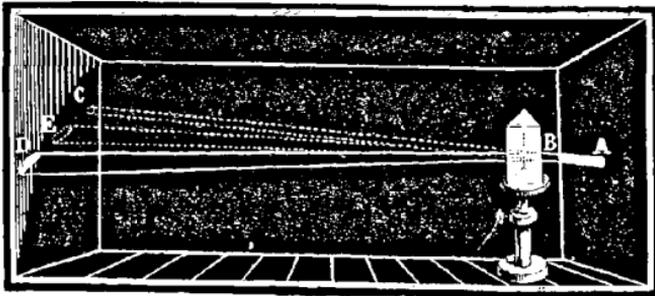


Fig. 417.

à travers une ouverture A pratiquée dans le volet d'une chambre obscure (fig. 417), on remarque que le faisceau va se projeter suivant une droite AC sur un écran éloigné. Mais si l'on interpose un prisme vertical entre l'ouverture du volet et l'écran, le faisceau est porté vers la base du prisme et vient se projeter en D, loin du point C. Or, si l'on tourne alors le support qui porte le prisme de manière que l'angle d'incidence décroisse, on voit le faisceau D se rapprocher du point C jusqu'à une certaine position E, à partir de laquelle il revient sur lui-même, lorsqu'on continue à tourner le prisme dans le même sens. Il y a donc une dévia-

tion EBC plus petite que toutes les autres. Cette *déviatiou minimum* a lieu quand les angles d'incidence et d'émergence sont égaux.

L'angle de déviatiou minimum peut se déterminer par le calcul quand on connaît l'angle d'incidence et l'angle réfringent du prisme. En effet, lorsqu'il y a déviatiou minimum, l'angle d'émergence r' est égal à l'angle d'incidence i (fig. 416). Or on a vu ci-dessus (525) que $A = r + i'$; donc $A = 2r$ [1]. Cela posé, si l'on représente par d l'angle de déviatiou minimum $\angle DL$, cet angle étant extérieur au triangle DIE, on trouve facilement l'égalité

$$d = i - r + r' - i' = 2i - 2r, \text{ ou } d = 2i - A \text{ [2],}$$

laquelle fait connaître l'angle d quand les angles i et A sont donnés.

Des formules [1] et [2] on en tire une troisième qui sert à calculer l'indice de réfraction d'un prisme, quand on connaît son angle réfringent et la déviatiou minimum. En effet, si dans l'égalité $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ (517), on remplace i et r par leurs

$$\text{valeurs tirées des formules [1] et [2] ci-dessus, il vient } n = \frac{\sin\left(\frac{A+d}{2}\right)}{\sin\frac{A}{2}} \text{ [3].}$$

* 527. **Mesure de l'indice de réfraction des solides.** — Au moyen de la formule [3] ci-dessus, on calcule facilement l'indice de réfraction quand les angles A et d sont connus.

Pour déterminer d'abord l'angle A , on taille sous la forme de prisme trian-

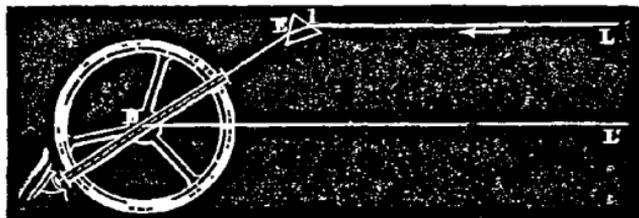


Fig. 418.

gulaire la substance transparente dont on veut avoir l'indice de réfraction; puis on mesure l'angle A du prisme au moyen d'un *goniomètre* (518).

Quant à l'angle d , on le mesure de la manière suivante. On reçoit sur le prisme un rayon LI émis par un objet éloigné (fig. 418), et l'on tourne le prisme de manière à obtenir la déviatiou minimum ED. Mesurant alors avec un cercle gradué l'angle EDL' que fait le rayon réfracté DE avec le rayon DL' qui vient directement de l'objet, cet angle n'est autre que l'angle de déviatiou minimum, en admettant que l'objet est assez éloigné pour que les deux rayons LI et L'D soient parallèles. Il ne reste plus qu'à substituer les valeurs de A et de d dans la formule [3] pour en déduire la valeur de l'indice n .

Ce procédé est dû à Newton. En l'appliquant successivement aux principales raies de Fraunhofer (554), on détermine avec précision les indices qui correspondent aux différentes couleurs du spectre solaire (544).

* 528. **Mesure de l'indice de réfraction des liquides.** — Biot a appliqué la méthode de Newton, c'est-à-dire celle du minimum de déviatiou, à la recherche de l'indice de réfraction des liquides. Pour cela, dans un prisme de verre PQ (fig. 419), on perce une cavité cylindrique O d'environ 2 centimètres de diamètre et allant de la face d'incidence à la face d'émergence. Cette cavité se ferme

au moyen de deux plaques de verre à faces parallèles, qui s'appliquent sur les faces du prisme. Une petite ouverture B, qui se ferme avec un bouchon à l'émeri, sert à introduire les liquides. Ayant déterminé l'angle réfringent et la déviation minimum du prisme liquide compris dans la cavité O, on introduit la valeur de ces angles dans la formule [3] (526), ce qui donne l'indice.

* 529. *Mesure de l'indice de réfraction des gaz.* — C'est encore par la méthode de Newton que l'indice de réfraction des gaz a été déterminé par Biot et Arago. L'appareil dont se sont servis ces physiciens se compose d'un tube de verre AB (fig. 420), taillé en biseau à ses extrémités, et fermé par deux plaques de verre à faces parallèles, inclinées entre elles de 143 degrés. Ce tube est en communication, d'une part avec une cloche H, dans laquelle est un baromètre à siphon, de l'autre avec un robinet à l'aide duquel on peut faire le vide dans l'appareil et y introduire ensuite différents gaz. Après avoir fait le vide dans le tube AB, on le fait traverser par un rayon de lumière SA, qui s'écarte de la normale d'une quantité $r - i$ à la première incidence, et s'en approche d'une quantité $i' - r'$ à la deuxième. Ces deux déviations s'ajoutant, la déviation totale d est $r - i + i' - r'$. Or dans le cas de la déviation minimum, on a $i = r'$ et $r = i'$, d'où $d = A - 2i$, puisque $r + i' = A$

(525). L'indice du vide à l'air, qui est $\frac{\sin r}{\sin i}$, égale donc $\frac{\sin \frac{A}{2}}{\sin \left(\frac{A-d}{2} \right)}$ [4].

D'où il suffit de connaître l'angle réfringent A et l'angle de déviation mini-

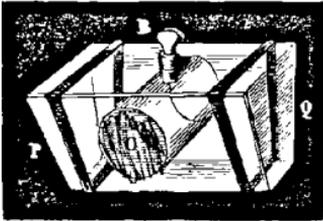


Fig. 419.

mum d , pour en déduire l'indice de réfraction du vide à l'air, c'est-à-dire l'indice absolu, ou indice principal (517).

Pour obtenir l'indice absolu d'un gaz autre que l'air, après avoir fait le vide dans l'appareil, on y fait passer ce gaz; puis mesurant les angles A et d , la formule [4] et-dessus fait connaître l'indice de réfraction du gaz à l'air. Connaissant déjà l'indice du vide à l'air, le rapport de ces deux indices donne l'indice de réfraction du vide au gaz donné, c'est-à-dire son indice absolu.

Au moyen de cet appareil, Biot et Arago ont constaté que les indices de réfraction des gaz sont toujours très-petits par rapport à ceux des solides et des liquides, et que, pour un même gaz, la puissance réfractive est proportionnelle à la densité, en appelant puissance réfractive d'une substance le carré de son indice de réfraction diminué d'une unité, c'est-à-dire l'expression $n^2 - 1$. Le quotient de la puissance réfractive par la densité se nomme *pouvoir réfringent*.

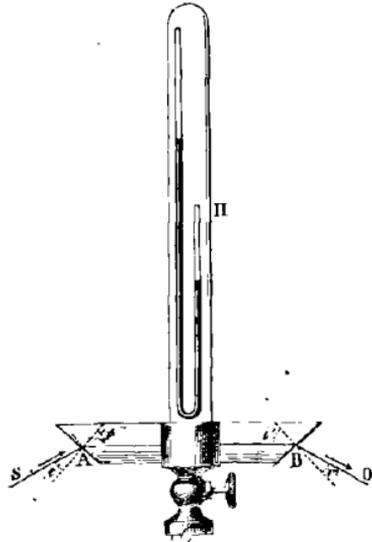


Fig. 420.

Indices de réfraction par rapport à l'air.

SUBSTANCES	INDICES	SUBSTANCES	INDICES
Chromate de plomb.	2,50 à 2,97	Obsidienne.	1,488
Diamant.	2,47 à 2,75	Glace.	1,310
Verre d'antimoine.	2,216	Sulfure de carbone	1,678
Soufre natif.	2,215	Huile essentielle d'aman-	
Tourmaline	1,668	des amères	1,003
Spath d'Islande, réf. ord.	1,654	Huile de naphte.	1,475
— — réf. ext.	1,483	Essence de térébenthine .	1,470
Béryl.	1,598	Alcool rectifié	1,374
Flint-glass.	1,575	Éther sulfurique.	1,358
Cristal de roche.	1,547	Albumine	1,351
Sel gemme.	1,545	Cristallin.	1,384
Sucre	1,535	Humeur vitrée.	1,339
Baume de Canada.	1,532	Humeur aqueuse	1,337
Crown-glass	1,500	Eau.	1,336

Ces indices ont été pris par rapport au faisceau jaune du spectre, excepté ceux du sucre et du crown, qui l'ont été par rapport au rouge extrême.

M. Fizeau a constaté que les indices de réfraction varient avec la température. Pour le cristal ordinaire, par exemple, l'indice augmente en même temps que la température, l'inverse a lieu pour le spath fluor.

LENTILLES, LEURS EFFETS

530. **Différentes espèces de lentilles.** — On nomme *lentilles* des milieux transparents qui, vu la courbure de leurs surfaces, ont la propriété de faire converger ou diverger les rayons lumineux qui les traversent. Suivant le genre de cette courbure, les lentilles sont dites *sphériques*, *cylindriques*, *elliptiques*, *paraboliques*. Les lentilles sphériques sont les seules en usage dans les instruments d'optique. Elles sont généralement de *crown-glass*, verre qui contient peu de plomb, ou de *flint-glass*, verre qui en contient beaucoup et est plus réfringent que le crown.

En combinant des surfaces sphériques entre elles, ou avec des surfaces planes, on obtient six espèces de lentilles, représentées en coupe dans la figure 421 : quatre sont formées par deux surfaces sphériques, et deux par une surface plane et une surface sphérique. La première, A, est dite *biconvexe*; la seconde, B, *plan-convexe*; la troisième, C, *concave-convexe convergente*; la quatrième, D, *biconcave*; la cinquième, E, *plan-concave*; et la dernière, F, *concave-convexe divergente*. La lentille C s'appelle aussi *ménisque convergent*, et la lentille F, *ménisque divergent*.

Les trois premières, qui sont plus épaisses au centre que sur les bords, sont *convergentes*; les dernières, qui sont plus minces au centre, sont *divergentes*. Dans le premier groupe, il suffit de considérer la lentille biconvexe, et dans le second, la lentille biconcave, les propriétés de chacune de ces lentilles s'appliquant à toutes celles du même groupe.

Dans les lentilles dont les deux surfaces sont sphériques, les

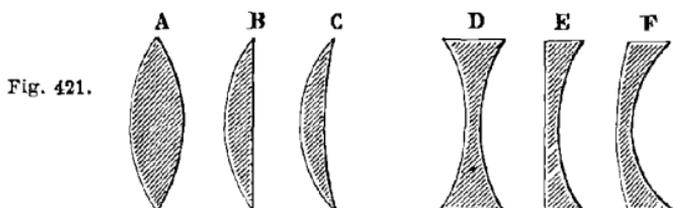


Fig. 421.

centres de ces surfaces sont dits *centres de courbure*; la droite menée par ces deux centres est l'*axe principal*. Dans une lentille plan-concave ou plan-convexe, l'axe principal est la perpendiculaire abaissée du centre de la face sphérique sur la face plane.

On nomme *section principale* d'une lentille toute section faite par un plan passant par l'axe principal. Dans toutes les constructions sur les lentilles, on ne considère que des rayons lumineux situés dans une même section principale.

Pour comparer la marche des rayons dans les lentilles à celle qui a lieu dans les prismes, on fait la même hypothèse que pour les miroirs courbes (499); c'est-à-dire qu'on suppose les surfaces formées d'une infinité d'éléments plans infiniment petits. La *normale* en un point quelconque est alors la perpendiculaire au plan tangent qui contient l'élément correspondant, et l'on sait, en géométrie, que toutes les normales à une même surface sphérique vont passer par son centre. Dans l'hypothèse ci-dessus, on peut concevoir, aux points d'incidence et d'émergence, deux surfaces planes plus ou moins inclinées entre elles, produisant l'effet du prisme. En continuant cette comparaison, on peut assimiler les trois lentilles A, B, C, à une suite de prismes réunis par leurs bases, et les lentilles D, E, F, à une suite de prismes réunis par leurs sommets; ce qui montre comment les premières doivent rapprocher les rayons, et les dernières les écarter, puisqu'on a vu qu'un rayon lumineux qui traverse un prisme dévie vers la base (523).

531. **Foyers des lentilles biconvexes.** — Dans les lentilles, de même que dans les miroirs, on nomme *foyers* les points où vont concourir les rayons réfractés ou leurs prolongements; ils se divisent encore en foyer principal, foyer conjugué et foyer virtuel.

1^o *Foyer principal.* — Soit d'abord, ainsi que nous l'avons fait pour les miroirs, le cas où les rayons qui tombent sur la lentille sont parallèles à son axe principal (fig. 422), ce qui suppose l'objet lumineux placé à une grande distance. Tout rayon LB, subissant les mêmes déviations qu'à travers un prisme (523), se

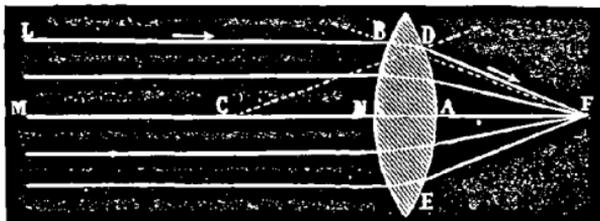


Fig. 422.

réfracte au point d'incidence B en se rapprochant de l'axe principal d'une quantité donnée par l'indice n ; puis, à l'émergence D, il s'en rapproche encore d'une quantité donnée par l'indice de retour $\frac{1}{n}$ (517), et vient enfin couper l'axe en F. Les autres rayons se comportant de la même manière, le calcul et l'expérience font voir que, tant que l'*ouverture* de la lentille, c'est-à-dire l'arc DE, ne dépasse pas 10 à 12 degrés, tous les rayons parallèles à l'axe vont très-sensiblement concourir en F. Ce point est le *foyer principal*, et la distance AF la *distance focale principale*. Elle est constante pour une même lentille, mais varie avec le rayon de courbure et l'indice de réfraction. Dans les lentilles ordinaires, qui sont de crown, le foyer principal coïncide très-approximativement avec le centre de courbure (541).

Réciproquement, si l'objet lumineux est placé au foyer principal, les rayons émergents sortent parallèles à l'axe. L'intensité ne décroît alors que très-lentement par l'absorption par l'air, et une seule lampe suffit pour éclairer à une grande distance.

2^o *Foyer conjugué.* — Soit actuellement le cas où l'objet lumineux, placé au delà du foyer principal, est assez rapproché pour que les rayons incidents soient divergents (fig. 423). Le point lumineux étant en L, si l'on compare le rayon incident LB au rayon SB parallèle à l'axe, on reconnaît que le premier fait avec la normale un angle d'incidence LBn plus grand que l'angle SBn ; il doit donc aussi faire un angle de réfraction plus grand. Par suite, après avoir traversé la lentille, il rencontre l'axe en un point l plus éloigné que le foyer principal F. Tous les rayons partis du point L venant ainsi concourir sensiblement au même point l ,

ce dernier est le *foyer conjugué* du point L . Cette dénomination exprime ici, de même que dans les miroirs, la relation qui existe entre les deux points L et l , relation telle, que si le point lumineux est porté en l , réciproquement le foyer passe en L .

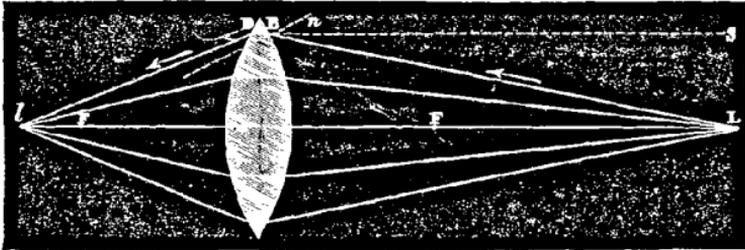
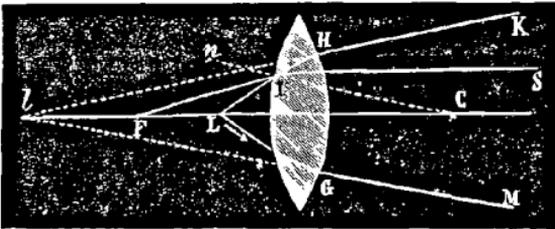


Fig. 423.

A mesure que l'objet L s'approche de la lentille, la divergence des rayons incidents et des rayons émergents augmente, et le foyer conjugué l s'éloigne. Si L coïncide avec le foyer principal, les rayons émergents sortent parallèles à l'axe, et alors il n'y a pas de foyer, ou, ce qui est la même chose, il se fait à l'infini.

3^o *Foyer virtuel*. — Enfin, soit le cas où le point lumineux L est placé entre la lentille et son foyer principal (fig. 424); le foyer est alors virtuel. En effet, tout rayon incident LI faisant avec la normale un angle d'incidence $LI n$ plus grand que l'angle $FI n$ que

Fig. 424.



fait, avec la même normale Cn , le rayon FI émis du foyer, le premier rayon, à l'émergence, s'éloigne nécessairement plus que le second de l'axe principal; il sort donc divergent suivant HK . Le faisceau divergent $KHGM$ ainsi formé ne peut donner aucun foyer réel; mais ses rayons prolongés allant concourir au point l situé sur l'axe, ce point est le *foyer virtuel* de L . Plus L se rapproche de la lentille, plus le foyer virtuel l s'en rapproche aussi.

532. **Centre optique, axes secondaires.** — Pour toute lentille, il existe un point nommé *centre optique*, qui est situé sur l'axe, et

jouit de cette propriété, que tout rayon passant par ce point n'éprouve pas de déviation angulaire, c'est-à-dire que le rayon émergent est parallèle au rayon incident. Pour démontrer l'existence de ce point dans une lentille biconvexe, soient menés, à ses deux surfaces, deux rayons de courbure parallèles CA et C'A' (fig. 425). Les deux éléments plans qui appartiennent à la surface de la lentille en A et A' étant parallèles entre eux, comme perpendiculaires à deux droites parallèles, tout rayon KA, qui se propage dans la lentille suivant AA', traverse en réalité un milieu à faces parallèles, et par conséquent sort sans déviation, c'est-à-dire suivant une direction A'K' parallèle à AK (521). Le point O, où ce rayon coupe l'axe, est toujours le même, quels que soient les éléments A, A'. En effet, si les rayons CA et C'A' sont égaux, ce qui est le cas général, les triangles CAO et C'A'O le sont aussi, et l'on a $CO = C'O$; ce qui fait voir que, dans ce cas, le point O est le milieu de CC'. Si les rayons CA et C'A' sont inégaux, les triangles COA et C'OA' sont semblables; et l'on a $\frac{CA}{C'A'} = \frac{CO}{C'O}$. Or, le rapport $\frac{CA}{C'A'}$, étant invariable, quels que soient les deux éléments parallèles A, A', on voit qu'il en est de même du rapport $\frac{CO}{C'O}$; ce qui exige que la position du point O soit constante, seulement ce point n'est plus le milieu de CC'. Le point O ainsi

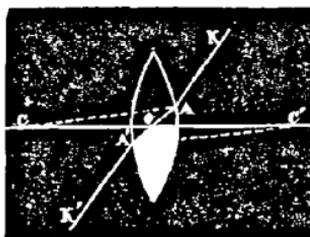


Fig. 425.

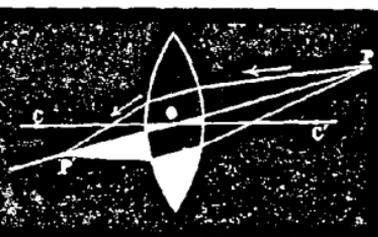


Fig. 426.

obtenu est le *centre optique* de la lentille. Dans tous les cas, on le détermine en tirant deux rayons de courbure parallèles CA et C'A', et en joignant leurs deux extrémités par une droite AA'.

Dans les lentilles biconcaves ou concaves-convexes, le centre optique se détermine par la même construction que ci-dessus. Dans les lentilles qui ont une face plane, ce point est à l'intersection même de l'axe par la face courbe.

Toute droite PP' (fig. 426) qui passe par le centre optique sans

passer par les centres de courbure, est un *axe secondaire*. D'après la propriété du centre optique, tout axe secondaire représente un rayon lumineux rectiligne passant par ce point; car, vu la petite épaisseur des lentilles, on peut admettre que les rayons qui passent par le centre optique restent en ligne droite, c'est-à-dire qu'on peut négliger la petite déviation qu'éprouvent les rayons, tout en restant parallèles, lorsqu'ils traversent obliquement un milieu à faces parallèles (fig. 410, page 473).

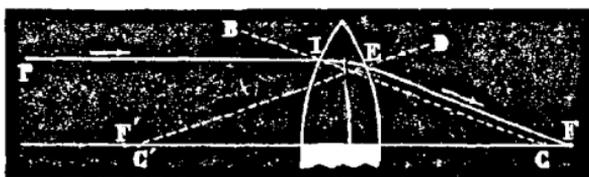
Tant que les axes secondaires ne font avec l'axe principal qu'un petit angle, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit jusqu'ici de l'axe principal; c'est-à-dire que les rayons émis d'un point P (fig. 426), situé sur un axe secondaire PP', viennent, à très-peu près, concourir en un même point P' de cet axe, où ils forment un foyer qu'on désigne encore sous le nom de *foyer conjugué*.

533. Détermination expérimentale des foyers dans les lentilles biconvexes. — Dans les lentilles biconvexes, comme dans les miroirs concaves, on détermine expérimentalement le foyer principal en recevant sur la lentille un faisceau solaire parallèle à l'axe principal; puis on cherche avec un écran, de l'autre côté de la lentille, le point où va se concentrer le faisceau; là est le foyer principal.

De même, pour avoir le foyer conjugué d'un point pris sur l'axe principal au delà du foyer, on place au point donné la flamme d'une bougie, et l'on cherche avec un écran, de l'autre côté de la lentille, le point où vont concourir les rayons lumineux.

534. Détermination graphique des foyers dans les lentilles biconvexes. — 1^o *Foyer principal.* — Les centres de courbure C et C'

Fig. 427.



étant connus, soit un rayon incident PI parallèle à l'axe principal (fig. 427). Menant au point I la normale CB, l'angle d'incidence PIB se trouve déterminé, et la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ (517) fait ensuite connaître l'angle de réfraction CIE, c'est-à-dire la direction du rayon réfracté IE. Tirant la normale C'D, on a au point E l'angle d'incidence IEC', et la formule $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{1}{n}$ fait trouver l'angle d'émergence DEF, et par suite le foyer principal F. Les deux rayons de

courbure étant supposés égaux, un second foyer principal F' existe à la même distance de l'autre côté de la lentille.

2° *Foyer conjugué.* — Le foyer conjugué d'un point situé sur l'axe principal se déterminerait par la même construction que

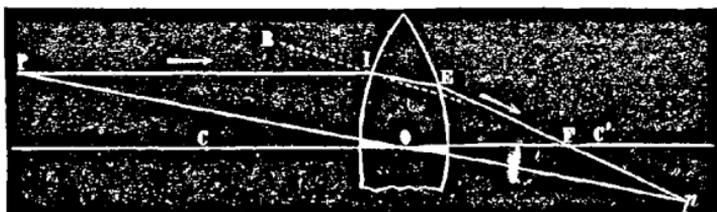


Fig. 428.

celle qui précède pour le foyer principal; mais, pour un point situé en dehors de l'axe, supposant connu le foyer principal, il est plus simple, ainsi qu'on l'a déjà fait pour les miroirs (502), de considérer un rayon qui, parallèle à l'axe, aille passer par le foyer principal. En effet, soit le point lumineux placé au-dessus de l'axe principal en P (fig. 428). Tirant un rayon incident PI parallèle à l'axe, ce rayon, après s'être réfracté deux fois dans le même sens, en I et en E , est astreint à passer par le foyer principal F (531). Joignant donc les points E et F par une droite, son prolongement va couper l'axe secondaire PO en un point p , qui est le foyer conjugué de P . Dans cette construction et dans les suivantes, le rayon IE n'est pas déterminé rigoureusement; il ne peut l'être que par l'emploi de la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$.

On simplifie la construction en réunissant les deux réfractions

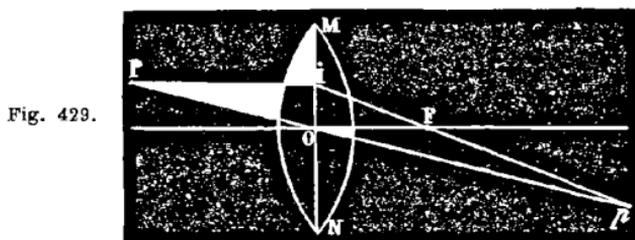
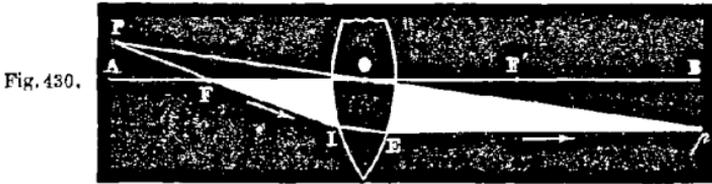


Fig. 429.

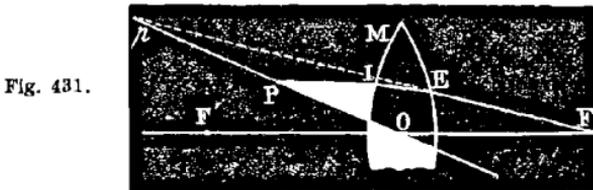
en une seule, comme le montre la figure 429. On prolonge alors le rayon parallèle jusqu'à sa rencontre en I avec la droite MN , qui joint deux points opposés des bords de la lentille; puis, par le point I et par le foyer principal F , on tire une droite qui, prolongée, fait trouver le foyer conjugué p .

Enfin, au lieu de faire usage d'un rayon parallèle à l'axe principal pour déterminer le foyer conjugué d'un point P donné hors de l'axe, on peut, par le point P et par le foyer F , tirer un rayon incident PI qui, après deux réfractions en I et en E , sort parallèle



à l'axe principal (fig. 430). Le point p où il coupe l'axe secondaire PO est le foyer conjugué cherché.

3^o *Foyer virtuel.* — On sait (531, 3^o) que pour qu'il y ait foyer virtuel, le point lumineux doit être placé à une distance de la lentille moindre que la distance focale principale. Soit donc un point P satisfaisant à cette condition (fig. 431); menant encore un rayon incident PI parallèle à l'axe FF' , ce rayon qui, à l'émergence, va passer par le foyer F , sort divergent par rapport à l'axe secon-



daire PO , et son prolongement de l'autre côté de la lentille donne le foyer virtuel p .

535. **Construction des images réelles dans les lentilles biconvexes.** — Soit un objet lumineux AB placé devant une lentille biconvexe à une distance plus grande que la distance focale principale (fig. 432). Réduisant la construction à celle des foyers conjugués des points A et B (534), on mène les axes secondaires AO et BO , et du point A un rayon AI , parallèle à l'axe principal. Ce rayon, après avoir traversé la lentille, passe par le foyer principal F et va former en a l'image du point A . Un rayon parallèle tiré de B donnant de même en b l'image de B , on a en ab l'image de AB .

Cette image est *réelle et renversée*. Pour la voir, il faut la recevoir sur un écran blanc qui la réfléchit dans toutes les directions, ou placer l'œil sur le prolongement des rayons émergents : on

aperçoit ainsi, dans l'espace, une image qui, de même que dans les miroirs concaves, est une image aérienne (503).

Lorsque l'objet coïncide avec le foyer principal, l'image est à

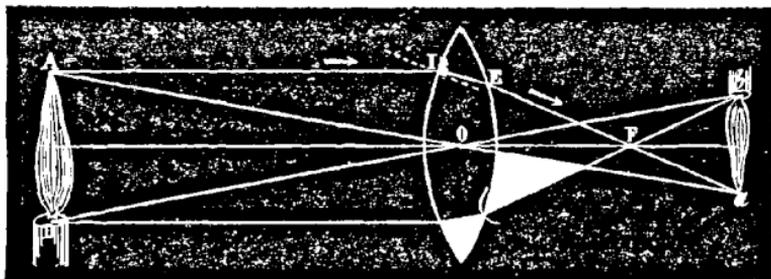


Fig. 432.

l'infini, c'est-à-dire qu'il n'y a plus d'image. En effet, les rayons émis de A (fig. 433) donnant, à l'émergence, un faisceau parallèle DE, et ceux émis de B un faisceau parallèle GH, il n'y a plus concours des rayons à aucune distance, et par suite pas d'image. Si l'objet est entre la lentille et le foyer principal, on va voir ci-après (537) que l'image est virtuelle.

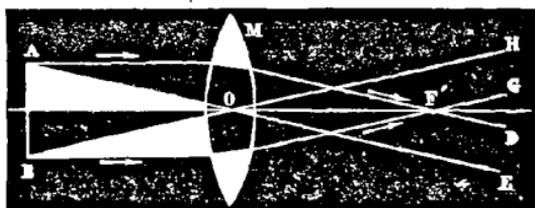


Fig. 433.

536. Relation entre la grandeur de l'image et celle de l'objet.

— Par l'expérience et par la formule des lentilles biconvexes donnée plus loin (541), on trouve la relation suivante entre la grandeur de l'objet et celle de l'image :

1^o Lorsque l'objet est en avant de la lentille, à une distance double de la distance focale, l'image est à la même distance de l'autre côté, et de même grandeur que l'objet.

2^o Si l'objet est à une distance plus grande que le double de la distance focale, l'image est plus petite que l'objet, et plus grande dans le cas contraire.

Enfin, dans les lentilles biconvexes, de même que dans les miroirs concaves, la position de l'image est réciproque de celle de

l'objet; c'est-à-dire que celui-ci passant en ab , son image se forme en AB (fig. 432).

537. **Construction de l'image virtuelle dans les lentilles biconvexes.** — Soit actuellement le cas où l'objet AB est placé entre la

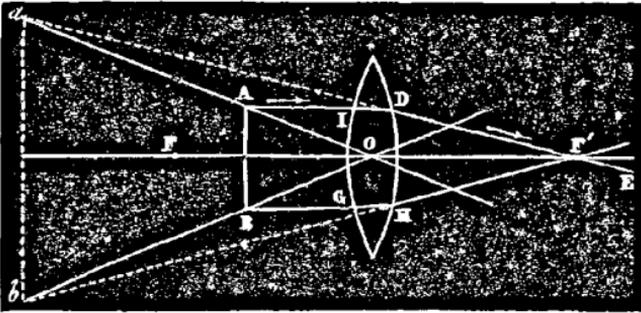


Fig. 434.

lentille et son foyer principal F (fig. 434). Étant menés les axes secondaires AO et BO, le rayon incident AI, parallèle à l'axe principal, donne, après s'être réfracté deux fois vers l'axe, un rayon émergent DE qui va passer par le second foyer principal F' , et dont le prolongement rencontre l'axe secondaire OA en un point a qui est le foyer virtuel de A. Le foyer virtuel de B se forme de même en b , on a en ab l'image de AB. Cette image est redressée, virtuelle et plus grande que l'objet.

Les lentilles biconvexes, ainsi employées comme verres grossissants, prennent le nom de *loupes* ou de *microscopes simples*.

538. **Foyers dans les lentilles biconcaves.** — Avec les lentilles biconcaves, il ne se forme que des foyers virtuels, quelle que soit

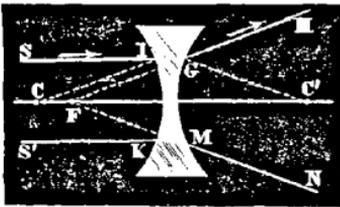


Fig. 435.

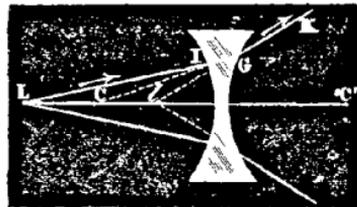


Fig. 436.

la distance de l'objet. Soit d'abord un faisceau SS' de rayons parallèles à l'axe (fig. 435) : le rayon SI se réfracte au point d'incidence I en s'approchant de la normale CI. Au point d'émergence G, il se réfracte de nouveau, mais en s'écartant de la normale GC,

en sorte qu'il se brise deux fois dans le même sens pour s'éloigner de l'axe CC' . La même chose ayant lieu pour le rayon $S'K$, les rayons, après avoir traversé la lentille, forment un faisceau divergent $GHMN$. Il ne peut donc y avoir de foyer réel; mais les prolongements de ces rayons se rencontrent, sur l'axe principal, en un point F , qui est le foyer virtuel principal.

Dans le cas où les rayons partent d'un point L (fig. 436) situé sur l'axe, on trouve, par la même construction, qu'il se forme un foyer virtuel en l , entre le foyer principal et la lentille.

539. Détermination expérimentale du foyer principal dans les lentilles biconcaves. — Pour trouver le foyer principal d'une lentille biconcave, on recouvre une de ses faces

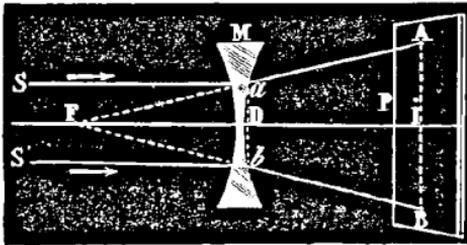


Fig. 437.

parallèlement à l'axe, un faisceau de lumière solaire SS' , on avance ou l'on recule l'écran P , qui reçoit les rayons émergents, jusqu'à ce que la distance des images projetées A et B soit double de ab . Négligeant l'épaisseur centrale de la lentille, l'intervalle DI est alors égal à la distance focale FD , d'après la similitude des triangles Fab et FAB .

540. Construction des images dans les lentilles biconcaves. — Les

lentilles biconcaves, comme les miroirs convexes, ne donnent que des images virtuelles, quelque soit la distance de l'objet.

Soit, en effet, un objet AB (fig. 438) placé devant une pareille lentille. Tirant

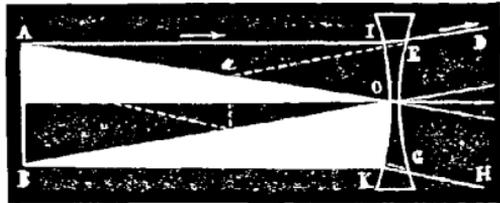


Fig. 438.

les axes secondaires AO et BO , tout rayon AI parallèle à l'axe principal se réfracte deux fois, en I et en E , pour s'écarter de cet axe; et le rayon émergent ED , prolongé, allant passer par le foyer principal (531, 3^o), le point a , où il coupe l'axe secondaire AO , est

l'image virtuelle du point A. L'image du point B se construisant de la même manière en b , on a en ab l'image de AB, laquelle est toujours *virtuelle, redressée et plus petite que l'objet*. On ne peut la voir qu'en plaçant l'œil dans la direction du faisceau émergent; c'est-à-dire qu'elle est *aérienne*.

* 541. **Formules relatives aux lentilles.** — Dans toute lentille, on peut traduire en équation la relation qui existe entre la distance de l'image, celle de l'objet, les rayons de courbure et l'indice de réfraction. Soit d'abord une lentille biconvexe. P étant un point lumineux situé sur l'axe (fig. 439), soient PI un rayon incident, IE sa direction dans l'intérieur de la lentille, EP' le rayon émergent, en sorte que P' est le foyer conjugué de P. Soient encore C'1 et OE les normales aux points d'incidence et d'émergence, et posons $\angle PA = \alpha$, $\angle EP'A' = \epsilon$, $\angle ECA' = \gamma$, $\angle IC'A = \delta$, $\angle NIP = i$, $\angle EIO = r$, $\angle IEO = i'$, $\angle N'EP' = r'$.

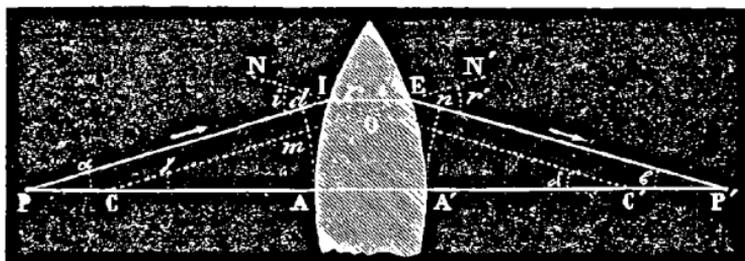


Fig. 439.

Les angles i et r' étant extérieurs, l'un au triangle PIC' , l'autre au triangle CEP' , on a $i = \alpha + \delta$, et $r' = \gamma + \epsilon$, d'où $i + r' = \alpha + \epsilon + \gamma + \delta$ [1]. Or au point I , on a $\sin i = n \sin r$, et au point E , $\sin r' = n \sin i'$ (517); mais en supposant l'arc AI d'un très-petit nombre de degrés, les angles i, r, i' et r' sont très-petits, et l'on peut remplacer, dans la formule ci-dessus, les sinus par leurs arcs, ce qui donne $i = nr$ et $r' = ni'$; d'où $i + r' = n(r + i')$. D'ailleurs, les deux triangles IOE et $CO'E'$ ayant l'angle O égal, on a $r + i' = \gamma + \delta$, d'où $i + r' = n(\gamma + \delta)$. Portant cette valeur dans l'équation [1], il vient

$$n(\gamma + \delta) = \alpha + \epsilon + \gamma + \delta, \text{ ou } (n-1)(\gamma + \delta) = \alpha + \epsilon [2].$$

Cela posé, si l'on conçoit que les arcs α et γ soient décrits des points P et C comme centres avec un rayon égal à l'unité, et si du point P on décrit l'arc dA avec le rayon PA , on a les proportions $\frac{\alpha}{Ad} = \frac{1}{PA}$, et $\frac{\gamma}{A'E} = \frac{1}{CA'}$; d'où l'on tire $\alpha = \frac{Ad}{AP}$ et $\gamma = \frac{A'E}{CA'}$, ou $\alpha = \frac{AI}{p}$ et $\gamma = \frac{A'E}{R}$, en posant $AP = p$, $CA' = R$, et en remplaçant l'arc Ad par l'arc AI , qui lui est sensiblement égal. Sur l'autre face de la lentille, si l'on suppose encore les arcs ϵ et δ décrits d'un rayon égal à l'unité, et l'arc $A'n$ décrit avec le rayon $P'A'$, en faisant $C'A = R'$, et $A'P' = p'$, on a de même $\delta = \frac{AI}{R'}$, et $\epsilon = \frac{A'n}{P'A'} = \frac{A'E}{p'}$.

Portant ces valeurs dans l'équation [2], il vient

$$(n-1) \left(\frac{A'E}{R} + \frac{AI}{R'} \right) = \frac{AI}{p} + \frac{A'E}{p'}$$

Si l'on admet que les arcs A'E et AI soient égaux, ce qui est d'autant plus près de la vérité que les rayons incidents s'écartent moins de l'axe, on peut supprimer le facteur commun, ce qui donne enfin

$$(n-1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad [3].$$

Telle est la formule des lentilles biconvexes. Si l'on y fait $p = \infty$, on trouve

$$\frac{1}{p'} = (n-1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right),$$

p' désignant alors la distance focale principale. En représentant celle-ci par f , on a

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) \quad [4],$$

équation dont il est facile de tirer la valeur de f . En ayant égard à la formule [4], la formule [3] prend la forme $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ [5],

qui est celle sous laquelle on la considère ordinairement.

Lorsque l'image est virtuelle, p' change de signe, et la formule [5] prend la

forme

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad [6].$$

Dans les lentilles biconcaves, p' et f conservent le même signe, mais celui de p change; la formule [5] devient alors $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$ [7].

Si dans la formule [5] ci-dessus on fait $p = 2f$, on trouve aussi $p' = 2f$; c'est-à-dire qu'un objet étant placé en avant d'une lentille biconvexe, à une distance double de la distance focale, l'image se fait de l'autre côté à la même distance, et par conséquent est de même grandeur. Cette propriété des lentilles fournit le moyen de déterminer expérimentalement leur distance focale principale.

Dans les lentilles biconvexes, les deux rayons de courbure R et R' sont ordinairement égaux. Si l'on introduit cette condition dans la formule [4] ci-dessus,

elle devient $\frac{1}{f} = (n-1) \times \frac{2}{R}$. Or pour les lentilles de crown, $n = \frac{3}{2}$; substituant à n cette valeur, il vient $\frac{1}{f} = \frac{1}{2} \times \frac{2}{R}$, ou $\frac{1}{f} = \frac{1}{R}$; d'où $f = R$. Donc, dans

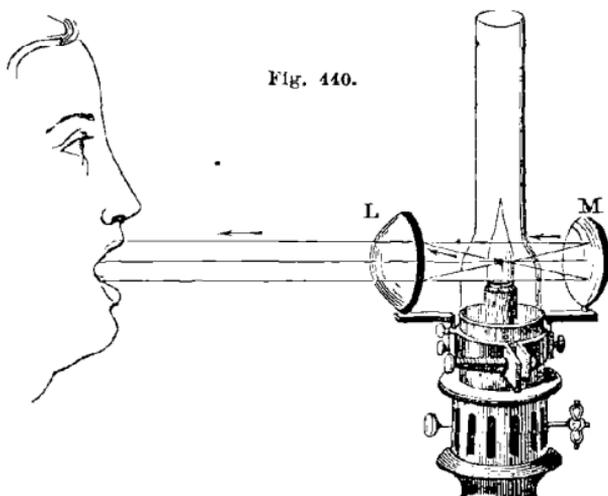
les lentilles de crown, le foyer principal coïncide avec le centre de courbure. Il en est sensiblement de même dans les lentilles de verre ordinaire; avec le flint, la distance focale est plus courte.

* 542. **Aberration de sphéricité, caustiques.** — Dans la théorie des foyers et des images fournis par les différentes espèces de lentilles sphériques, on a admis jusqu'ici que les rayons émis d'un même point allaient, après s'être réfractés, concourir très-sensiblement en un point unique. Il en est ainsi, en effet, quand l'ouverture de la lentille, c'est-à-dire la partie centrale qui reçoit les rayons à travers un diaphragme, ne dépasse pas 10 à 12 degrés. Pour une ouverture plus grande, les rayons qui traversent la lentille loin de l'axe ont leur point de concours plus près que ceux qui la traversent près de l'axe; c'est-à-dire qu'il se produit un phénomène analogue à celui qu'on a observé dans les miroirs (512), sous le nom d'aberration de sphéricité par réflexion, et qu'on désigne ici sous le nom d'aberration de sphéricité par réfraction. Les surfaces brillantes qui se forment alors dans l'espace par l'intersection des rayons réfractés se nomment *caustiques par réfraction*.

L'aberration de sphéricité nuit à la netteté des images. On obvie à ce défaut des lentilles en plaçant au-devant des diaphragmes percés d'une ouverture centrale, de manière à laisser passer les rayons qui se présentent vers le centre,

mais à arrêter ceux qui tendent à se réfracter vers les bords. Du reste, en combinant deux lentilles de courbures convenables, on parvient aussi à détruire l'aberration de sphéricité, en rapprochant les rayons de l'axe.

543. **Laryngoscope.** — Nous donnons ici, comme application des lentilles, un appareil nouvellement imaginé pour faciliter l'observation du larynx et des autres parties internes de la bouche. Quoique nouveau, cet appareil a déjà reçu des formes variées. Il se compose simplement d'un réflecteur concave, ou bien d'un réflecteur et d'une lentille convergente. Telle est la disposition adoptée par



Krysaber (fig. 440). L'appareil consiste en une lentille plan-convexe L et en un réflecteur concave M, fixés tous les deux sur un collier de cuivre qui se monte sur une lampe quelconque. La flamme de celle-ci coïncide avec le foyer principal de la lentille, et, en même temps, avec le centre de courbure du réflecteur. Il en résulte que le faisceau divergent parti de la lampe vers la lentille se change, à sa sortie, en un faisceau parallèle, et que le faisceau qui tombe sur le miroir, revenant sur lui-même au foyer de la lentille, va la traverser pour en sortir en un second faisceau parallèle qui se superpose au premier. En dirigeant cette lumière dans la bouche d'un malade, toute la cavité en est fortement éclairée, et on peut en observer facilement les lésions.

CHAPITRE IV

DISPERSION ET ACHROMATISME

544. **Décomposition de la lumière blanche, spectre solaire.** — Le phénomène de la réfraction n'est pas aussi simple qu'on l'a supposé jusqu'ici : quand la lumière blanche, c'est-à-dire celle qui nous arrive du soleil, passe d'un milieu dans un autre, il n'y a pas seulement déviation, mais la lumière est décomposée en plu-

sieurs espèces de lumières, phénomène que Newton a le premier fait connaître et qu'on désigne sous le nom de *dispersion*.

Pour démontrer que la lumière blanche est décomposée par l'effet de la réfraction, on reçoit dans une chambre obscure un faisceau de lumière solaire SA (fig. 441), à travers une petite ouverture pratiquée dans le volet. Ce faisceau tend à aller former en

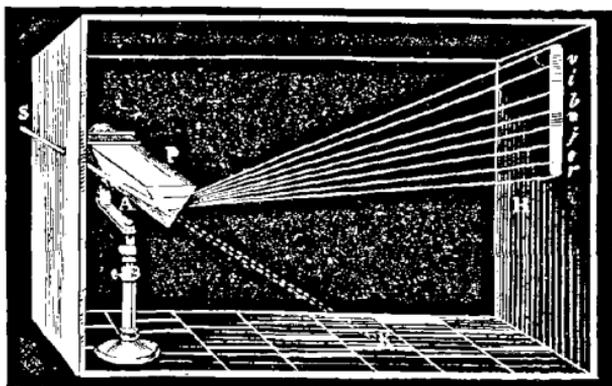


Fig. 441.

K une image ronde et incolore du soleil; mais si l'on interpose sur son passage un prisme de flint-glass P disposé horizontalement, le faisceau, à l'entrée et à la sortie du prisme, se réfracte dans un plan vertical, et, au lieu d'une image ronde et incolore, on reçoit sur un écran éloigné une image H, qui, dans la direction horizontale, est de même dimension que le faisceau primitif, mais oblongue dans le sens vertical, et colorée des belles teintes de l'arc-en-ciel. Newton a donné à cette image colorée le nom de *spectre solaire*. Il existe, en réalité, dans le spectre, une infinité de teintes; mais on en distingue sept principales, disposées, à partir de la plus réfrangible, dans l'ordre suivant : *violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge* (fig. 1 de la planche coloriée ci-après, page 504). Ces couleurs n'occupent pas toutes une étendue égale dans le spectre; c'est le violet qui a le plus d'étendue, et l'orangé qui en a le moins.

Avec des prismes diaphanes de différentes substances, ou avec des prismes de verre creux, remplis de divers liquides, on obtient des spectres formés des mêmes couleurs et dans le même ordre; mais, à angle réfringent égal, la longueur du spectre varie avec la substance dont le prisme est formé, ce que l'on constate à l'aide du polyprisme décrit précédemment (fig. 413). Les substances qui donnent plus d'étendue au spectre sont dites plus *dispersives*, et

la dispersion se mesure par la différence des indices de réfraction des rayons extrêmes du spectre. Pour le flint-glass cette différence est 0,0433; pour le crown-glass, elle est 0,0246; la dispersion du flint est donc presque double de celle du crown.

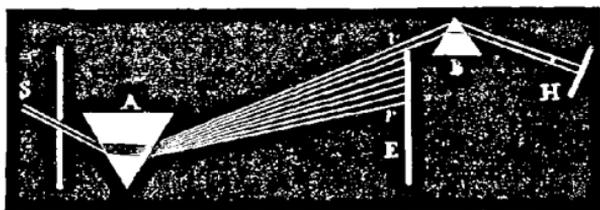
Pour des prismes de même substance, la dispersion croît avec l'angle réfringent du prisme, ce qu'on vérifie avec le prisme à angle variable déjà décrit (fig. 414). En faisant passer au travers de ce prisme un faisceau de lumière blanche, l'étendue du spectre augmente à mesure qu'on fait diverger les deux glaces.

Dans les spectres des lumières artificielles, on n'observe pas d'autres couleurs que celles du spectre solaire, et leur ordre est le même; mais, en général, il en manque quelques-unes. Leur intensité relative est aussi très-modifiée. La nuance qui domine dans une flamme artificielle est également celle qui domine dans son spectre. Les flammes jaunes, rouges, vertes, donnent des spectres où la teinte dominante est le jaune, le rouge, le vert.

Pour produire un spectre solaire dont les sept couleurs principales soient bien séparées, l'ouverture par laquelle entre la lumière solaire doit être allongée dans le sens des arêtes du prisme, et très-étroite; de plus le prisme doit être très-rapproché de l'ouverture, et l'écran sur lequel on reçoit le spectre, à la distance de 5 à 6 mètres.

545. **Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles.** — Si l'on isole une des couleurs du spectre en inter-

Fig. 442.



ceptant les autres au moyen d'un écran (fig. 442), et qu'on la fasse passer à travers un second prisme B, on observe bien encore une déviation, mais la lumière reste identiquement la même, c'est-à-dire que l'image reçue sur l'écran H est violette, si l'on a laissé passer le faisceau violet; bleue, si l'on a laissé passer le faisceau bleu; d'où l'on dit que les couleurs du spectre sont *simples*, c'est-à-dire indécomposables par le prisme.

De plus, les couleurs du spectre sont inégalement *réfrangibles*, c'est-à-dire qu'elles possèdent des indices de réfraction différents. La forme allongée du spectre suffirait pour démontrer l'inégale ré-

frangibilité des couleurs simples; car il est évident que la couleur violette, qui dévie davantage vers la base du prisme (fig. 441), est aussi la plus réfrangible, et que la couleur rouge, qui dévie le moins, est la moins réfrangible. Mais on peut encore démontrer l'inégale réfrangibilité des couleurs simples par les expériences suivantes dues à Newton.

1° On colle sur un carton noir, l'une à la suite de l'autre, deux bandes étroites de papier, l'une rouge, l'autre violette; puis on les regarde à travers un prisme. On les voit déplacées toutes les deux, mais inégalement; la bande rouge moins que la violette; ce qui fait voir que les rayons rouges sont les moins réfractés.

2° On fait encore l'expérience des prismes croisés : sur un pre-

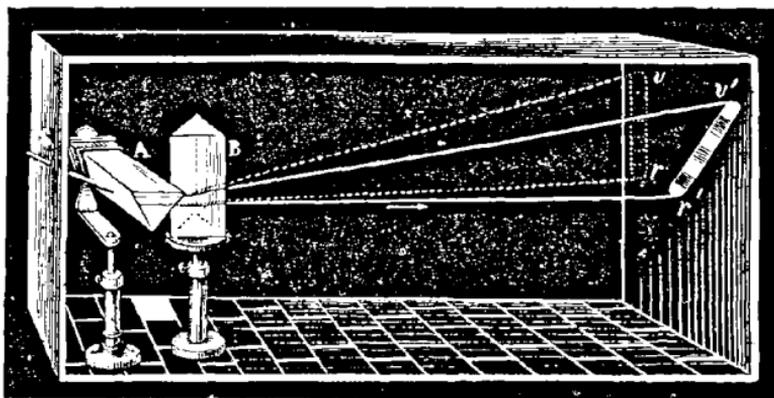


Fig. 443.

mier prisme A (fig. 443), disposé horizontalement, on reçoit un faisceau de lumière blanche S, qui, lorsqu'il ne traverse que le prisme A, va former le spectre rv sur un écran éloigné. Si l'on place alors, verticalement derrière le premier, un second prisme B, de manière qu'il soit lui-même traversé par le faisceau réfracté, le spectre est déplacé sur le côté du prisme vertical; mais au lieu de l'être parallèlement à lui-même, comme il arriverait si toutes les couleurs du spectre étaient réfractées également, il l'est obliquement en $r'v'$; ce qui fait voir qu'en allant du rouge au violet, les couleurs sont de plus en plus réfrangibles.

Ces diverses expériences montrent que l'indice de réfraction varie pour chaque couleur; en outre, il est à observer que tous les rayons d'une même couleur n'ont pas le même indice. En effet, dans la zone rouge, par exemple, les rayons qui forment l'extrémité du spectre sont moins réfractés que ceux qui sont voisins de la zone

orangée. Dans les calculs des indices de réfraction (527), on est convenu de prendre pour indice d'une substance celui du rayon jaune dans le spectre donné par cette substance.

546. **Recomposition de la lumière blanche.** — Après avoir décomposé la lumière blanche, il restait à reconnaître si l'on pouvait la reproduire en réunissant les différents faisceaux séparés par le prisme. Cette recomposition s'opère par plusieurs procédés :

1° Si l'on reçoit le spectre sur un second prisme de même angle réfringent que le premier, et tourné en sens contraire, comme le montre la figure 445, ce dernier prisme réunit les différentes couleurs du spectre, et l'on observe que le faisceau émergent E, parallèle au faisceau S, est incolore.

2° On reçoit le spectre sur une lentille biconvexe (fig. 444),

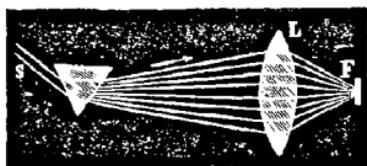


Fig. 444.

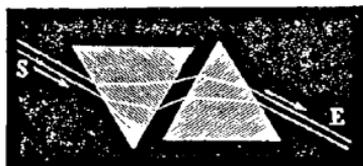


Fig. 445.

et plaçant un écran blanc à son foyer, on y recueille une image blanche du soleil; un ballon de verre rempli d'eau produirait le même effet que la lentille.

3° On fait tomber le spectre sur un miroir concave (fig. 446), et au foyer, sur un écran de verre dépoli, se forme une image blanche.

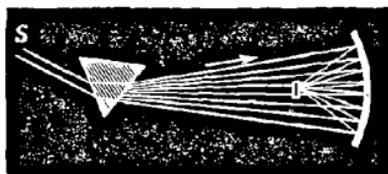


Fig. 446.

4° On recompose encore la lumière en recevant les sept couleurs du spectre respectivement sur sept petits miroirs de verre, à faces bien parallèles, pour ne pas décomposer la lumière, et pouvant s'incliner dans tous les sens pour porter la lumière réfléchie dans telle direction que l'on veut (fig. 447). En dirigeant convenablement ces miroirs, on fait d'abord tomber, sur le plafond, par exemple, les sept faisceaux réfléchis, qui donnent dessus sept images distinctes, rouge, orangée, jaune...; puis dirigeant les miroirs de manière que les sept images viennent exactement se superposer, on obtient une image unique, qui est blanche.

5° Enfin, on démontre que les sept couleurs du spectre forment du blanc, au moyen du disque de Newton. C'est un disque de car-

ton de 30 centimètres de diamètre environ; le centre et les bords sont noirs, et dans l'intervalle sont collées des bandes de papier

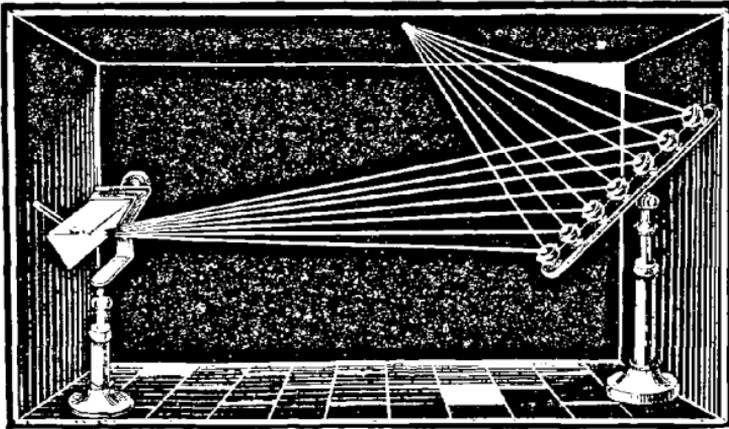


Fig. 447.

rouges, orangées, jaunes, vertes, bleues, indigo et violettes, allant



Fig. 448.

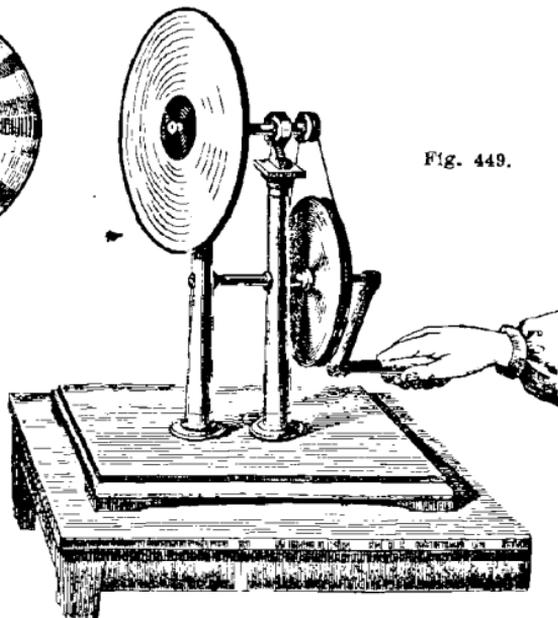


Fig. 449.

du centre à la circonférence, de manière à imiter circulairement cinq spectres successifs par la nature des teintes et par leur éten-

due relative (fig. 448). En imprimant à ce disque un mouvement de rotation rapide, la réline reçoit simultanément l'impression des sept couleurs du spectre, et le disque paraît blanc (fig. 449), ou du moins d'un blanc gris, car les couleurs qui le recouvrent ne sont pas exactement celles du spectre.

547. Théorie de Newton sur la composition de la lumière et sur la couleur des corps. — C'est Newton qui, le premier, décomposa la lumière blanche par le prisme, et la recomposa. Des diverses expériences que nous avons fait connaître ci-dessus, il conclut que la lumière blanche n'est pas homogène, mais formée de sept lumières inégalement réfrangibles, qu'il nomma lumières *simples* ou *primitives*, et que c'est en vertu de leur différence de réfrangibilité qu'elles sont séparées en traversant le prisme.

Dans cette théorie, les corps décomposent aussi la lumière par réflexion, et leur couleur propre ne dépend que de leur pouvoir réfléchissant pour les différentes couleurs simples. Ceux qui les réfléchissent toutes, dans les proportions qu'elles ont dans le spectre, sont blancs; ceux qui n'en réfléchissent aucune sont noirs. Entre ces deux limites extrêmes se présentent une infinité de nuances, suivant que les corps réfléchissent plus ou moins certaines couleurs simples et éteignent les autres. En sorte que les corps ne sont pas colorés par eux-mêmes, mais par l'espèce de lumière qu'ils réfléchissent. En effet, si dans une chambre obscure on éclaire successivement un même corps avec chacune des lumières du spectre, ce corps n'a plus de couleur propre; ne pouvant réfléchir que l'espèce de lumière qu'il reçoit, il paraît rouge, orangé, jaune..., suivant le faisceau dans lequel il est placé. La couleur des corps varie encore avec la nature de la lumière. C'est ce qui arrive pour la lumière du gaz et des bougies, dans laquelle le jaune domine, et qui communique cette teinte aux objets qu'elle éclaire.

548. Couleurs complémentaires. — Newton a nommé *couleurs complémentaires* celles qui, réunies, forment du blanc. Le vert est complémentaire du rouge, le bleu de l'orangé, le violet du jaune. Toute couleur a sa couleur complémentaire; car, n'étant pas blanche, il lui manque quelques-unes des couleurs du spectre pour former de la lumière blanche; le mélange de ces couleurs doit donc en donner une complémentaire de la première.

549. Composition du spectre. — Newton n'a connu du spectre que la partie colorée, la partie visible. Or la radiation qui constitue le spectre possède beaucoup plus d'étendue, et se compose en réalité de trois parties douées de propriétés distinctes: 1^o des rayons lumineux qui, agissant sur la réline, constituent le spectre proprement dit, et donnent successivement les sept couleurs sim-

ples; 2° au delà du rouge, des rayons impropres à exciter la vision, mais possédant une puissance calorifique beaucoup plus grande que dans les autres parties du spectre; 3° au delà du violet, des rayons encore impropres à la vision, comme les rayons au delà du rouge, d'un pouvoir calorifique très-faible, mais doués d'une grande énergie chimique. De là, dans le spectre, trois genres de propriétés : *lumineuses*, *calorifiques* et *chimiques*.

550. Pouvoir lumineux des divers faisceaux du spectre, expérience de Draper. — D'après les expériences de Fraunhofer et d'Herschel, c'est dans le jaune qu'a lieu le maximum d'intensité de la lumière, et c'est dans le violet qu'a lieu le minimum.

La partie lumineuse du spectre, que nous considérons ici, ne se produit que dans de certaines limites d'ondulation de l'éther. En effet, on verra ci-après (630) que, pour le violet, le nombre des ondulations s'élève à 728 millions de millions par seconde, et, pour le rouge, à 496 millions de millions. Au-dessus et au-dessous de ces limites, la radiation continue, mais de visible devient invisible; c'est-à-dire qu'elle n'agit plus sur la rétine, phénomène analogue à celui qu'on a observé dans la limite des sons perceptibles (222).

Remarquons encore que la composition de la partie visible du spectre varie avec la température de la source de lumière, comme le montre l'expérience suivante de M. Draper. Lorsqu'on fait passer dans un fil de platine un courant électrique dont on accroît successivement l'intensité, le fil s'échauffe de plus en plus, et, vers 500 degrés, commence à devenir lumineux. Or, en projetant ses rayons à travers un prisme, on ne reçoit d'abord que de la lumière rouge; mais, l'intensité du courant continuant à croître, le fil s'échauffe davantage, et, à la suite du rouge, on voit apparaître l'orangé. La température du fil s'élevant encore, après l'orangé se montrent le jaune, puis le vert, le bleu, l'indigo et le violet, qui ne prend naissance que lorsque le platine est chauffé à blanc.

551. Spectre calorifique, sa construction graphique. — Lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire sur un prisme de verre, ou mieux de sel gemme, non-seulement la chaleur qui accompagne le faisceau lumineux se réfracte avec lui, mais, comme lui, s'épanouit perpendiculairement aux arêtes du prisme, formant ainsi ce qu'on nomme le *spectre calorifique*.

Cette expérience fait voir que, de même que la lumière est formée de plusieurs espèces de rayons lumineux, la chaleur est composée de plusieurs espèces de rayons calorifiques inégalement réfrangibles. Les différents rayons calorifiques n'étant pas visibles, on ne peut les observer qu'à l'aide d'un thermomètre très-sensible. Pour cela, par une petite ouverture pratiquée dans

le volet d'une chambre obscure, on reçoit un faisceau de lumière solaire sur un prisme de sel gemme. Puis, de l'autre côté du prisme, on place successivement, dans les différentes parties du spectre et au delà, une pile de Melloni (fig. 256) assez étroite pour ne recevoir que les rayons d'une même réfrangibilité.

Leslie reconnut le premier, avec son thermomètre différentiel, que, dans le spectre, la chaleur croît du violet vers le rouge; et W. Herschel, qu'elle s'étend au delà du rouge. Ce dernier en fixa le maximum dans la bande obscure qui termine le rouge, et Bérard le fixa dans le rouge même. Cette différence a été expliquée par Seebeck, qui observa qu'elle dépendait de la nature du prisme réfringent. Avec un prisme d'eau, il trouva le maximum dans le jaune; avec un prisme d'alcool, il l'observa dans le jaune orangé; et dans le rouge moyen, avec un prisme de crown. Melloni a confirmé les expériences de Seebeck au moyen de son thermo-multiplicateur; il a trouvé que le maximum de chaleur s'éloigne d'autant plus du ~~jaune~~ vers le rouge, que la substance du prisme est plus diathermane. Avec un prisme de sel gemme, le maximum se forme tout à fait au delà du rouge.

En représentant, par une droite donnée, l'étendue totale de la

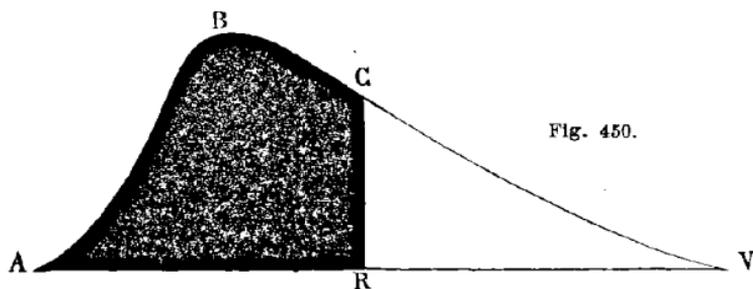


Fig. 450.

radiation calorifique dans le spectre, en élevant sur cette droite des perpendiculaires sur lesquelles on porte l'intensité de la chaleur en chaque point, et en joignant entre elles les extrémités de ces perpendiculaires, Herschel a obtenu, avec un prisme de verre, une courbe qui représente la distribution de la chaleur dans le spectre solaire. M. Muller, à Fribourg, ayant répété cette expérience avec un prisme de sel gemme et avec des instruments plus précis, a obtenu la courbe ABCV (fig. 450). Dans cette figure, la partie VCR correspond, dans le spectre visible, à la radiation calorifique, du violet jusqu'au rouge, et la partie noire RCBA à la même radiation dans la partie obscure au delà du rouge. La courbe thermique ABCV fait voir que le maximum de chaleur a

lieu en B, bien au delà du rouge; et que l'étendue totale du spectre calorifique est presque double de celle du spectre lumineux.

M. Tyndall, qui s'est livré aux mêmes recherches sur le spectre de la lumière électrique, a trouvé qu'avec cette source de lumière la courbe thermique s'élève au delà du rouge plus brusquement que dans le spectre solaire, et se prolonge beaucoup plus. Ce savant attribue l'infériorité de radiation calorifique du spectre solaire, par rapport au spectre électrique, à l'absorption de la chaleur solaire par la vapeur d'eau de l'atmosphère.

552. **Pouvoir chimique du spectre, expérience de Stokes.** — Dans un grand nombre de phénomènes, la lumière solaire se comporte comme un agent chimique. Par exemple, le protochlorure de mercure et le chlorure d'argent noircissent par l'action de la lumière; le phosphore diaphane devient opaque; les principes colorants d'origine végétale se détruisent. La lumière suffit même pour déterminer des combinaisons, comme il arrive avec un mélange de chlore et d'hydrogène; c'est elle, enfin, qui contribue principalement à la production de la matière verte dans les plantes. Toutefois les diverses couleurs du spectre ne possèdent pas la même action chimique. Scheele, le premier, en 1770, observa que le chlorure d'argent exposé à la lumière prend une teinte violacée, et il reconnut que les rayons violets du spectre produisaient seuls cet effet. Wollaston observa ensuite que cette action s'étendait hors du spectre visible, avec la même intensité que dans le violet, et il en conclut qu'outre les rayons qui agissent sur la rétine, il existe des rayons invisibles, plus réfrangibles. Les rayons qui possèdent la propriété de déterminer des réactions entre les éléments des corps ont reçu le nom de *rayons chimiques*¹.

M. Edmond Becquerel a découvert, en outre, dans le spectre, deux espèces de rayons qu'il appelle, les uns *rayons continuateurs*, les autres *rayons phosphorogéniques*. Les premiers sont des rayons qui n'exercent point d'action chimique par eux-mêmes, mais qui ont la propriété de la continuer lorsqu'elle est commencée. Les rayons phosphorogéniques sont des rayons qui ont la propriété de rendre certains corps, le sulfure de baryum, par exemple, lumineux dans l'obscurité, lorsqu'ils ont été exposés

¹ Dans un travail récent, M. Draper réfute la théorie d'un spectre chimique exclusivement dû aux rayons les plus réfrangibles. Il admet que tous les rayons du spectre solaire peuvent être également actifs, suivant la nature de la substance impressionnée, et que les rayons actifs sur une substance sont ceux pour lesquels elle a le plus grand pouvoir absorbant. M. Draper appuie cette nouvelle théorie de nombreuses expériences, qui sont données dans le *Journal de Physique* de juin 1874.

quelque temps à la lumière solaire. Le spectre phosphorogénique s'étend depuis l'indigo jusque bien au delà du violet.

M. Stokes, à Cambridge, a complété l'étude des rayons chimiques, en faisant voir que les rayons ultra-violet, si réfrangibles que leur nombre d'ondulations dépasse la limite de visibilité (550), deviennent visibles par l'interposition de certains milieux, par exemple, les solutions de quinine, d'esculine, les verres d'urane; la réfrangibilité est donc abaissée quand la lumière traverse ces substances.

M. Tyndall a observé le phénomène inverse pour les rayons obscurs au delà du rouge: reçus dans le vide sur une lame d'étain ou de charbon, et dans l'air ou dans le vide sur une feuille de platine platinisé, c'est-à-dire recouvert de platine pulvérulent, leur réfrangibilité est exaltée, et ils donnent une image visible.

* 553. **Analogie entre la lumière et la chaleur.** — Le spectre calorifique qui accompagne le spectre lumineux montre une grande similitude entre la chaleur et la lumière. Cependant, Melloni ayant fait voir que certaines substances, comme le quartz, la glace pure, qui laissent très-bien passer la lumière, sont peu perméables à la chaleur, surtout à celle émise de certaines sources, et que le quartz enfumé, qui est fort peu transparent, est au contraire très-diathermane, il semble y avoir là un caractère distinctif entre la chaleur et la lumière; mais cette différence disparaît quand on a égard à la division de la chaleur en chaleur obscure et en chaleur lumineuse.

En effet, en considérant d'abord la chaleur lumineuse, c'est-à-dire celle qui se trouve dans la partie visible du spectre, et en expérimentant successivement sur les sept faisceaux d'un spectre obtenu avec un prisme de sel gemme, M. Jamin et Masson ont trouvé, à l'aide de la pile de Melloni, que les substances transparentes qui laissent passer toute la lumière, comme le sel gemme, le verre, l'alun, laissent passer aussi toute la chaleur, en tenant compte des pertes occasionnées par la réflexion à l'entrée et à la sortie. Les mêmes savants, étant arrivés au même résultat en faisant passer les différents faisceaux du spectre à travers des plaques de verres verts, bleu et violet, en ont conclu que, dans la partie lumineuse du spectre, *la chaleur et la lumière se transmettent toujours dans les mêmes proportions à travers un milieu quelconque.*

Les résultats ne sont plus les mêmes avec la chaleur obscure, c'est-à-dire celle qui se trouve au delà du rouge, ou qui est émise par une plaque de cuivre chauffée à 400 degrés, ou par un cube de même métal rempli d'eau à 100 degrés (440). En effet, tandis que le sel gemme laisse passer également toutes les chaleurs obscures, comme l'avait trouvé Melloni (441), le verre, l'alun et, en général, tous les corps transparents et les substances translucides colorées, arrêtent les rayons qui commencent à devenir obscurs. Enfin, le sel gemme, le verre, le quartz, recouverts de noir de fumée, ne laissent plus passer la lumière, mais continuent à être traversés par les rayons calorifiques obscurs.

Quant aux rayons chimiques, ou extra-violet, M. Ed. Becquerel a trouvé que le sel gemme et le quartz les laissent passer tous, l'eau et le verre à un degré moindre, mais que l'essence de térébenthine et surtout le bisulfate de quinine et le verre d'urane les étouffent.

En résumé, les expériences citées ci-dessus prouvent que les rayons calorifiques sont tout à fait comparables aux rayons lumineux; seulement certains corps transparents pour la lumière et pour la chaleur lumineuse ne le sont point pour la chaleur obscure, et réciproquement; d'où l'on doit conclure que c'est

par la complexité du spectre calorifique qu'il faut expliquer la différence qui se manifeste, en certains cas, entre la chaleur et la lumière.

* 554. **Raies du spectre.** — Les diverses couleurs du spectre solaire ne sont point continues. Pour plusieurs degrés de réfrangibilité, les rayons manquent; de là résultent, dans toute l'étendue du spectre, un grand nombre de bandes obscures très-étroites qu'on nomme les *raies du spectre*. Pour les observer, on reçoit un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, par une fente très-étroite; et à la distance de 3 à 4 mètres, on regarde cette fente à travers un prisme de flint bien exempt de stries, en tenant les arêtes parallèles aux bords de la fente. On observe alors un grand nombre de raies obscures très-déliées parallèles aux arêtes du prisme et très-inégalement espacées.

C'est Wollaston qui, le premier, en 1802, signala les raies du spectre; mais c'est Fraunhofer qui, le premier, en 1815, les étudia avec soin et en donna une description détaillée, avec un dessin précis, dans lequel il indiqua par les lettres A, a, B, C, D, E, b, F, G, H, les plus apparentes de ces raies, qu'on désigne ordinairement sous le nom de *raies de Fraunhofer*. La raie A (fig. 1 de la planche coloriée) est à la limite du rouge; B, au milieu; C, à la limite du rouge et de l'orangé; D, dans le jaune; E, dans le vert; F, dans le bleu; G, dans l'indigo; et H, dans le violet. Il y a encore d'autres raies remarquables, telles que a dans le rouge et b dans le vert. Avec la lumière solaire, ces raies ont des positions fixes, ce qui donne le moyen de mesurer avec précision l'indice de chaque couleur simple. Dans les spectres formés par une lumière artificielle ou par celle des étoiles, la position relative des raies est changée; avec la lumière électrique, les raies obscures sont remplacées par des raies brillantes. Avec les flammes colorées, ou dans lesquelles se vaporisent certaines substances chimiques, les raies prennent des teintes éclatantes très-variables. Enfin, des raies du spectre, les unes sont constantes de position et d'éclat, telles sont les raies de Fraunhofer; mais parmi les petites raies il en est dont l'apparition dépend de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et de l'état de l'atmosphère. Les raies fixes sont dues au soleil; quant aux raies variables, elles le sont à l'absorption par l'air, et on les désigne sous le nom de *raies atmosphériques*, ou de *raies telluriques*.

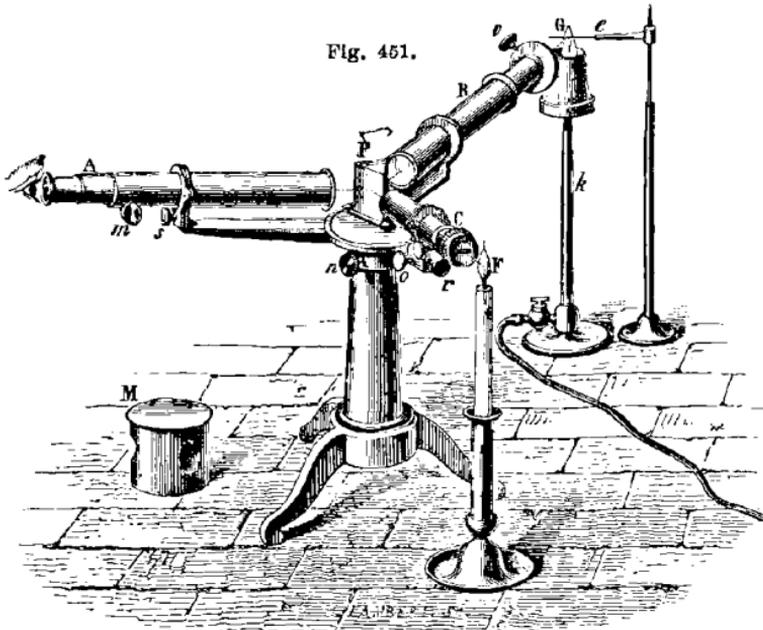
Fraunhofer avait compté dans le spectre plus de 600 raies plus ou moins larges et obscures, inégalement distribuées depuis le rouge jusqu'au violet. Sir David Brewster a porté le nombre des raies à 2 000. En recevant les rayons réfractés successivement à travers plusieurs prismes analyseurs, non-seulement on est arrivé aujourd'hui à plus de 3 000 raies, mais plusieurs qu'on regardait comme simples ont été dédoublées et même transformées en groupes de raies sombres.

Bandes froides dans le spectre calorifique. — MM. Desains et Aymonet ont constaté récemment, dans le spectre calorifique (551), des bandes froides analogues aux bandes obscures du spectre lumineux. La source de chaleur était une lampe de Bourbouze et Wiesnegg, dont le faisceau, après avoir traversé une fente de $\frac{1}{2}$ millimètre, rencontrait un prisme de sel gemme; à 30 centimètres de celui-ci, les rayons dispersés tombaient sur la pile d'un thermo-multiplicateur de Melloni. Dans le spectre calorifique ainsi obtenu, les bandes froides ne sont point encore sensibles; mais elles le deviennent en faisant passer les rayons, avant leur incidence sur le prisme, à travers des absorbants, qui ont été surtout l'eau ou des dissolutions salines.

* 555. **Application des raies du spectre, analyse spectrale.** — Après Fraunhofer, plusieurs physiciens ont poursuivi l'étude des raies du spectre. Dès 1822, sir John Herschel faisait remarquer que les substances volatilisées dans une flamme fournissaient un moyen très-sensible de reconnaître la présence de tel ou tel corps par la coloration qu'elles donnaient aux raies du spectre. Depuis, ces phénomènes ont été successivement étudiés par MM. Ed. Becquerel, Draper, Stokes, Wheatstone, Foucault, Masson, Angstroem, Plucker et Talbot; mais

ce sont surtout Kirchhoff et Bunsen qui, en 1860, ont fait connaître l'importante application que présentent les raies du spectre à l'analyse chimique, en constatant que tous les sels d'un même métal introduits dans une flamme produisent constamment des raies identiques de teinte et de position, tandis que les raies changent de teinte, de position et de nombre pour chaque métal; et qu'enfin des quantités infiniment petites d'un métal suffisent pour en déceler la présence. De là un nouveau procédé d'analyse, qu'on désigne sous le nom d'*analyse spectrale*, dans lequel on expérimente à l'aide de l'appareil suivant.

* 556. **Spectroscope.** — On donne le nom de *spectroscope* à l'appareil qu'ont adopté Kirchhoff et Bunsen pour étudier le spectre. Cet appareil est représenté,

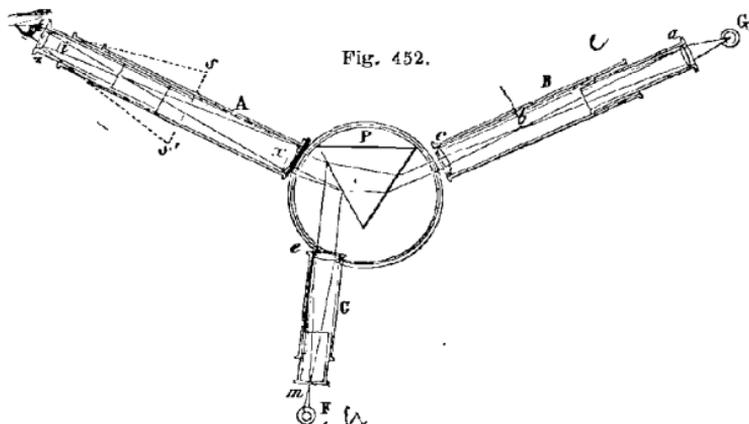


dans la figure 451, et qu'il a été modifié par MM. Duboscq et Grandean. Il se compose de trois lunettes montées sur un pied commun, et dont les axes convergent vers les faces d'un prisme de flint P. La lunette A peut seule tourner autour du prisme. On la fixe par une vis de pression *n* dans la position qu'on veut lui donner. Le bouton *m* sert à mettre au foyer, c'est-à-dire à faire avancer ou reculer l'oculaire, jusqu'à ce qu'on voie nettement l'image du spectre (579); enfin, le bouton *s* donne le moyen d'incliner plus ou moins la lunette.

Pour faire comprendre l'usage des lunettes B et C, reportons-nous à la figure 452, qui représente la marche de la lumière dans tout l'appareil. Les rayons émis par la flamme G rencontrent une première lentille *a* qui les fait converger en un point *d*, qui est le foyer principal d'une seconde lentille *c*. Par suite, c'est un faisceau parallèle qui sort de la lunette B et qui entre dans le prisme. A la sortie de celui-ci, la lumière est décomposée, et les sept faisceaux du spectre tombent sur la lentille *x*, qui en forme on *t* une image réelle et renversée. C'est enfin cette image que l'observateur regarde avec une loupe *z*, qui donne en *ss'* l'image virtuelle du spectre, avec un grossissement d'environ huit fois.

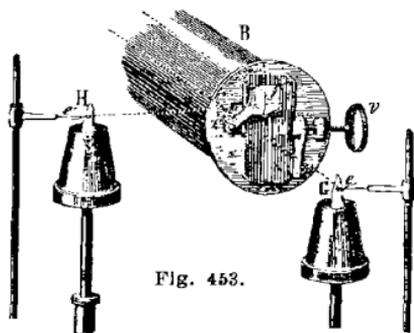
Quant à la lunette C, elle sert à mesurer la distance relative des raies du spectre

Pour cela, à son extrémité antérieure est un micromètre divisé en 250 parties égales. Pour obtenir ces divisions, on a une bande de papier sur laquelle est tracée une échelle de 250 millimètres avec la graduation de 10 en 10; puis, par la photographie, on prend de cette échelle une image sur verre, réduite à 15 millimètres de longueur, et *negative*, c'est-à-dire que le micromètre reproduit en



clair, sur fond noir, l'image noire sur fond blanc de l'échelle. Le micromètre ainsi construit et placé en *m*, à l'extrémité du tube C, se trouve correspondre au foyer principal d'une lentille *e*, qui, par suite, envoie sur le prisme un faisceau parallèle. Or une portion de ce faisceau, étant réfléchi sur la face du prisme, est renvoyée dans la lunette A, et y donne en clair, sur le spectre même, une image parfaitement nette du micromètre, laquelle fournit le moyen de mesurer avec précision les distances relatives des différentes raies.

La lunette micrométrique est en outre munie de plusieurs vis de rappel *i*, *o*, *r*; la vis *i* est la mise au foyer; *o* sert à déplacer le micromètre latéralement dans le sens du spectre; et *r*, à incliner plus ou moins la lunette pour élever ou abaisser le micromètre.



Pour compléter la description du spectroscopie, il nous reste à décrire l'ouverture par laquelle la lumière de la flamme G entre dans la lunette B. Elle consiste en une fente verticale étroite, qu'on ouvre plus ou moins en faisant marcher, à l'aide d'une vis de pression *v*, la pièce *a* (fig. 453), qui est mobile. Lorsqu'on veut observer

les comparer entre eux, on place à la partie supérieure de la fente un petit prisme *i* dont l'angle réfringent est de 60 degrés. Les rayons partis d'une flamme H tombent normalement sur une des faces du prisme, éprouvent la réflexion totale sur la deuxième, et, sortant perpendiculairement à la troisième, entrent dans la lunette suivant une direction parallèle à son axe. Puis une deuxième flamme G envoie un second faisceau, un peu au-dessous du petit prisme, dans la même direction que le premier; et ces deux faisceaux, traversant le prisme P du

spectroscope (fig. 452), vont former deux spectres horizontaux parallèles, qu'on regarde avec la lunette A. Dans les flammes G et H sont des fils de platine *e, e'*. Ces fils ont été trempés d'avance dans les dissolutions salines des métaux sur lesquels on veut expérimenter; ou bien ils supportent de petits cristaux de ces sels, et c'est en se vaporisant que les métaux modifient la lumière transmise et donnent naissance à telles ou telles raies.

Chacune des flammes H et G est un bec de gaz d'éclairage. L'appareil qui les alimente est connu sous le nom de *lampe de Bunsen*. Le gaz arrive par la tige, qui est creuse. A la partie inférieure de celle-ci est un orifice latéral destiné à laisser entrer l'air qui doit brûler le gaz. Cet orifice se ferme plus ou moins au moyen d'un diaphragme tournant, qui fait l'office de régulateur. Si on laisse entrer beaucoup d'air, le gaz brûle avec éclat, et les raies sont peu apparentes. Si on laisse passer moins d'air, la flamme perd de son éclat et blenit. Alors elle ne donne plus de spectre; mais dès qu'on y introduit un sel métallique à l'état de dissolution, ou à l'état solide, le spectre du métal apparaît.

* 557. **Expériences avec le spectroscope.** — La planche colorée ci-dessus montre quelques spectres observés à l'aide du spectroscope. La figure I représente le spectre solaire.

La figure II est le spectre du potassium. Il est caractérisé par deux raies brillantes, l'une dans l'extrême rouge, et correspondant à la raie A de Fraunhofer; l'autre dans l'extrême violet.

La figure III donne le spectre du sodium. Ce spectre ne contient ni rouge, ni orangé, ni vert, ni bleu, ni violet; et il est caractérisé par une raie jaune très-brillante, qui tient exactement la place de la raie D de Fraunhofer. Le sodium est de tous les métaux celui qui possède la plus grande sensibilité spectrale. En effet, on a constaté que $\frac{1}{3\ 000\ 000\ 000}$ de gramme de soude suffit pour faire apparaître la raie jaune du sodium. Aussi est-il difficile d'éviter cette raie. Un peu de poussière soulevée dans un appartement la fait naître; ce qui montre combien le sodium est abondamment répandu dans la nature.

Les figures IV et V montrent les spectres du césium et du rubidium, métaux nouveaux découverts par Kirchhoff et Bunsen au moyen de l'analyse spectrale. Le premier se distingue par deux raies bleues, le second par deux raies rouges très-éclatantes, et par deux raies violettes moins intenses. Un troisième métal, le thallium, a été trouvé à l'aide de la même méthode par M. Crookes, en Angleterre, et, en même temps, par M. Lamy, en France. Le thallium est caractérisé par une raie verte unique. Récemment un quatrième métal, l'indium, a été trouvé par le même procédé. Ce métal se distingue par une raie indigo.

La méthode spectrale s'applique très-bien à tous les métaux alcalins. Pour les métaux des autres sections, les expériences deviennent plus difficiles. Ces métaux ne se vaporisant qu'à des températures très-élevées, il faut avoir recours à une source de chaleur plus intense que celle qu'on obtient avec la lampe de Bunsen. C'est de l'étincelle électrique ou de l'arc voltaïque qu'on fait alors usage. On obtient ainsi des spectres parfaitement déterminés; mais ici la méthode devient complexe par le grand nombre de raies brillantes qu'on obtient. Avec le fer, par exemple, on a 70 raies, et plusieurs autres métaux en donnent à peu près autant. On conçoit que cette multiplicité de raies présente de grandes difficultés pour distinguer certains métaux entre eux.

* 558. **Spectres de divers ordres, renversement des raies.** — Selon la source d'où vient la lumière qu'on décompose par le prisme, les spectres qu'on obtient présentent des différences d'après lesquelles on peut les diviser dans les trois ordres suivants.

1^{er} ordre. — Les *spectres continus*, c'est-à-dire sans intervalles obscurs. Ces spectres, qui sont très-éclatants, sont produits par les lumières émises des solides ou des liquides incandescents; par exemple, celle du magnésium en ignition, ou de l'arc voltaïque (777).

2^e ordre. — Les spectres discontinus à raies brillantes, formés de raies colorées, séparées par des intervalles sombres. Ces spectres sont toujours dus à la lumière de gaz ou de vapeurs incandescentes, et les teintes ainsi que les positions de leurs raies varient avec la nature des gaz et des vapeurs, comme on l'a vu ci-dessus avec les vapeurs de potassium, de sodium, de cæsium et de rubidium (fig. II, III, IV et V de la planche coloriée).

Les flammes des lampes, celles des bougies, à cause des particules de charbon qu'elles tiennent en suspension, donnent, comme les solides, des spectres continus, avec un éclat plus apparent dans certaines parties; mais si, à l'aide d'une lampe de Bunsen dans laquelle on active le courant d'air (556), on brûle tout le charbon, on obtient une flamme bleuâtre, qui donne un spectre à peu près sombre, sur lequel se détachent des raies brillantes.

3^e ordre. — Les spectres discontinus à raies sombres, comme le spectre solaire (fig. I de la planche coloriée).

Kirchhoff a trouvé que les raies sombres ne proviennent point de la source de lumière même, mais de vapeurs à travers lesquelles a passé le faisceau lumineux qui donne le spectre, et par lesquelles ont été éteintes les couleurs de vibrations déterminées (630).

De plus, le même physicien a constaté que les raies sombres que fait ainsi naître une vapeur correspondent exactement, en position et en nombre, aux raies brillantes que fournit la même vapeur quand elle est incandescente. Ce phénomène, dont on va voir l'application, est connu sous le nom de renversement des raies.

* 559. **Analyse de l'atmosphère solaire.** — Du renversement des raies, Kirchhoff a déduit le moyen de reconnaître la constitution du soleil. En effet, si cet astre était entièrement solide ou entièrement gazeux, il donnerait un spectre parfaitement continu, ou un spectre à raies brillantes (558). Par conséquent les raies noires du spectre solaire montrent que le noyau du soleil est solide ou liquide, et que ce noyau est enveloppé d'une atmosphère gazeuse dans laquelle se trouvent, à l'état de vapeur ou de gaz, des substances qui, éteignant les vibrations lumineuses correspondantes, donnent naissance aux raies de Fraunhofer. Par exemple, la raie jaune du sodium (557) correspondant exactement à la raie D du spectre solaire, on en conclut que le sodium existe à l'état de vapeur dans l'atmosphère du soleil, car ce métal seul peut éteindre les vibrations lumineuses qui donnent la raie brillante de son spectre.

On a reconnu ainsi que l'atmosphère solaire contient, à l'état de vapeur, le potassium, le sodium, le calcium, le magnésium, le fer, le nickel, le chrome, le zinc. L'hydrogène s'y trouve en grande quantité, car les protubérances roses qui apparaissent autour du soleil pendant les éclipses en donnent les raies.

Enfin, l'analyse spectrale a permis d'étudier les étoiles fixes et même les nébuleuses, et d'y trouver un certain nombre de substances terrestres. On a en outre vérifié que les étoiles sont de véritables soleils, composés, comme le nôtre, d'un noyau solide ou liquide et d'une atmosphère.

* 560. **Couleurs des objets vus au travers d'un prisme.** — Lorsqu'un corps est vu au travers d'un prisme, les portions de son contour parallèles aux arêtes du prisme paraissent colorées des teintes du spectre. Ce phénomène s'explique par l'inégale réfrangibilité des rayons réfléchis par le corps. Si l'on regarde, par exemple, une bande très-étroite de papier blanc collée sur un carton noir, avec un prisme dont les arêtes lui soient parallèles, elle paraît colorée de toutes les couleurs du spectre, et c'est la teinte violette qui est la plus écartée vers le sommet du prisme. Dans cette expérience, la lumière blanche réfléchie par la bande de papier est décomposée à son passage dans le prisme, et la teinte violette, plus réfrangible, dévie davantage, ce qui la fait paraître plus élevée.

Si la bande de papier, au lieu d'être très-étroite, a une certaine largeur, toute sa partie moyenne reste blanche; ses bords, parallèles aux arêtes du prisme, sont

seuls colorés, les plus rapprochés du sommet en violet mélangé de bleu et d'indigo, et les plus rapprochés de la base en rouge mélangé d'orangé et de jaune. Pour expliquer ce phénomène, il faut concevoir la bande de papier partagée en bandes parallèles très-étroites. Chacune de celles-ci donnera, comme dans le premier cas, un spectre complet. Or, le deuxième spectre étant un peu plus bas que le premier, le troisième plus bas que le deuxième, et ainsi de suite, il en résulte une superposition successive de toutes les couleurs simples, qui produit du blanc, excepté vers les bords, où la superposition n'est pas complète, et où le violet d'un côté, et le rouge de l'autre, restent isolés.

Le prisme donne le moyen d'analyser la couleur d'un corps. Pour cela, on découpe de celui-ci une bandelette étroite qu'on fixe sur un fond noir et qu'on éclaire fortement. En la regardant, à la distance d'un à deux mètres, avec un prisme, la lumière réfléchie est décomposée, et l'on reconnaît quelles sont les couleurs simples qui composent la couleur propre du corps. On a constaté ainsi que la couleur de tous les corps est composée. Les pétales des fleurs, par exemple, donnent toujours un spectre nuancé de plusieurs des couleurs du spectre.

* 561. **Aberration de réfrangibilité.** — Les diverses lentilles décrites précédemment (530) ont l'inconvénient, lorsqu'elles sont à une certaine distance de l'œil, de donner des images dont les contours sont irisés. Ce défaut, qui est surtout sensible dans les lentilles convergentes, est dû à l'inégale réfrangibilité des couleurs simples (545), et se désigne sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*. En effet, ces lentilles pouvant être comparées à une suite de prismes à faces infiniment petites, réunis par leurs bases, elles ne réfractent pas seulement la lumière, mais la décomposent à la manière du prisme. Il résulte de cette dispersion que les lentilles ont réellement sept foyers distincts, un pour chaque couleur du spectre. Dans les lentilles convergentes, par exemple, les rayons rouges, qui sont les moins réfrangibles, vont former leur foyer en un point r , placé sur l'axe de la lentille (fig. 454), tandis que les rayons violets, se réfractant davantage, vont concourir en un point v , plus rapproché. Entre ces deux limites se forment les foyers orangé, jaune, vert, bleu et indigo. L'aberration de réfrangibilité est d'autant plus sensible, que les lentilles sont plus convexes et que le point d'incidence des rayons qui les traversent est plus éloigné de l'axe; car alors les faces d'incidence et d'émergence sont plus inclinées entre elles. On va voir (562) comment on corrige l'aberration de réfrangibilité.

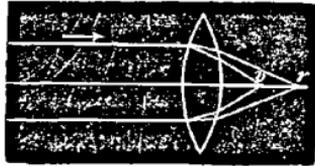


Fig. 454.

* 562. **Achromatisme.** — En combinant des prismes dont les angles réfringents sont différents (522), et qui sont formés de substances inégalement dispersives (544), on est parvenu à réfracter la lumière blanche sans la décomposer. Le même résultat s'obtient avec des lentilles de substances différentes, dont les courbures sont convenablement combinées. Les contours des objets vus au travers des prismes ou des lentilles ainsi formés ne paraissent plus irisés, on dit que ces prismes et ces lentilles sont *achromatiques*, et l'on nomme *achromatisme* le phénomène de la réfraction de la lumière sans dispersion.

En observant le phénomène de la dispersion des couleurs avec des prismes d'eau, d'essence de térébenthine, de crown-glass, Newton avait été conduit à admettre que la dispersion était proportionnelle à la réfraction. Il en avait conclu qu'il ne pouvait y avoir réfraction sans dispersion, et par conséquent que l'achromatisme était impossible. Près d'un demi-siècle s'écoula avant qu'on reconnût l'erreur de Newton. Hall, savant anglais, construisit le premier, en 1733, des lunettes achromatiques; mais il ne publia pas sa découverte. C'est Dollon, opticien à Londres, qui, en 1757, montra qu'en juxtaposant deux lentilles, l'une

biconvexe, de crown-glass, et l'autre concave-convexe, de flint (fig. 455), on obtenait une lentille sensiblement achromatique.

Pour expliquer ce résultat, soient deux prismes BCF et CFD juxtaposés et tournés en sens contraires, comme le montre la fig. 456. Si l'on suppose d'abord que ces prismes soient de même substance, l'angle réfringent CFD du second étant plus petit que l'angle réfringent BCF du premier, les deux prismes produiront le même effet qu'un prisme unique BAF; c'est-à-dire que la lumière blanche qui



Fig. 455.

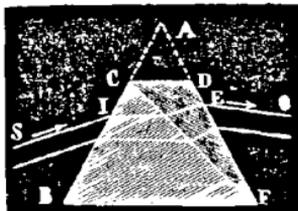


Fig. 456.

les traverse non-seulement déviara, mais sera décomposée. Au contraire, si le premier prisme BCF étant de crown, le second est de flint, on peut détruire la dispersion tout en conservant la réfraction. En effet, le flint étant plus dispersif que le crown, et la dispersion produite par un prisme diminuant avec l'angle réfringent du prisme (544), il en résulte qu'en diminuant convenablement l'angle réfringent CFD du prisme de flint, par rapport à l'angle réfringent BCF du prisme de crown, on arrive à rendre égal le pouvoir dispersif de ces prismes; et comme, d'après leur position, la dispersion a lieu en sens contraire, elle est compensée, c'est-à-dire que les rayons émergents EO sont sensiblement ramenés au parallélisme, et donnent, par conséquent, de la lumière blanche. Toutefois, le rapport des angles BCF et CFD, qui convient au parallélisme des rayons rouges et des rayons violets, par exemple, n'étant pas celui qui convient aux rayons intermédiaires, il en résulte qu'avec deux prismes on ne peut en réalité achromatiser que deux des rayons du spectre. Pour obtenir l'achromatisme parfait, il faudrait sept prismes de substances inégalement dispersives et dont les angles réfringents seraient convenablement déterminés.

Quant à la réfraction, elle n'est pas corrigée en même temps que la dispersion, car il faudrait pour cela que la puissance réfractive des corps variât, comme l'avait supposé Newton, dans le même rapport que leur pouvoir dispersif; ce qui n'a pas lieu. Par conséquent, le rayon émergent EO ne sort pas parallèlement au rayon incident SI, et il y a déviation sans décomposition sensible.

Les lentilles achromatiques se forment de deux lentilles de substances inégalement dispersives. L'une A, de flint, est concave-convexe divergente (fig. 455); l'autre B, de crown-glass, est biconvexe, et l'une de ses faces peut coïncider exactement avec la face concave de la première. Avec les lentilles, comme avec les prismes, il faudrait sept verres pour obtenir l'achromatisme parfait; mais deux suffisent dans tous les instruments d'optique, et on leur donne la courbure nécessaire pour achromatiser les rayons rouges et les rayons jaunes.

* 563. **Absorption de la lumière par les milieux transparents.** — On ne connaît pas de substance d'une transparence parfaite. Le verre, l'eau, l'air même, éteignent graduellement la lumière qui les traverse, et, sous une épaisseur suffisante, ces milieux peuvent l'affaiblir assez pour qu'elle n'agisse plus sur la rétine. On observe, en effet, qu'un grand nombre d'étoiles qui ne sont pas visibles, même par le ciel le plus pur, quand on est dans les plaines, le deviennent quand on s'élève sur les hautes montagnes.

Cette perte graduelle qu'éprouve la lumière en traversant les milieux diaphanes se nomme *absorption*. Si tous les rayons simples étaient également transmis-

sibles à travers les milieux diaphanes, ceux-ci seraient incolores. Or il n'en est jamais ainsi; ce qui montre que, comme les corps diathermanes ne se laissent pas traverser également par les différents rayons calorifiques (444), de même les corps diaphanes laissent passer certains rayons lumineux plus facilement que d'autres. Le milieu prend alors la couleur pour laquelle il est le plus diaphane. C'est pour cette raison que, sous une grande épaisseur, l'air paraît bleu; une lame de verre épaisse est verte. Le verre coloré en rouge par le protoxyde de cuivre ne laisse passer que les rayons rouges, et absorbe tous les autres, même sous une petite épaisseur.

Pour plusieurs milieux transparents, la coloration varie avec l'épaisseur. Par exemple, le perchlorure de chrome, qui est vert sous une faible épaisseur, devient rouge foncé sous une épaisseur plus grande. On nomme *polychromiques* les substances dont la teinte varie ainsi avec l'épaisseur.

C'est par un effet d'absorption que les rayons du soleil sont moins intenses quand cet astre est à l'horizon que lorsqu'il est au zénith, car ils traversent alors une épaisseur d'atmosphère bien plus considérable.

CHAPITRE V

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

564. Divers instruments d'optique. — On nomme *instruments d'optique* des combinaisons de lentilles seules, ou de lentilles et de miroirs, qui peuvent se diviser en trois groupes, suivant les usages auxquels on les destine. 1^o Les instruments qui ont pour objet d'amplifier les images des corps que leurs petites dimensions ne permettent pas d'observer à l'œil nu : ce sont les *microscopes*. 2^o Les instruments qui rapprochent et servent à observer les astres ou les objets éloignés : ce sont les *lunettes* et les *télescopes*. 3^o Les instruments propres à projeter sur un écran des images réduites ou amplifiées, qui peuvent être utilisées dans l'art du dessin, ou montrées à de nombreux observateurs; tels sont : la *chambre claire*, la *chambre obscure*, le *daguerréotype*, la *lanterne magique*, la *fantasmagorie*, le *mégascope*, le *microscope solaire* et le *microscope photo-électrique*. Les deux premiers groupes ne donnent que des images virtuelles, et le dernier des images réelles, excepté la *chambre claire*.

INSTRUMENTS QUI GROSSISSENT LES OBJETS

565. Microscope simple. — Les *microscopes*, comme on l'a déjà dit ci-dessus, sont des instruments destinés à augmenter la puissance de la vue en grossissant les objets. On en distingue deux : le *microscope simple* et le *microscope composé*.

Le *microscope simple*, ou *loupe*, est simplement une lentille

convergente à court foyer, avec laquelle on regarde des objets placés en deçà de son foyer principal. Quoique nous ayons déjà donné la construction de l'image ainsi obtenue, (537) nous la répétons ici pour y ajouter quelques détails.

L'objet AB, que l'on veut observer, étant placé entre la lentille

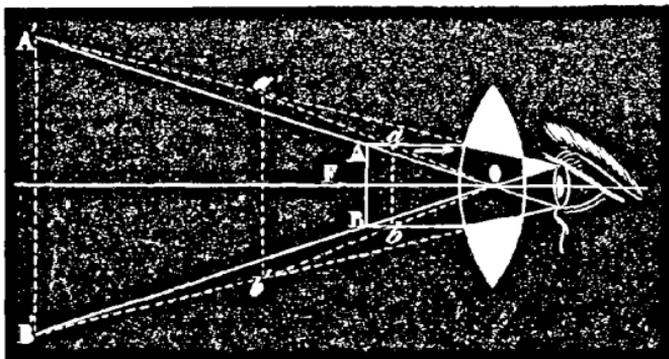


Fig. 457.

et son foyer principal F (fig. 457), on mène les axes secondaires AO et BO; puis, des points A et B, des rayons parallèles à l'axe. Or on a vu (534, 3^o) qu'à leur sortie de la lentille, ces rayons vont passer par le foyer principal de l'autre côté de la lentille, et que, sortant divergents par rapport aux axes secondaires, leurs prolongements vont couper ceux-ci en des points A' et B' qui sont les foyers virtuels des points A et B. On a donc en A'B' l'image droite, virtuelle et amplifiée de l'objet AB.

La position et la grandeur de cette image ne sont point fixes; elles varient avec la distance de l'objet au foyer. Par exemple, l'objet se rapprochant de la lentille, de AB en *ab*, l'angle des axes secondaires augmente, et les rayons réfractés, prolongés, les coupent en *a'b'*. L'image est donc plus petite et rapprochée. Au contraire, si l'objet s'éloigne de la lentille, l'angle des axes secondaires diminue, et leur intersection par les prolongements des rayons réfractés ayant lieu au delà de A'B', l'image est plus éloignée et plus grande. On peut donc toujours, en faisant varier la distance de la lentille à l'objet, éloigner ou rapprocher l'image. On verra ci-après (579) comment cette propriété est utilisée dans les instruments d'optique pour obtenir des images nettes et amplifiées.

Les aberrations de réfrangibilité et de sphéricité sont d'autant plus grandes dans le microscope simple, qu'il est plus grossissant. On a déjà vu (562) que l'aberration de réfrangibilité se corrige au

moyen de lentilles achromatiques, et celle de sphéricité à l'aide de diaphragmes qui ne laissent passer que les rayons voisins de l'axe, rayons pour lesquels l'aberration de sphéricité est négligeable (542). On corrige encore ce genre d'aberration en faisant usage, non plus d'une seule lentille très-convergente, mais de deux petites lentilles plan-convexes superposées, leurs faces planes tournées vers l'objet qu'on regarde (fig. 459). Ces lentilles sont fixées dans un *œilleton* représenté en vraie grandeur,

Fig. 458.



Fig. 459.



en perspective et en coupe, dans les figures 458 et 459. Quoique chacune d'elles soit moins convexe que la lentille simple qu'elles remplacent, leur système grossit autant, mais avec une aberration moindre, parce que la première rapproche de l'axe les rayons qui tombent sur la seconde. Ce système de lentille est connu sous le nom de *doublet de Wollaston*.

Pour faciliter l'emploi du microscope simple, M. Raspail lui a donné la disposition représentée dans la figure 460. Un support horizontal E, qui peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une crémaillère et d'un pignon à bouton D, porte un *œilleton* noir *m*, au centre duquel est enchâssée une lentille achromatique plus ou moins grossissante. Au-dessous est le *porte-objet*, qui est fixe, et sur lequel, entre deux lames de verre *b*, est placé l'objet qu'on veut observer. Comme il est nécessaire que l'objet soit fortement éclairé, on reçoit la lumière diffuse de l'atmosphère sur un réflecteur concave de verre M, qu'on incline de manière que les rayons réfléchis viennent tomber sur l'objet. Pour se servir de ce microscope, on place l'œil très-près de la lentille, qu'on abaisse ou qu'on élève jusqu'à ce qu'on trouve la position où l'image paraît avec plus de netteté.

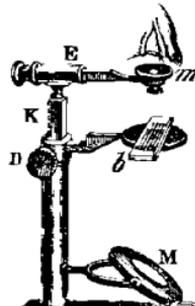
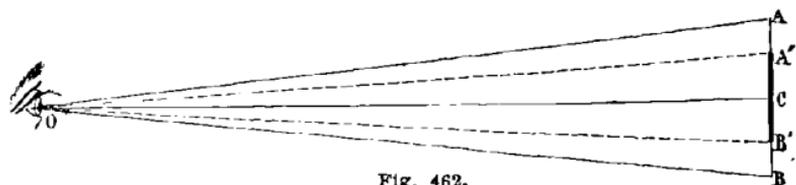
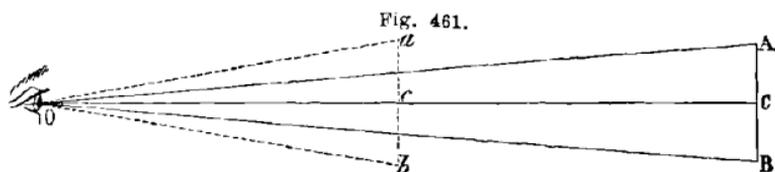


Fig. 460.

566. **Conditions de netteté, distance de la vue distincte.** — Pour

que l'image des objets qu'on regarde dans le microscope présente une grande netteté, il ne suffit pas que ces objets soient fortement éclairés par un réflecteur concave, comme dans le microscope de Raspail (fig. 460), il faut encore que l'image se forme à une distance déterminée. En effet, on verra, en traitant de la vision (601), qu'il est une distance à laquelle l'œil voit plus nettement qu'à toute autre, et qu'à cause de cela on désigne sous le nom de *distance de la vue distincte*. Elle varie avec les individus; mais pour un œil bien conformé, elle est comprise dans les limites de 25 à 30 centimètres. C'est donc à environ 25 ou 30 centimètres de l'œil que doit se former l'image. D'où l'on voit que, pour chaque observateur, il faut *mettre au point*, c'est-à-dire adapter le microscope à la distance de la vue distincte de celui qui observe, ce qu'on obtient en faisant varier très-peu la distance de la lentille à l'objet; car on a vu ci-dessus (fig. 457) qu'un léger déplacement de l'objet en imprime un très-grand à l'image.

567. **Diamètre apparent.** — On nomme *grandeur apparente*, ou *diamètre apparent* d'un objet AB l'angle sous lequel on le



voit, c'est-à-dire l'angle AOB (fig. 461), formé par deux rayons visuels menés du centre de la pupille aux deux extrémités d'une même dimension de l'objet.

Dans les applications des diamètres apparents aux instruments d'optique, les angles sous lesquels on voit les objets sont toujours assez petits pour qu'on puisse, aux arcs qui mesurent ces angles, substituer leurs tangentes. Le rapport de deux angles est alors le même que celui de leurs tangentes. Ceci admis, il en découle les deux principes suivants, dont on va voir ci-après l'application à la mesure du grossissement.

I. — Pour un même objet, vu à des distances inégales, le diamètre apparent est en raison inverse de la distance à l'œil de l'observateur.

II. — Pour deux objets, vus à la même distance, le rapport des diamètres apparents est le même que celui des grandeurs absolues.

En effet, supposons que l'objet AB (fig. 461) soit transporté en ab , à une distance telle, que Oc soit la moitié de OC. D'après un théorème connu de trigonométrie, les deux triangles rectangles ACO et aCO fournissent les égalités

$$\text{tang } AOC = \frac{AC}{CO}, \quad \text{et} \quad \text{tang } aOc = \frac{ac}{cO}.$$

Or $ac = AC$, et $cO = \frac{CO}{2}$; donc $\text{tang } aOc$ est double de $\text{tang } AOC$, et par suite, l'angle aOc est double de AOC ; donc, à une distance deux fois moindre, le diamètre apparent est deux fois plus grand. On trouverait de même qu'à une distance trois fois plus petite, il est triple, ce qui démontre le premier principe.

Pour démontrer le second, soient deux objets AB et A'B' (fig. 462) situés à la même distance de l'observateur, et supposons l'œil placé sur une droite OC perpendiculaire sur le milieu de AB. Si l'on prend OC pour unité, les droites AC et A'C représentent immédiatement les tangentes des angles AOC et A'OC; on a donc, d'après ce qui a été dit plus haut, $\frac{AOC}{A'OC} = \frac{AC}{A'C}$, ou, en doublant les deux termes de chaque rapport, $\frac{AOB}{A'OB'} = \frac{AB}{A'B'}$, égalité qui est l'expression du deuxième principe énoncé ci-dessus.

568. **Mesure du grossissement.** — Dans le microscope simple, on prend pour mesure du grossissement le rapport du diamètre apparent de l'image au diamètre apparent de l'objet, supposés l'un et l'autre à la même distance, celle de la vue distincte. Mais il importe de chercher une expression du grossissement plus facile à déterminer.

Considérant d'abord la loupe, soient AB l'objet qu'on observe, et A'B' son image (fig. 463). Si l'on projette AB sur A'B', en $a'b'$, le grossissement, d'après la définition qui précède, est le rapport des deux angles A'OB' et a'Ob'. Or on a vu (567) que $\frac{A'OB'}{a'Ob'} = \frac{A'B'}{a'b'} = \frac{A'B'}{AB}$, puisque $a'b' = AB$; mais A'B' est la grandeur réelle de l'image, et AB celle de l'objet; donc on peut aussi dire que, dans le microscope simple, le grossissement est le rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet.

Cela posé, les deux triangles semblables A'OB' et AOB fournissent l'égalité $\frac{A'B'}{AB} = \frac{OD}{OC}$, dans laquelle OD est la distance de la vue distincte d , et OC approximativement la distance focale f de la lentille; on peut donc poser $\frac{A'B'}{AB} = \frac{d}{f}$; c'est-à-dire que, dans le

microscope simple, on a pour valeur approchée du grossissement le rapport de la distance de la vue distincte à la distance focale principale de la lentille. D'où l'on conclut que le grossissement est d'autant plus fort : 1° que la lentille est à plus court

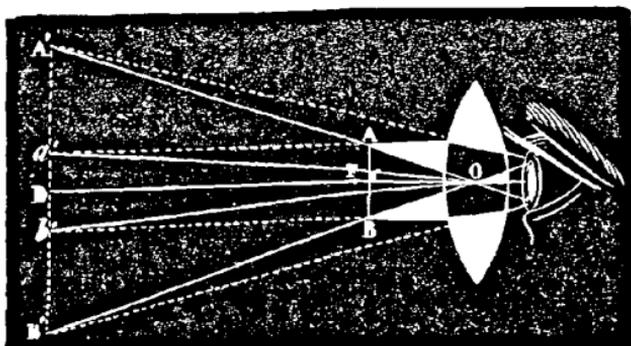


Fig. 463.

foyer, c'est-à-dire qu'elle est plus convergente; 2° que la distance de la vue distincte de l'observateur est plus grande.

Des lentilles de rechange permettent de varier le grossissement, mais dans de certaines limites, si l'on veut conserver à l'image toute sa netteté : avec le microscope simple, on obtient un grossissement très-net jusqu'à 120 fois en diamètre.

Le grossissement qu'on vient de considérer est le grossissement en diamètre, ou le grossissement *linéaire*. Le grossissement *superficiel* égale le carré du grossissement linéaire. Par exemple, si celui-ci est 20, le grossissement superficiel est 400. On verra bientôt (571) comment on détermine expérimentalement le grossissement en diamètre.

569. **Microscope composé.** — Le *microscope composé*, réduit à son plus grand degré de simplicité, est formé de deux verres lenticulaires convergents, l'un à court foyer, nommé *objectif*, parce qu'il est tourné vers l'objet; l'autre, qui est moins convergent, se nomme *oculaire*, parce qu'il est près de l'œil de l'observateur. Ces deux verres sont fixés dans un même tube, de manière que leurs axes coïncident.

La figure 464 représente la marche des rayons et la formation de l'image dans le microscope composé réduit à deux verres. Un objet AB étant placé très-près du foyer principal F de l'objectif M, mais un peu au delà par rapport à ce verre, une image aérienne *ab*, réelle, renversée et amplifiée, va se former de l'autre côté de l'objectif beaucoup au delà du second foyer principal F' (531, 2°).

Or la distance des verres M et N est telle, que l'image ab se trouve entre l'oculaire N et son foyer F'' . Il en résulte que pour l'œil placé en E, qui regarde cette image avec l'oculaire, ce dernier verre produit l'effet du microscope simple, ou loupe (565), et substitue à l'image ab une seconde image $a'b'$, virtuelle et

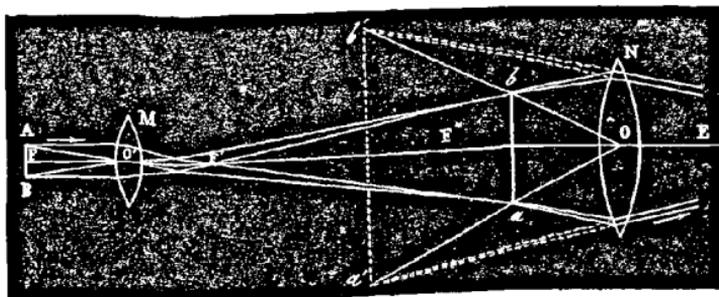


Fig. 464.

amplifiée de nouveau. Cette deuxième image, droite par rapport à la première, est renversée par rapport à l'objet. On peut donc dire, en dernière analyse, que le microscope composé n'est autre chose qu'un microscope simple appliqué, non plus à l'objet, mais à son image déjà amplifiée par une première lentille.

570. Microscope de Nacet. — On a vu ci-dessus le principe du microscope composé; il reste à décrire cet appareil et ses principaux accessoires. Inventé vers la fin du xvi^e siècle, il a reçu successivement de nombreux perfectionnements.

La figure 465 donne une vue perspective du microscope composé, tel qu'il est construit par M. Nacet, et la figure 466 une coupe longitudinale. Le corps du microscope se compose d'un système de tubes de cuivre DD', I et H, dont le premier porte, à sa partie inférieure, l'objectif o , et le dernier H, l'oculaire O. DD' est un seul et même tube dans lequel s'engage, à frottement doux, le tube I, tandis que le tube DD' peut glisser, aussi à frottement doux, dans un tube plus gros maintenu dans un collet E. Ce dernier est fixé à un support BB', qui, au moyen d'une vis à pas très-serrés, qu'on fait tourner par un bouton T, s'élève ou s'abaisse, avec une course de 6 millimètres, le long d'une tige intérieure C, qui n'est pas visible dans la figure. Avec la pièce BB' monte et descend tout le corps du microscope, ce qui permet de l'écartier ou de le rapprocher à volonté de l'objet qu'on observe. Enfin, la tige C et toutes les autres pièces de l'instrument sont portées par un axe horizontal A, sur lequel elles tournent à frotte-

ment assez dur pour pouvoir s'incliner et rester fixes dans toutes les positions, depuis la verticale jusqu'à l'horizontale.

Les objets qu'on veut observer se placent, entre deux lames de verre V, sur une plate-forme R, qui est le *porte-objet*. Celui-ci

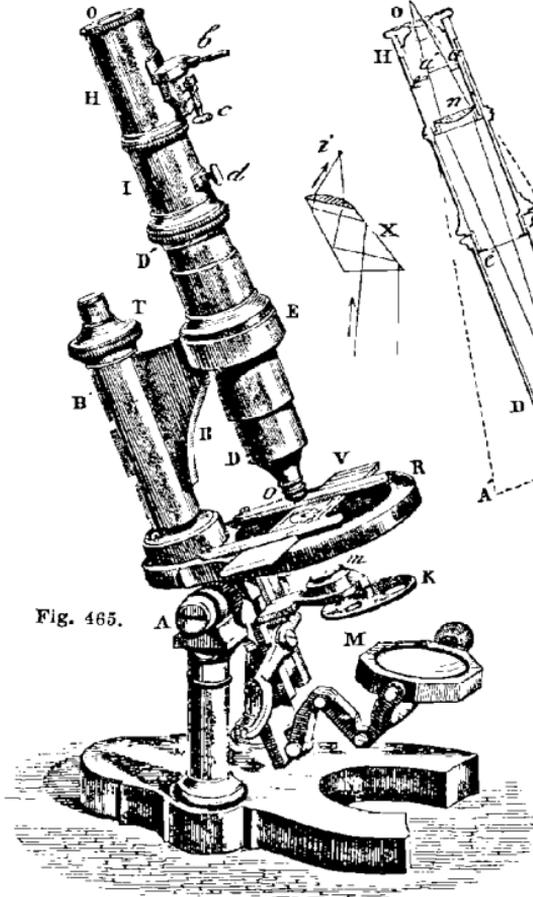


Fig. 465.

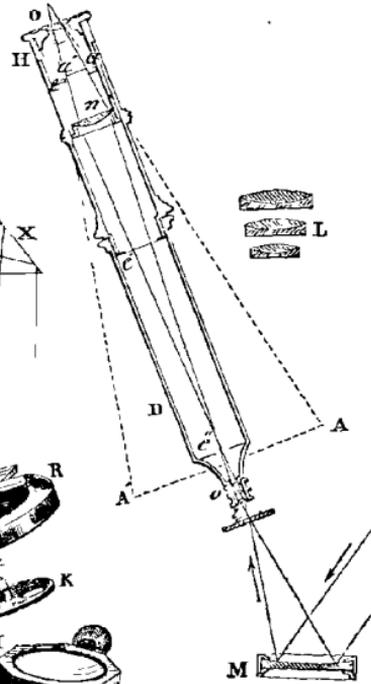


Fig. 466.

est percé, à son centre, d'un trou qui laisse passer la lumière envoyée par un réflecteur concave M : c'est un miroir de verre, monté à articulations, de manière qu'on puisse lui donner toutes les positions et inclinaisons pour que, recevant la lumière diffuse de l'atmosphère ou de toute autre source lumineuse, il la renvoie vers l'objet. Entre le réflecteur M et le porte-objet est un diaphragme K, percé sur son pourtour de quatre trous inégaux, et tournant librement autour d'un axe, de façon qu'on puisse amener à volonté

chacun des trous au-dessous de l'ouverture centrale du porte-objet, et régler ainsi la lumière qui arrive à l'objet. On la règle encore en élevant ou en abaissant, au moyen d'un levier n , le diaphragme K , qui est mobile dans une coulisse. De plus, au-dessus du diaphragme K est une pièce m sur laquelle on monte, à volonté, ou un second diaphragme percé d'un très-petit trou et ne laissant arriver que très-peu de lumière sur l'objet, ou une lentille convergente, qui concentre la lumière sur l'objet, ou un prisme oblique représenté en X . Les rayons qui arrivent du réflecteur subissent deux réflexions totales dans ce prisme, et sortent par une face lenticulaire qui les concentre latéralement sur l'objet, ce qui est avantageux dans certaines observations microscopiques. Les objets qu'on observe sont en général assez transparents pour qu'on les éclaire en dessous; dans le cas où leur opacité ne le permet pas, on les éclaire en dessus au moyen d'une lentille convergente, montée sur un pied à articulations; on la place de manière que, recevant la lumière diffuse de l'atmosphère, son foyer coïncide avec l'objet.

Enfin, le porte-objet R et la pièce BB' ne sont pas montés directement sur l'axe A , mais sur un plateau fixé à cet axe au-dessous du porte-objet. C'est ce plateau fixe qui est figuré en noir au centre du porte-objet R ; ce dernier tourne autour du plateau, guidé par une coulisse circulaire dans laquelle il est maintenu. Il résulte de cette disposition que, prenant à la main la pièce BB' , on peut la faire tourner, ainsi que le porte-objet et le corps du microscope, autour de l'axe optique de celui-ci. Pendant ce mouvement, le réflecteur et les diaphragmes ne se déplacent pas, mais les lames de verre V tournant avec la plate-forme R , l'objet se trouve successivement éclairé sur toutes ses faces, ce qui permet une observation plus complète.

La figure 466 montre la disposition des lentilles et la marche des rayons dans le microscope. En o est l'objectif, composé de trois petites lentilles achromatiques convergentes, représentées sur une plus grande échelle, en L , sur la droite de la figure. Les effets de ces trois lentilles s'ajoutant, leur système agit comme une lentille unique très-convergente. L'objet étant placé en i très-près du foyer principal du système, mais au delà, les rayons émergents vont tomber sur une quatrième lentille convergente n , dont on va voir ci-après l'usage (574 et 575). Devenus plus convergents par leur passage à travers le verre n , les rayons vont former en aa' une image réelle et amplifiée de l'objet i . Cette image se trouve entre un cinquième verre convergent O et le foyer principal de ce verre. Par suite, si l'on regarde à travers celui-ci, il agit comme

loupe (537) et donne, en AA' , une image virtuelle et très-amplifiée de l'image aa' , et, par conséquent, de l'objet. Les deux verres n et O constituent l'oculaire décrit ci-après sous le nom d'*oculaire négatif* (575). On adapte à l'instrument des objectifs et des oculaires de rechange, dont les verres plus ou moins convergents font varier le grossissement. Dans le microscope que nous venons de décrire, il va jusqu'à 1 300 en diamètre (568).

La première image aa' ne doit pas seulement se faire entre le verre O et son foyer principal, mais à une distance telle de ce verre, que la deuxième image AA' se forme à la distance de la vue distincte de l'observateur (566). Ce résultat s'obtient en faisant d'abord glisser avec la main le corps DH du microscope dans le tube plus gros fixé au collet E , jusqu'à ce qu'on aperçoive une image assez nette; puis, tournant le bouton T dans un sens ou dans l'autre, on remonte ou on abaisse d'un mouvement lent la pièce BB' et avec elle tout le microscope, jusqu'à ce que l'image AA' atteigne son maximum de netteté; ce qui a lieu quand elle se forme à la distance de la vue distincte, distance qu'on finit toujours par obtenir, car la lentille objective s'écartant ou se rapprochant de l'objet, l'image aa' s'écarte ou se rapproche de l'oculaire, et en même temps l'image AA' (531, 3°, et 565).

La manipulation ci-dessus constitue la *mise au point*. Dans le microscope, où la distance de l'objectif à l'oculaire est constante, la mise au point s'obtient en approchant ou écartant l'instrument de l'objet qu'on veut observer. Dans les lunettes et les télescopes, où les objets qu'on observe sont inaccessibles, elle s'obtient en faisant varier la distance de l'oculaire à l'objectif (579).

571. Calcul du grossissement dans le microscope composé. — Le grossissement, dans le microscope composé, est le produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire. En effet, si l'on se reporte à la figure 464, le grossissement de l'objectif est $\frac{ab}{AB}$, et celui de l'oculaire $\frac{a'b'}{ab}$. Or le produit de $\frac{ab}{AB}$ par $\frac{a'b'}{ab}$ est $\frac{a'b'}{AB}$, qui est bien le grossissement total. Par suite, on pourrait le calculer en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire, et des distances de l'objet et de son image à ces deux verres; mais, en général, on le détermine expérimentalement de la manière suivante.

* **572. Mesure du grossissement à l'aide du micromètre et de la chambre claire.** — On nomme *micromètre* une petite lame de verre sur laquelle sont tracés, au diamant, des traits parallèles, distants les uns des autres de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre; et *cham-*

bre claire un petit prisme de verre qui donne le moyen de suivre avec un crayon, sur une feuille de papier, le contour des images vues dans le microscope, et permet ainsi d'en prendre une copie fidèle. En combinant la chambre claire et le micromètre, on détermine facilement le grossissement, c'est-à-dire le rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet (568).

On a donné à la chambre claire différentes formes (586). La suivante, due à M. Nachet, consiste en un prisme oblique *ab*, de

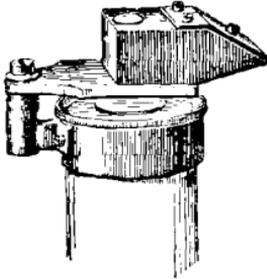


Fig. 467.

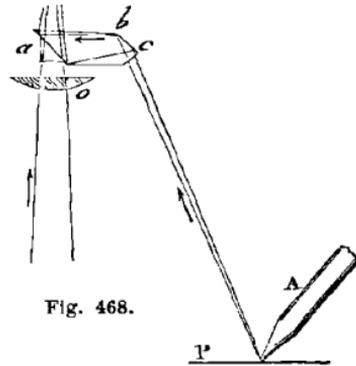


Fig. 468.

crown, tronqué en *c* (fig. 468). Fixé dans une monture de cuivre percée sur les faces inférieure et supérieure, le prisme se place sur l'oculaire du microscope, comme le montre la figure 467. Une feuille de papier *P* étant posée auprès de l'instrument, une pointe de crayon *A*, appuyée sur le papier, envoie vers le prisme un faisceau de lumière qui entre normalement à la face *c*, subit une première réflexion totale sur la face *bc*, une deuxième sur la face *a*, et de là arrive à l'œil comme s'il sortait du microscope. En *a* est un petit prisme rectangle appliqué sur le premier prisme avec du baume de Canada, qui est transparent et dont l'indice de réfraction surpasse peu celui du crown. Les rayons qui émergent de l'oculaire *o*, traversant ainsi un milieu à faces parallèles, arrivent à l'œil sans déviation; l'observateur voit donc simultanément, dans le microscope, le crayon et l'image des objets, et peut sans difficulté suivre les contours de celle-ci avec le crayon. Toutefois il importe que l'image du crayon et celle des objets qu'on observe se fassent toutes les deux à la même distance, celle de la vue distincte.

Pour mesurer le grossissement à l'aide de la chambre claire ci-dessus, on place sur le porte-objet le micromètre, que nous supposerons divisé en centièmes de millimètre, puis on reçoit, à la chambre claire, l'image des divisions du micromètre sur un

papier qui porte une échelle en millimètres. Si l'on observe alors que 10 divisions du micromètre recouvrent sur le papier une longueur de 120 millimètres, on en conclut que l'image d'une seule division du micromètre a une grandeur de 12 millimètres. Divisant 12 par $\frac{1}{100}$, c'est-à-dire la grandeur absolue de l'image par celle de l'objet, le quotient 1200 est le grossissement.

Réciproquement, une fois le grossissement connu, on en déduit la grandeur réelle des objets en divisant la grandeur de l'image, prise à la chambre claire, par le grossissement.

On obtient encore la grandeur des objets sans chambre claire, à l'aide de deux micromètres, l'un, divisé en centièmes de millimètre, qu'on pose sur le porte-objet, l'autre, à divisions arbitraires, mais égales, qu'on place entre les deux verres de l'oculaire en *b* (fig. 465). On l'introduit dans le tube H par une ouverture latérale, et une vis de rappel *c* sert à l'élever ou à l'abaisser pour la mise au point; on tourne ensuite le tube H sur lui-même pour orienter parallèlement les deux micromètres, puis on le fixe en serrant la vis de pression *d*. Observant alors les micromètres, on trouve, par exemple, que 12 divisions du micromètre posé sur le porte-objet couvrent 4 divisions du micromètre supérieur; à chaque division du second correspondent donc 3 divisions du premier, c'est-à-dire $\frac{3}{100}$ de millimètre. Cela posé, substituant au micromètre inférieur l'objet dont on veut avoir la grandeur, et observant de nouveau, si l'image de l'objet correspond à 10 divisions du micromètre supérieur, on en conclut que la dimension observée est 10 fois $\frac{3}{100}$ de millimètre, ou 0^{mill},3.

* 573. **Microscope binoculaire de Nachet.** — Le microscope qui vient d'être décrit, ainsi que tous ceux construits avant lui, est monoculaire, c'est-à-dire qu'on y observe les objets avec un seul œil. Or on verra bientôt, en traitant du stéréoscope (604), que c'est la vision avec les deux yeux qui nous fait percevoir le relief des corps. Le microscope monoculaire ne peut donc nous donner des objets qu'un aspect qui nous expose à de fréquentes illusions, que tendent encore à augmenter l'éclairage de bas en haut et l'ignorance où l'on est le plus souvent de la structure des objets soumis à l'observation. C'est pour obvier à cet inconvénient que M. Nachet a construit le microscope binoculaire.

La figure 469, tirée du catalogue de M. Nachet, montre ce microscope, qui est à deux corps, l'un vertical, l'autre oblique; chacun a son oculaire, mais il n'y a qu'un objectif pour les deux. L'objet étant en *i* et l'objectif en *o*, le faisceau presque parallèle qui sort de l'objectif est divisé en deux portions égales par un prisme rectangle A (fig. 470) : la moitié de droite arrive directement à l'ocu-

laire O du corps vertical, tandis que la moitié de gauche, après une première réflexion totale sur la grande face du prisme A et une deuxième sur un second prisme B , émerge suivant le corps oblique vers l'oculaire O' . Or, l'angle des deux tubes étant le même

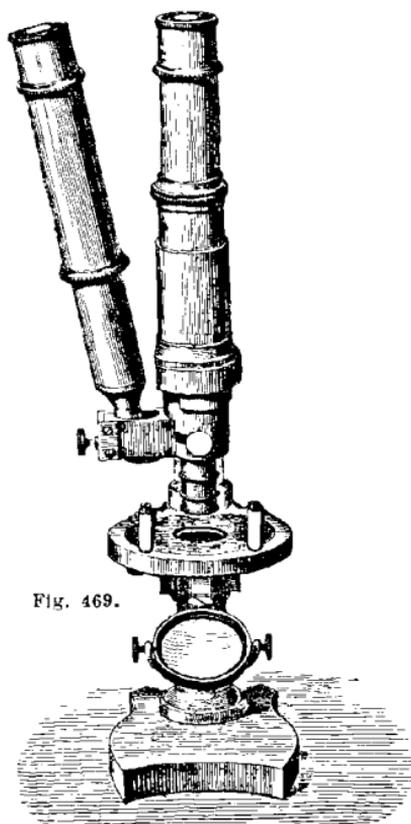


Fig. 469.

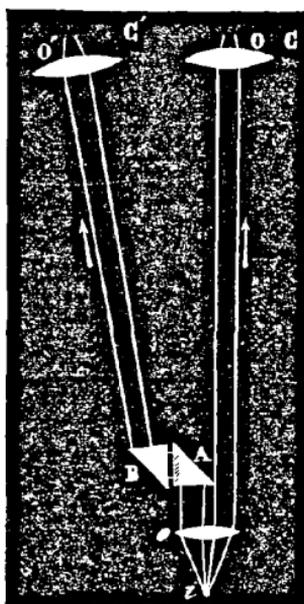


Fig. 470.

que l'angle optique CiC' (599) si les deux yeux, placés en C et en C' , regardaient directement l'objet, chaque œil voit celui-ci exactement sous le même point de vue que s'il le regardait, grossi, sans microscope; d'où résulte la perception nette du relief.

574. Achromatisme du microscope. — Dans le microscope composé réduit à deux verres, comme on l'a supposé dans la figure 464, non-seulement il se produirait une forte aberration de sphéricité, mais les images seraient irisées sur les bords par un effet de dispersion (561), et le seraient d'autant plus, que le microscope serait plus grossissant. C'est pour corriger ces aberrations que l'objectif et l'oculaire ne sont pas simples, mais composés

de plusieurs verres, comme le représente la figure 466, dans laquelle l'objectif est formé de trois petites lentilles achromatiques, et l'oculaire de deux lentilles n et O , dont la première suffit seule pour produire l'achromatisme, lorsque le microscope n'est pas très-grossissant.

En effet, soient ab l'objet qu'on observe, O l'objectif et O' un oculaire simple, c'est-à-dire à un seul verre (fig. 471), et supposons que le verre n ne soit pas encore interposé entre O et O' . Les rayons partis du point b , par exemple, étant plus ou moins dispersés à leur passage dans l'objectif, les rayons rouges vont former leur foyer en R sur l'axe secondaire du point b ; tandis que les rayons violets, plus réfringibles, vont concourir en V , plus près de la lentille; puis les cinq autres faisceaux du spectre entre R et V ; la même chose de V' à R' pour les rayons partis de a . Si l'on regarde actuellement, à travers l'oculaire O' , les sept zones colorées $VV'RR'$, les couleurs se superposant dans la partie centrale, celle-ci paraît blanche, tandis que les bords sont colorés en rouge et en orangé; mais qu'on interpose la lentille n , et la coloration disparaît. En effet, ayant tiré les axes secondaires CR , CR' , CV et CV' , les rayons rouges, à leur sortie de la len-

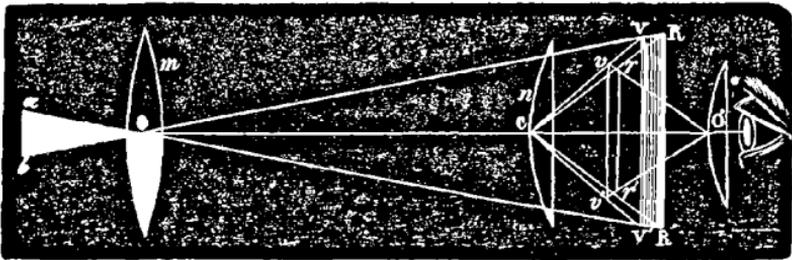


Fig. 471.

tille n , se rapprochent de l'axe OO' et vont former leur foyer en r et r' , sur les axes secondaires CR et CR' , et les rayons violets en v et v' , plus près de la lentille. Or, en combinant convenablement les courbures des lentilles n et O' , on arrive à obtenir que les foyers v et r soient en ligne droite avec le centre optique de l'oculaire. Les autres faisceaux colorés formant d'ailleurs leurs foyers très-sensiblement sur la ligne vr , lorsqu'on regarde à travers l'oculaire les sept faisceaux, ceux-ci étant vus sous le même angle, il y a recomposition de la lumière, et toute coloration cesse.

Le verre n se désigne sous le nom de *lentille de champ*, parce

qu'on va voir (576) qu'il augmente le *champ* dans les instruments d'optique; on lui donne aussi le nom de *lentille collective*, et celui de *verre de Campani*.

575. **Oculaire négatif et oculaire positif.** — Dans la figure ci-dessus, le système des verres n et O' , fixés à une distance constante dans un même tube, qui est le *porte-oculaire*, se désigne sous le nom d'*oculaire négatif*, ou d'*oculaire de Huyghens*. Dans cet oculaire, l'image réelle fournie par l'objectif se forme entre les deux verres, et ceux-ci, qui sont plans-convexes, ont chacun leur face plane tournée vers l'œil.

On construit aussi des oculaires dits *oculaires positifs*, ou *oculaires de Ramsden*. Ils sont composés de deux verres plans-convexes dont les convexités se regardent, et l'image réelle, au lieu de se faire entre les deux lentilles, comme ci-dessus, se forme en avant; d'où les deux verres agissent alors comme un seul pour donner de l'image réelle une image virtuelle amplifiée. La première lentille, rendant les rayons plus convergents, agit comme le verre de Campani, dans l'oculaire négatif, pour corriger les aberrations.

576. **Champ, diaphragme, point oculaire.** — Dans le microscope et dans les autres instruments d'optique, le *champ* est

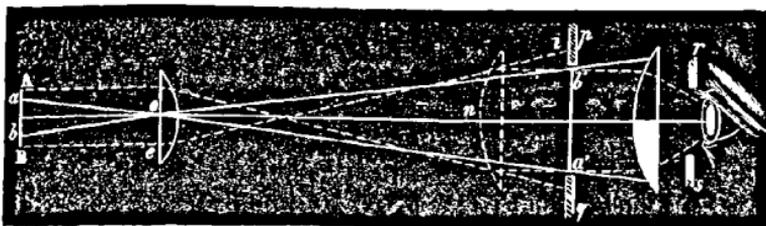


Fig. 472.

l'espace angulaire dans lequel sont compris tous les points visibles à travers l'oculaire. Il est limité par la surface conique qui a pour sommet le centre optique de l'objectif, et pour base l'ouverture d'un diaphragme pq placé en avant de l'oculaire, dans le plan de l'image fournie par l'objectif (fig. 472). En prolongeant cette surface de l'autre côté de l'objectif, en aob , on détermine la partie visible de l'objet AB , c'est-à-dire le champ.

L'objet dépassant les limites du champ, la figure montre qu'on n'en voit qu'une partie tant que le verre n n'est pas interposé; mais si l'on ajoute celui-ci, des rayons tels que Bei , qui étaient interceptés par le diaphragme, sont rapprochés vers l'oculaire,

et le point B, qui n'était pas visible, le devient; d'où le verre n augmente le champ, mais, en réduisant l'image $a'b'$, il diminue le grossissement.

Le diaphragme pq est formé d'un disque mince de laiton noirci, et percé d'une ouverture centrale. Il est destiné à ne laisser passer que les rayons qui arrivent à l'oculaire sous une faible obliquité et à réduire ainsi les effets d'aberration (561).

La grandeur du champ varie avec l'ouverture du diaphragme et avec sa distance à l'objectif. Plus cette distance est grande, plus le champ est petit. Il diminue encore quand le grossissement augmente; car plus l'oculaire est convergent, plus son diamètre est petit, et plus est resserré le faisceau qui le traverse. Enfin, la position de l'œil a aussi de l'influence sur l'étendue du champ. En effet, à leur sortie de l'oculaire, il y a un point où les rayons vont converger, c'est le *point oculaire*. C'est là que doit être placé l'œil pour embrasser tout le champ. Plus près ou plus loin, il ne recevrait qu'une partie des rayons émergents. Pour fixer la position de l'œil, on place en avant de l'oculaire un *œilleton* noir rs , percé d'une ouverture centrale, de manière que l'œil placé devant cette ouverture se trouve juste au point oculaire.

577. Applications du microscope. — Le microscope a été la source des découvertes les plus intéressantes en botanique, en zoologie, en physiologie. Des animaux dont l'existence était restée jusqu'alors inconnue ont été observés dans le vinaigre, dans la pâte de farine, dans les fruits et les fromages secs; la circulation et les globules du sang sont devenus visibles. Le microscope offre aussi de nombreuses applications dans l'industrie. Par exemple, il donne les moyens de reconnaître les différentes espèces de féculs, les falsifications trop souvent introduites dans les farines, dans les chocolats, etc.; il permet encore de constater dans les étoffes la présence du coton, de la laine, de la soie.

INSTRUMENTS QUI RAPPROCHENT LES OBJETS

578. Lunette astronomique. — La *lunette astronomique* est destinée à l'observation des astres. Réduite à sa plus simple expression, elle se compose, de même que le microscope, d'un objectif et d'un oculaire convergents. L'objectif M (fig. 473) donne de l'astre AB qu'on observe une image ab renversée, laquelle, vu la grande distance de AB, se forme au foyer principal F de l'objectif. Or, la distance des verres M et N étant réglée de façon que cette image se trouve entre l'oculaire N et le foyer principal f de ce verre, l'œil placé en E voit en $a'b'$ une image vir-

tuelle et amplifiée de l'image aérienne $ab1$. D'où l'on conclut que, dans la lunette astronomique, les images se forment de la même manière que dans le microscope. Ce qui différencie les deux instruments, c'est que la lunette étant destinée à observer des objets très-éloignés, il importe que l'objectif soit à grand

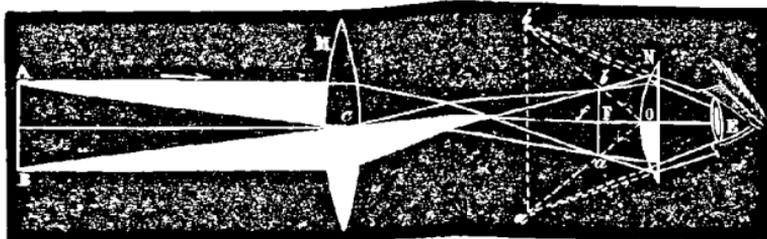


Fig. 473.

diamètre en même temps qu'à grand rayon de courbure : par la première condition, il reçoit plus de lumière de l'astre qu'on observe, et par suite donne plus d'éclat à l'image; par la seconde, l'aberration de sphéricité est moindre.

579. **Oculaire de la lunette astronomique, tirage, chercheur.** — Pour simplifier la construction dans la figure ci-dessus, on a supposé l'oculaire simple; mais, en réalité, dans la lunette astronomique, l'oculaire est toujours à deux verres, positif ou négatif, et cet oculaire est monté dans un tube indépendant de celui qui porte l'objectif.

Le corps de la lunette se compose d'un fort tube de laiton monté sur pied, de manière à pouvoir recevoir deux mouvements, l'un latéral autour d'un axe vertical, l'autre dans un plan vertical autour d'une charnière. Le tube est noirci à l'intérieur, afin de détruire toute réflexion qui renverrait vers l'oculaire d'autres rayons que ceux qui viennent de l'astre qu'on observe. A l'extrémité p (fig. 474) est l'objectif, qui est à grand diamètre et achromatique. A l'autre extrémité est un tube à petit diamètre m , dans lequel sont fixés les deux verres de l'oculaire.

Dans les microscopes, où l'on peut approcher à volonté de l'objectif les objets qu'on observe, on a vu qu'on obtient par là la mise au point (570). Dans les lunettes, ce rapprochement étant

¹ Dans cette construction, on représente en AB l'objet qu'on observe; or, en réalité, il est toujours très-éloigné de l'objectif. Si on l'en suppose aussi rapproché, c'est afin de montrer, dans son ensemble, la marche des rayons depuis l'objet qu'on observe jusqu'à l'œil. La même remarque s'appliquera ci-après à la lunette terrestre et à celle de Galilée.

impossible, c'est l'oculaire qui se déplace vers l'image aérienne fournie par l'objectif; ce qui conduit encore à la mise au point. Pour cela, le tube *m* glisse à frottement doux dans un tube plus fort *r*. Celui-ci, qui se prolonge dans le corps de la lunette, y est muni d'une crémaillère, dans laquelle engrène un petit pignon qu'on fait tourner à l'aide d'un bouton placé sur la droite

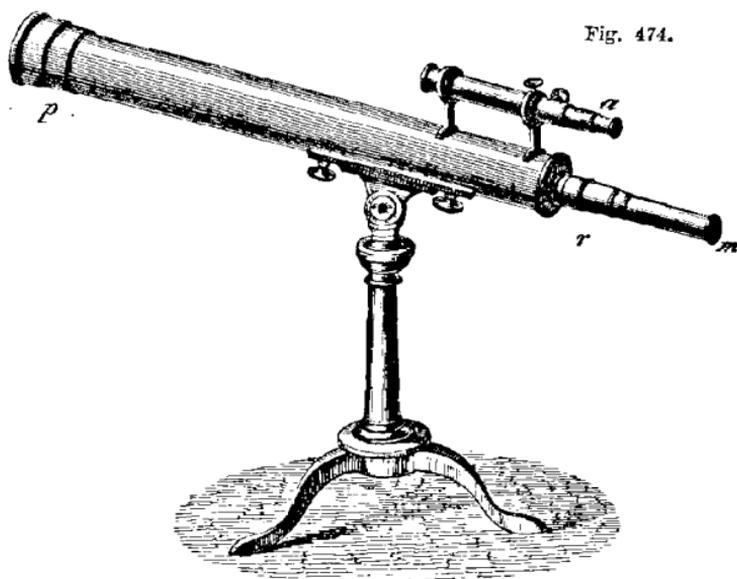


Fig. 474.

de la lunette, mais non visible dans la figure. Pour adapter l'instrument à la vue de l'observateur, on tire ou on enfonce d'abord le tube *m* jusqu'à ce qu'on obtienne une image assez nette; puis on achève de mettre au point en déplaçant d'un mouvement lent, à l'aide du pignon, le tube *r* et avec lui le porte-oculaire *m*. Pour les présbytes, on tire l'oculaire davantage; on l'enfonce pour les myopes. L'image qu'on obtient est renversée, ce qui est sans inconvénient pour l'observation des astres.

Au-dessus du tube principal est une petite lunette *a* qu'on nomme *chercheur*. Les lunettes d'un grand pouvoir amplifiant, ayant peu de champ (575), ne sont pas d'un usage commode pour chercher un astre; c'est pourquoi on regarde d'abord avec le chercheur, qui grossit moins, mais qui a plus de champ; on observe ensuite avec la lunette, dont l'axe est parallèle à celui du chercheur.

580. **Réticule, axe optique, ligne de visée.** — La lunette astro-

nomique, telle qu'on vient de la décrire, ne pourrait servir à déterminer avec précision la position d'un point qu'on y observe, car elle peut subir de légers déplacements angulaires sans que le point cesse d'être visible dans le champ. Il importe donc d'avoir, dans la lunette, un point de repère fixe, à l'aide duquel on puisse obtenir des visées précises.

On y arrive par le *réticule*, dû à Huyghens; c'est un système de deux fils d'araignée, ou de deux fils de platine obtenus par le procédé de Wollaston (75); ils sont tendus, l'un vertical, l'autre horizontal, sur un diaphragme placé en avant de l'oculaire, au lieu même où se forme l'image aérienne donnée par l'objectif.



Fig. 475.

La droite qui joint le point de croisement des fils au centre optique de l'objectif est l'*axe optique* de la lunette. En déplaçant le point de croisement, on déplace l'axe optique; mais, en général, on fait coïncider celui-ci avec l'axe géométrique, c'est-à-dire avec l'axe du corps de la lunette. L'axe optique ainsi déterminé devient la *ligne de visée*. Pour déterminer un point, on dirige la lunette de manière que l'image se forme exactement au point de croisement des fils. De jour, les fils du réticule se détachent nettement dans le champ de la lunette; de nuit, il faut les éclairer par la lumière d'une bougie placée latéralement.

Avec les oculaires négatifs, qui sont ceux généralement usités, le réticule est placé entre les deux verres sur un diaphragme pg (fig. 472), qui doit être approché d'avance ou reculé, selon la vue de l'observateur, de manière que l'œil placé au point oculaire distingue nettement les fils. Lorsque ensuite, observant un astre, on déplace l'oculaire jusqu'à ce que l'image apparaisse parfaitement nette, celle-ci est dans le plan du réticule.

581. Grossissement et éclat dans la lunette astronomique. —

Dans la lunette astronomique, on prend pour mesure du grossissement le rapport du diamètre apparent sous lequel on voit un astre dans la lunette à celui sous lequel on le voit à l'œil nu. Pour le déterminer, soit l'œil assez près de l'oculaire pour qu'on puisse remplacer l'angle $b'Ea'$ par $b'Oa'$ (fig. 473); de plus, vu la distance à laquelle est l'astre, on peut représenter son diamètre apparent par l'angle AcB au lieu de AE . Le grossissement étant

G , on a donc $G = \frac{b'Oa'}{AcB}$, ou $G = \frac{bOa}{bca}$. Mais $\frac{bOa}{bca} = \frac{cF}{OF}$ (567, I);

donc $G = \frac{cF}{OF}$, ou $G = \frac{cF}{Of}$, eu remplaçant OF par Of , qui en diffère très-peu. C'est-à-dire que, dans la lunette astronomique,

le grossissement a pour valeur approchée *le rapport de la distance focale de l'objectif à celle de l'oculaire*. Il est donc d'autant plus fort, que l'objectif est moins convergent et que l'oculaire l'est davantage.

La longueur de la lunette astronomique étant $OF + cF$, c'est-à-dire la somme des distances focales, cette longueur augmente avec le grossissement. Dans une bonne lunette, le grossissement ne dépasse pas 1 000, et la longueur atteint alors 8 mètres.

L'*éclat* est le rapport entre la clarté de l'image et celle de l'objet. Pour un même grossissement, il est proportionnel à la surface de l'objectif; et, à objectif égal, il est en raison inverse du grossissement superficiel. La qualité d'une lunette n'est pas due seulement à son grossissement, mais à l'éclat des images et à leur netteté, celle-ci dépendant de la pureté des verres et de la perfection de leurs courbures.

582. **Lunette terrestre.** — La *lunette terrestre*, ou *longue-vue*, ne diffère de la lunette astronomique que parce que les images

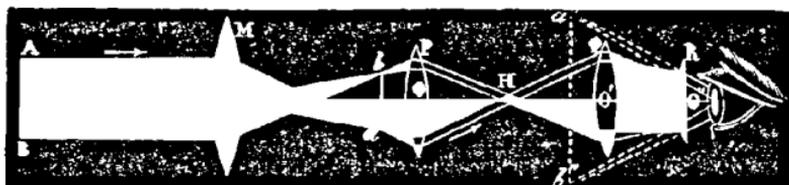


Fig. 476.

sont redressées, ce qui s'obtient à l'aide de deux verres convergents P et Q (fig. 476), placés dans le même tube que l'oculaire et à une distance constante de ce verre. En effet, soient M l'objectif, AB l'objet qu'on observe et ba son image renversée. La lentille P étant à une distance égale à sa distance focale au delà de ab , les deux faisceaux qui convergent en a et en b se changent en faisceaux parallèles en traversant la lentille P, et après s'être croisés en H rencontrent la lentille Q, qui les fait converger respectivement en a' et b' . Il se forme donc, en $a'b'$, une image renversée de ab , et, par conséquent, droite par rapport à l'objet. Regardant enfin l'image $a'b'$ avec une loupe R, on voit une image $a''b''$ virtuelle et amplifiée de AB. Lorsque les deux lentilles P et Q sont identiques, les images ab et $a'b'$ sont égales, et le grossissement est le même que dans la lunette astronomique, c'est-à-dire le rapport de la distance focale de l'objectif à celle de l'oculaire.

Dans la figure ci-dessus, on a supposé l'oculaire R simple; mais, en réalité, c'est un oculaire négatif à deux verres, montés dans un même tube à des distances constantes avec les lentilles P et Q; en sorte que le tout forme un oculaire à quatre verres, spécial à la lunette terrestre. Cet oculaire est à double tirage comme celui de la lunette astronomique, et c'est encore en le déplaçant lentement qu'on opère la mise au point.

La lunette terrestre peut servir comme lunette astronomique; il suffit pour cela de remplacer l'oculaire à quatre verres par un oculaire à deux verres, qui ne redresse pas, mais qui fait perdre moins de lumière.

583. **Lunette de Galilée.** — La *lunette de Galilée*, ou *lunette de spectacle*, est la plus simple des lunettes; car elle ne se compose que de deux verres, un objectif convergent M et un oculaire divergent N (fig. 477), et donne immédiatement une image redressée.

L'objet étant représenté par la droite AB, son image tend à aller

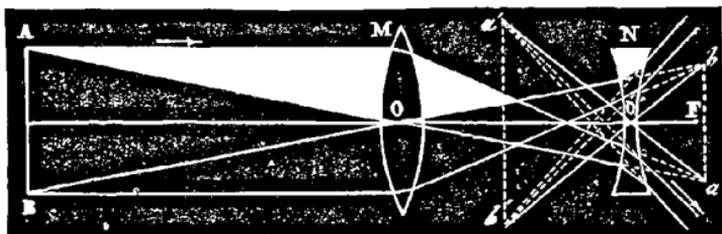


Fig. 477.

se former en ba , renversée, réelle et plus petite; mais, en traversant l'oculaire N placé entre l'objectif et son foyer, les rayons émis des points A et B se réfractent en s'écartant respectivement des axes secondaires bo' et ao' des points b et a de l'image. Il en résulte que ces rayons, prolongés en sens contraire de leur direction, vont concourir sur ces axes en a' et en b' ; l'œil qui les reçoit voit donc en $a'b'$ une image virtuelle droite et amplifiée, qui paraît plus rapprochée parce qu'elle est vue sous un angle $a'O'b'$ plus grand que l'angle AOB sous lequel on aperçoit l'objet. Quant au grossissement, de même que dans la lunette astronomique, il a pour valeur approchée le rapport de la distance focale de l'objectif à celle de l'oculaire. En effet, le grossissement égale $\frac{a'O'b'}{AOA} = \frac{bO'a}{bOa} = \frac{OF}{O'F}$ (567, I), en admettant que les foyers de l'oculaire et de l'objectif coïncident. Il découle de là que l'écartement des deux verres est la différence de leurs distances focales, et

par suite que la lunette de Galilée est très-courte et très-portative. Elle a l'avantage de faire voir les objets dans leur véritable position, et, de plus, n'ayant que deux verres, elle absorbe peu de lumière; mais, à cause de la divergence des rayons émergents, elle a peu de champ, et il est nécessaire de placer l'œil très-près de l'oculaire. Pour la mise au point, ce dernier est placé dans un tube à tirage, afin d'être approché ou écarté de l'objectif.

La lunette de spectacle, ou *jumelles*, est la même que celle ci-dessus; seulement elle est double, afin de former une image dans chaque œil, ce qui augmente l'éclat et donne le relief (603).

La lunette de Galilée a été la première dirigée vers les astres. C'est avec elle que cet illustre astronome découvrit les montagnes de la lune, les satellites de Jupiter et les taches du soleil.

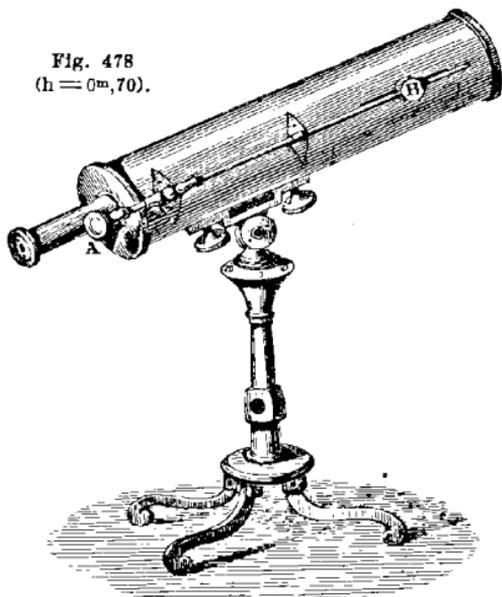
L'époque de l'invention des lunettes n'est pas connue. Les uns en attribuent la découverte à Roger Bacon, dans le XIII^e siècle; les autres, à J.-B. Porta, à la fin du XVI^e; quelques-uns, enfin, à Jacques Mélius, Hollandais, qui aurait trouvé par hasard, vers 1609, qu'en combinant deux verres, l'un concave, l'autre convexe, on voyait les objets plus grands et plus rapprochés.

584. **Télescopes.** — Les *télescopes* sont des instruments qui servent à voir les objets éloignés, et particulièrement les astres. La lunette astronomique et la lunette de Galilée sont donc des télescopes. Elles ont, en effet, d'abord porté ce nom, et se désignaient sous celui de *télescopes par réfraction* ou *télescopes dioptriques*; mais aujourd'hui on entend par télescopes des appareils dans lesquels la réflexion est utilisée, en même temps que la réfraction, au moyen de miroirs et de lentilles, pour montrer les objets éloignés. On a construit plusieurs sortes de télescopes: les plus connus sont ceux de Gregory, de Newton et d'Herschel.

1^o *Télescope de Gregory.* — La figure 478 représente ce télescope monté sur un pied sur lequel il peut tourner et s'incliner plus ou moins; la figure 479 en donne une coupe longitudinale. Ce télescope, inventé vers 1650, se compose d'un long tube de cuivre; l'un des bouts est fermé par un grand miroir concave M, de métal, percé d'une ouverture centrale dans laquelle passent les rayons qui se rendent à l'oculaire. Près de l'autre extrémité est un second miroir concave N, aussi de métal, un peu plus large que l'ouverture centrale du grand miroir, et d'un rayon de courbure beaucoup plus petit que le sien. Les axes des miroirs coïncident avec celui du tube. Le centre de courbure du grand étant en O et son foyer en *ab*, les rayons tels que SA, venant de l'astre, se réfléchissent sur ce miroir et vont former en *ab* une image ren-

versée et très-petite de l'astre. Or la distance des miroirs et leurs courbures respectives sont telles, que cette image se trouve entre le centre o et le foyer f du petit miroir; d'où les rayons, après

Fig. 478
(h = 0^m,70).



s'être réfléchis une seconde fois sur le miroir N , vont former en $a'b'$ une image amplifiée et renversée de ab (503), et, par conséquent, droite par rapport à l'astre. Enfin, on regarde cette image

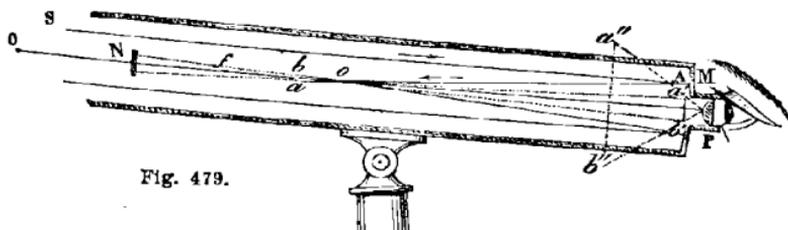


Fig. 479.

avec un oculaire P , à un ou à deux verres, qui a pour objet de l'amplifier de nouveau, et qui la fait voir en $a''b''$.

Les objets qu'on observe n'étant pas toujours placés à la même distance, le foyer du grand miroir et, par suite, celui du petit peuvent varier de position. En outre, la distance de la vue distincte n'étant pas la même pour tous les yeux, l'image $a''b''$ doit pouvoir être placée à des distances différentes. Pour tenir compte de ces

variations, il est nécessaire d'éloigner ou d'approcher le petit miroir du grand; pour cela, au moyen d'un bouton A (fig. 478), on fait tourner une tringle qui, à l'aide d'un pas de vis, transmet le mouvement à une pièce B à laquelle est fixé le petit miroir.

2° *Télescope de Newton*. — Ce télescope diffère peu de celui de Gregory; seulement le grand miroir n'est plus percé, et le petit miroir, qui est plan, est incliné latéralement de 45 degrés vers un oculaire placé sur le côté du corps du télescope. La difficulté de construction que présentent les miroirs de métal avait fait abandonner les télescopes de Gregory et de Newton, lorsque Foucault, étant parvenu à argenter les miroirs de verre avec une grande perfection et sans leur rien faire perdre de leur degré de poli, a pensé à en faire l'application au télescope de Newton. Son premier miroir n'avait que 10 centimètres de diamètre; mais il en a successivement construit de 22 centimètres, de 33, de 42 et de 80.

La figure 481 ci-après représente un télescope de Newton monté

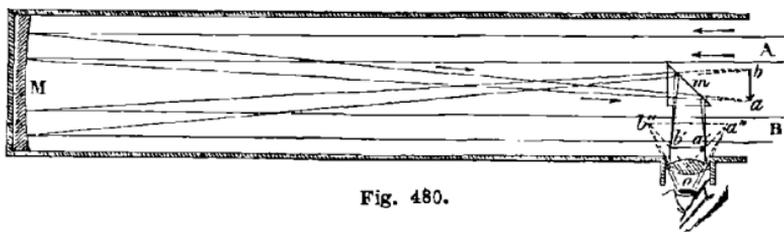


Fig. 480.

sur pied parallactique, et la figure 480 en montre une coupe longitudinale. En M est le miroir de verre argenté qui reçoit les rayons de l'astre; et en m est un petit prisme rectangle de verre, sur l'hypoténusé duquel les rayons réfléchis par le miroir subissent la réflexion totale (524), et sont rejetés sur le côté de l'instrument. Sans l'interposition de ce prisme, le faisceau A, émis par le bord supérieur de l'astre, irait converger en a, et le faisceau B, émis par le bord inférieur, en b. En sorte qu'en ab, au foyer principal du miroir, il se produirait une image réelle, renversée et très-petite de l'astre. Mais par suite de la réflexion sur l'hypoténuse du prisme, au lieu de se former en ab, l'image se forme en a'b', symétrique de ab par rapport au plan m prolongé; là on la regarde avec un oculaire très-grossissant o, qui donne enfin l'image a''b'', virtuelle et très-amplifiée. Pour simplifier la construction, nous avons supposé l'oculaire à un seul verre; mais celui de Foucault est un oculaire à quatre verres placé sur le côté du télescope, et qui, suivant son pouvoir grossissant et la dimension du miroir argenté, peut donner un grossissement de 50 à 800.

Dans cet instrument, c'est le miroir qui fait l'office d'objectif, mais évidemment sans aucune aberration de réfrangibilité (561). Quant aux aberrations de sphéricité, Foucault est parvenu à les faire disparaître au moyen de retouches successives faites au miroir. Toutefois il a reconnu que, pour corriger les aberrations de sphéricité venant de l'oculaire, il ne devait pas donner à ses miroirs une surface rigoureusement parabolique, mais les terminer par une surface expérimentale qui, agissant de concert avec le système des verres amplificateurs de l'oculaire, assure la perfection de l'image résultante.

Le miroir une fois poli, il reste à l'argenter sur sa surface concave. Pour cela, Foucault a fait usage du procédé Drayton légèrement modifié, en plongeant le miroir dans un bain d'argent d'une nature assez complexe, savoir : eau distillée, alcool pur, nitrate d'argent fondu, nitrate d'ammoniaque, ammoniaque, gomme galbanum et essence de girofle. Au contact du verre poli, ce bain se réduit, l'argent se dépose, et, au bout de 20 à 25 minutes, la couche d'argent a acquis l'épaisseur convenable. Quoique la couche ainsi obtenue soit déjà polie et miroitante, on achève de lui donner un poli parfait par un frottement prolongé avec une peau de chamois rougie d'oxyde de fer. Ainsi polis, les miroirs argentés réfléchissent 75 pour 100 de la lumière incidente.

Les nouveaux télescopes à miroir parabolique de verre argenté ont, sur les anciens télescopes à miroir sphérique de métal, le triple avantage de donner des images plus pures, d'avoir un poids moindre, et d'être beaucoup plus courts, leur distance focale n'étant que six fois le diamètre du miroir.

Ces détails connus, il nous reste à décrire l'appareil dans son ensemble. Le corps du télescope, qui est de bois, a la forme d'un tube octogonal (fig. 481). L'extrémité G est ouverte; à l'autre extrémité est le miroir. A partir de ce dernier, au tiers environ de la longueur, sont fixés deux tourillons reposant sur des coussinets portés par deux montants de bois A et B. Ceux-ci sont eux-mêmes fixés à une table tournante PQ, roulant à l'aide de galets sur un plateau fixe RS, orienté parallèlement à l'équateur. Sur le pourtour de la table tournante est un cercle de cuivre divisé en 360 degrés, et au-dessous, aussi fixé à la table tournante, est un engrenage circulaire dans lequel engrène une vis sans fin V. En faisant marcher celle-ci dans un sens ou dans l'autre par une manivelle *m*, on fait tourner la table PQ, et avec elle tout le télescope. Un vernier *x*, adapté sur le plateau fixe RS, donne les fractions de degré. Enfin, sur l'axe des tourillons est monté un cercle gradué O, correspondant au cercle horaire de l'axe qu'on observe, et ser-

vant par conséquent à mesurer la *déclinaison* de l'astre, c'est-à-dire sa distance angulaire à l'équateur; tandis que les degrés tracés autour de la table PQ servent à mesurer l'*ascension droite*,

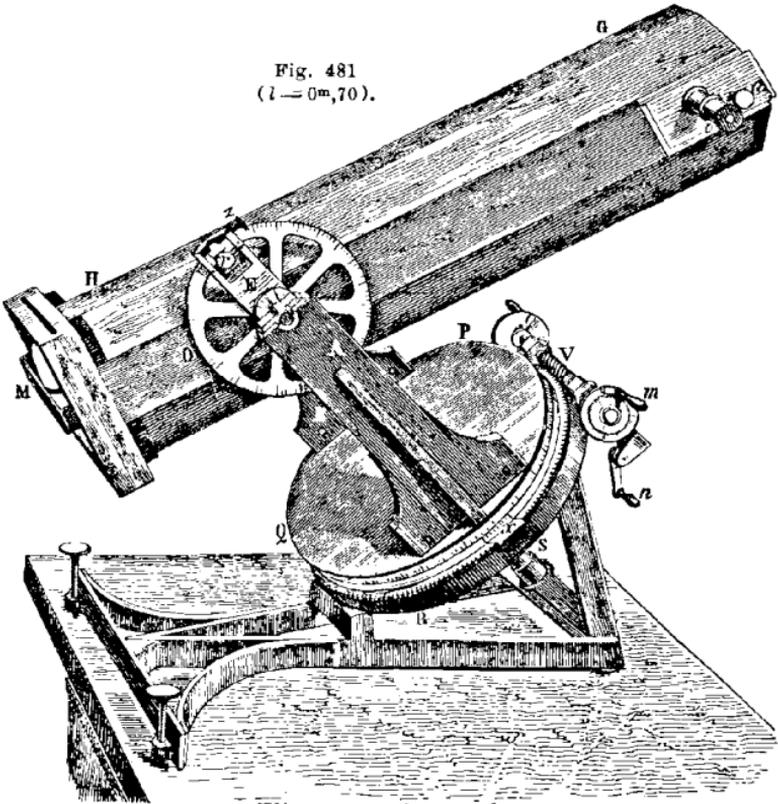


Fig. 481
(l = 0^m,70).

c'est-à-dire l'angle que fait le cercle horaire de l'astre avec un cercle horaire choisi arbitrairement.

Pour fixer le télescope en déclinaison, une pièce de cuivre E, liée au montant A, porte une pince dans laquelle glisse le limbe O, et qui se serre par un bouton à vis r. Enfin, sur le côté de l'appareil est l'oculaire o, monté sur une plaque de cuivre à coulisse, qui porte aussi le petit prisme m représenté dans la coupe (fig. 480). Pour mettre l'image au point, il suffit de faire avancer ou reculer cette plaque au moyen d'une crémaillère et d'un bouton a. La manivelle n sert à faire *embrayer* ou *désembrayer* la vis V.

* 3^e *Télescope d'Herschel*. — Le télescope d'Herschel, attribué aussi à Lemaire, n'est formé que d'un seul réflecteur concave M

(fig. 482) et d'un oculaire *o*. Le réflecteur est incliné sur l'axe de manière que l'image de l'astre qu'on observe vienne se former en *ab* sur le côté du télescope, près de l'oculaire *o*, qui donne ensuite l'image amplifiée *a'b'*. Dans ce télescope, les rayons n'éprouvant qu'une seule réflexion, la perte de lumière est moindre que dans les deux précédents, et l'image est plus éclairée. Quant au grossissement, il est, comme dans le précédent, le rapport de la distance focale principale du miroir à celle de l'oculaire.

Les télescopes à réflexion furent adoptés à une époque où l'on

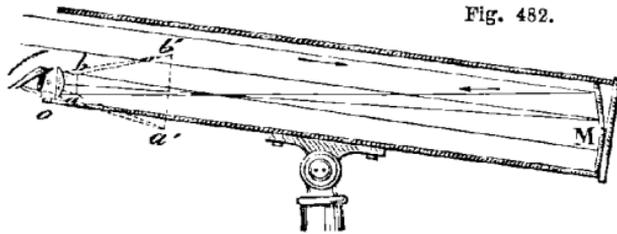


Fig. 482.

ne savait pas corriger, dans les objectifs, l'aberration de réfrangibilité; lorsqu'on sut construire des objectifs achromatiques, on préféra les télescopes dioptriques, c'est-à-dire uniquement à réfraction, comme la lunette astronomique, aux télescopes à réflexion, dont le miroir métallique, pour des dimensions un peu considérables, présentait de grandes difficultés de construction. Aujourd'hui que Foucault a remplacé les miroirs métalliques par des miroirs de verre plus faciles à construire, les télescopes à réflexion peuvent être utilisés comme les télescopes à réfraction.

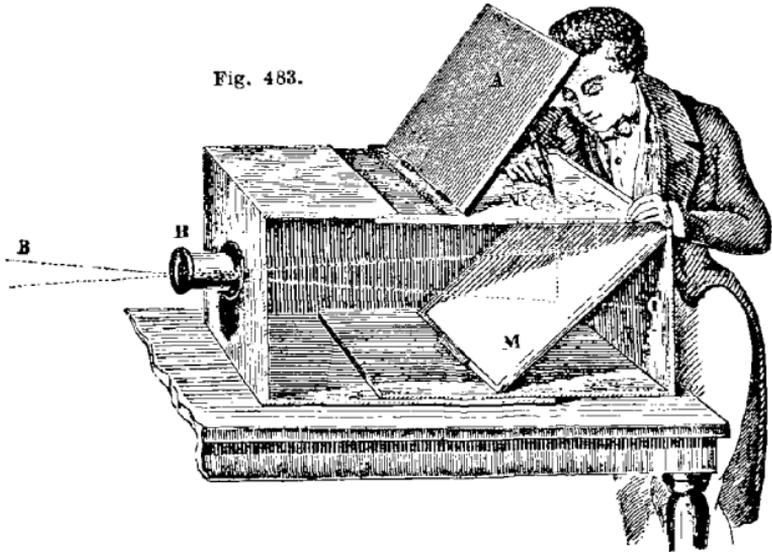
INSTRUMENTS DE PROJECTION

585. **Chambre obscure.** — La *chambre obscure*, ou *chambre noire*, est une chambre fermée de toutes parts à la lumière, à l'exception d'une petite ouverture par laquelle entrent les rayons lumineux (fig. 369, page 439). Alors tous les objets extérieurs dont les rayons peuvent atteindre l'ouverture vont se peindre sur le mur opposé, avec des dimensions réduites et avec leurs couleurs naturelles; mais les images sont renversées.

C'est Porta, physicien napolitain, qui fit connaître, en 1570, le phénomène produit par un faisceau lumineux qui pénètre dans une chambre obscure. Peu de temps après, le même physicien observa que si, dans l'ouverture de la chambre obscure, on fixe une lentille convergente, et qu'on place au foyer de celle-ci un écran blanc, l'image qui s'y produit gagne considérablement en éclat, en net-

teté, en coloris, et est admirable de vérité. Ces images sont d'autant mieux éclairées que la lentille est plus grande, et leurs dimensions augmentent avec la distance focale.

Pour utiliser la chambre noire dans l'art du dessin, on lui a donné diverses formes, de manière à la rendre portable et à redresser les images. La figure 483 représente la *chambre noire à tirage*. Elle consiste en une boîte rectangulaire, dans laquelle les



rayons lumineux R pénètrent au travers d'une lentille B, et tendent à aller former une image sur la paroi opposée O, qui doit être éloignée de la lentille B d'une longueur égale à sa distance focale. Mais les rayons, rencontrant un miroir de verre M incliné de 45 degrés, changent de direction, et l'image va se former sur un écran de verre dépoli N. En plaçant sur cet écran une feuille de papier à calque, on peut prendre avec fidélité, au crayon, les contours de l'image. Une planchette de bois A sert à intercepter la lumière, qui éclairerait l'image et empêcherait de la voir.

La boîte est formée de deux parties qui peuvent glisser à coulisse l'une dans l'autre, de manière que la partie antérieure se tirant plus ou moins, l'image aille se former, après la réflexion, exactement sur l'écran N, quelle que soit la distance de l'objet dont on veut prendre le dessin.

La figure 484 représente une autre espèce de chambre noire, connue sous le nom de *chambre noire à prisme*. Dans un étui de

cuivre A est un prisme triangulaire P (fig. 485), lequel tient lieu à la fois de lentille convergente et de miroir; pour cela, une de ses faces étant plane, les autres ont une courbure telle, que par les réfractations combinées, à l'entrée et à la sortie des rayons, elles produisent l'effet d'un ménisque convergent C (fig. 421, page 481). Il résulte de là que les rayons émis par un objet AB,

Fig. 484.

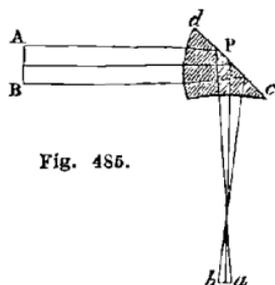
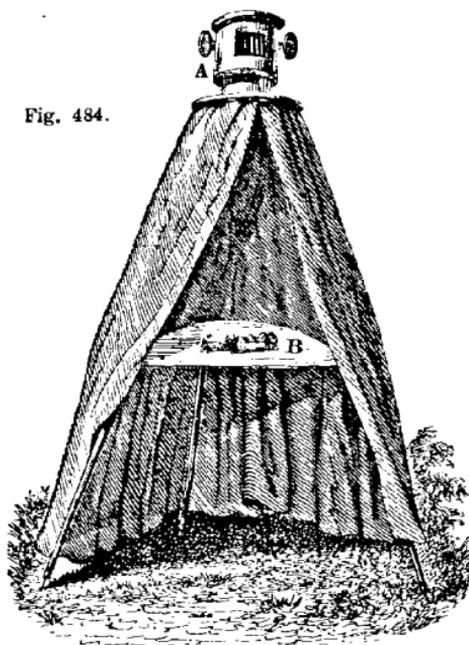


Fig. 485.

après avoir pénétré dans le prisme et éprouvé sur la face cd la réflexion totale, vont former en ab une image réelle de AB .

La tablette B correspond au foyer du prisme contenu dans l'étui A : par suite, l'image des objets extérieurs vient se former sur une feuille

de papier placée sur cette tablette. Le tout est enveloppé d'un rideau noir, et, en se plaçant dessous, le dessinateur est complètement dans l'obscurité. La tablette s'enlève à volonté et les pieds se plient à l'aide de charnières, ce qui rend tout à fait portatif cet appareil, dû à Ch. Chevalier.

* 586. **Chambre claire.** — La *chambre claire*, ou *camera lucida*, due à Wollaston, est un petit appareil dont on se sert pour obtenir une image fidèle d'un paysage, d'un monument ou de tout autre objet. Elle consiste en un petit prisme de verre à quatre faces, dont la figure 486 représente une section perpendiculaire aux arêtes. L'angle A est droit, l'angle C de 135 degrés, et chacun des angles B et D de 67 degrés et demi. Ce prisme est supporté sur un pied à tirage qui permet de le hausser ou de l'abaisser à volonté; de plus, il peut se tourner plus ou moins autour d'un

axe parallèle à ses arêtes. La face AB étant tournée vers l'objet dont on cherche l'image, les rayons partis de cet objet tombent à peu près perpendiculaires sur cette face, y pénètrent sans réfraction sensible et viennent éprouver la réflexion totale sur la face BC; car la ligne *ab* étant normale à cette face, on reconnaît facilement que l'angle d'incidence *Lna* et l'angle B sont égaux,

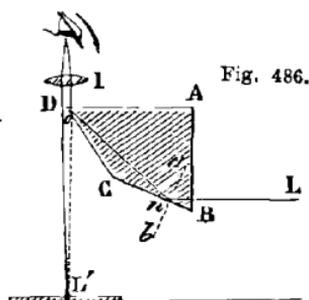


Fig. 486.

comme ayant leurs côtés perpendiculaires; et puisque l'angle B est de 67 degrés et demi, l'angle *Lna* est plus grand que l'angle limite du verre (519), condition nécessaire pour que la réflexion totale ait lieu. Arrivés en *o*, les rayons subissent encore la réflexion totale et sortent très-près du sommet D, suivant une direction sensiblement perpendiculaire à la face DA, en sorte que l'œil qui reçoit ces rayons voit en L' l'image

de l'objet L. Si l'on suit alors les contours de l'image avec un crayon, on en obtient un dessin très-correct. Mais il se présente ici une difficulté assez grande, c'est de voir en même temps l'image et la pointe du crayon; car les rayons qui viennent de l'objet donnent une image qui est plus éloignée de l'œil que le crayon. On corrige ce défaut en interposant entre l'œil et le prisme une lentille I, qui donne la même convergence aux rayons venant du crayon et à ceux partis de l'objet; mais encore faut-il placer l'œil très-près du bord du prisme et de manière que l'ouverture pupillaire se trouve partagée en deux parties, dont l'une voit l'image et l'autre le crayon.

587. Lanterne magique. — La *lanterne magique* est un appareil qui sert à obtenir sur un écran, dans une chambre obscure, des images amplifiées de petits objets. Elle consiste en une boîte de fer-blanc dans laquelle est une lampe placée au foyer d'un réflecteur concave A (fig. 487 et 488). Les rayons réfléchis par celui-ci sont reçus sur une lentille convergente B, qui les concentre vers des figures diverses peintes sur une lame de verre V. Ces figures, ainsi éclairées fortement, sont placées devant une seconde lentille convergente C, à une distance un peu plus grande que sa distance focale principale. Dans cette position, cette lentille projette, sur un écran convenablement éloigné, une image réelle, renversée et très-amplifiée, des objets peints sur verre (531, 2^o). Pour redresser l'image, on place le verre peint, dans la lanterne, de manière que les dessins soient renversés.

La lanterne magique a été inventée par le Père Kircher, mort à Rome en 1680.

Le grossissement fourni par la lanterne magique est le même que celui que donnent les lentilles (fig. 432), c'est-à-dire le rapport des distances de la lentille C à l'écran et à l'objet. Par con-

Fig. 487.

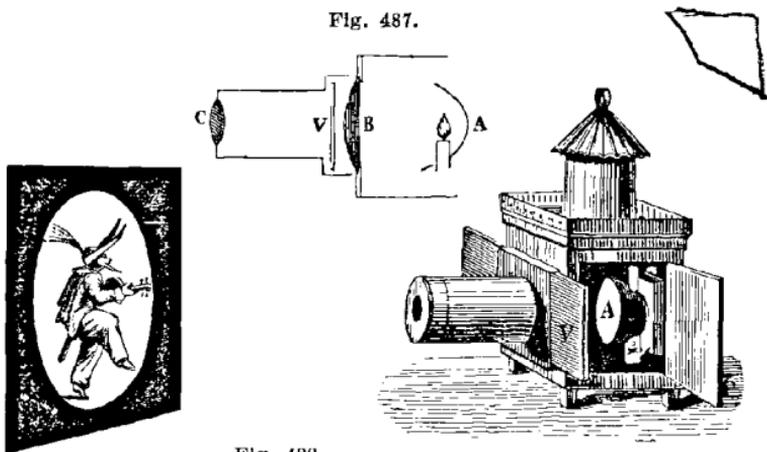


Fig. 488.

séquent, si l'image est 10 fois, 100 fois plus éloignée de la lentille que l'objet, le grossissement est 10 ou 100. On conçoit dès lors qu'avec une lentille à court foyer on pourra, si l'écran est suffisamment éloigné, obtenir des images très-amplifiées.

588. **Microscope solaire.** — Le *microscope solaire* est une véritable lanterne magique éclairée par les rayons solaires, laquelle sert à obtenir des images très-amplifiées d'objets extrêmement petits. Cet appareil fonctionne dans une chambre noire; la figure 489 le représente fixé au volet de la chambre, et la figure 490 en montre les détails intérieurs.

Un miroir plan M, placé hors de la chambre obscure, reçoit les rayons solaires et les réfléchit vers une lentille convergente l, et de là sur une deuxième lentille o (fig. 490), nommée *focus*, qui les concentre en son foyer. En ce point est l'objet dont on veut avoir l'image; il est placé entre deux lames de verre, qu'on introduit entre deux lames métalliques m, qui les compriment entre elles par l'effet d'un ressort à boudin placé en n. L'objet étant alors fortement éclairé et placé très-près du foyer d'un système de trois lentilles très-convergentes x, celles-ci en donnent une image ab, renversée et très-amplifiée, sur un mur ou sur un écran blanc convenablement éloigné. Des vis à bouton C et D servent à régler la distance des lentilles o et x à l'objet, afin que celui-ci soit exac-

tement au foyer de la première, et que l'image donnée par les lentilles α corresponde exactement à l'écran.

La direction de la lumière solaire variant constamment, il faut que celle du réflecteur disposé hors du volet de la chambre obscure change aussi, afin que la réflexion se fasse constamment suivant

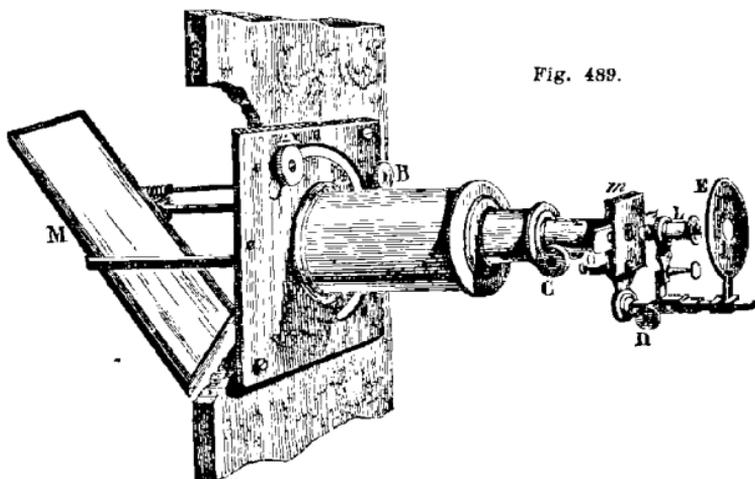


Fig. 489.

l'axe du microscope. Le procédé le plus précis serait d'avoir recours à l'héliostat (513); on y supplée en inclinant plus ou moins le miroir M au moyen d'une vis sans fin et d'un pignon B (fig. 489),

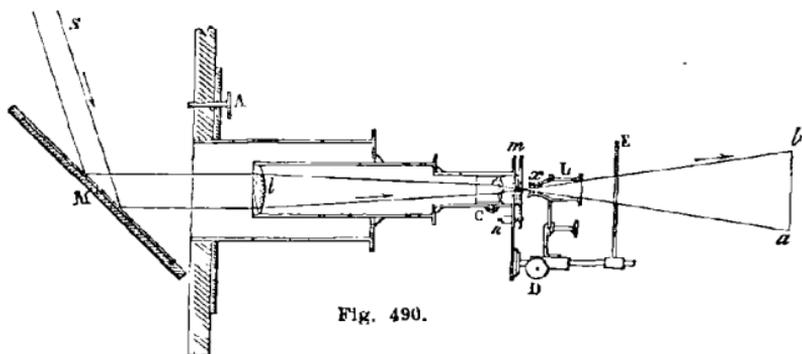


Fig. 490.

et en faisant tourner ce même miroir autour de la lentille l , ce qui s'obtient à l'aide d'un bouton A, qui se meut dans une coulisse fixe et transmet au miroir un mouvement de rotation autour de l'axe de l'instrument.

Le microscope solaire a l'inconvénient de concentrer sur l'objet

une chaleur très-intense qui l'altère promptement. On y remédie en interposant de l'eau saturée d'alun, qui, ayant un très-faible pouvoir diathermane, arrête une partie de la chaleur (441).

Le grossissement se détermine en mettant à la place de l'objet une lame de verre sur laquelle sont tracées des divisions distantes de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre. Mesurant sur l'image l'intervalle de deux de ces divisions, et le divisant par l'intervalle réel, on obtient pour quotient le grossissement. Le même procédé peut être employé pour le microscope photo-électrique (589). Suivant le grossissement qu'il s'agit d'obtenir, l'objectif α est formé d'une, de deux ou de trois lentilles, toutes achromatiques.

Le microscope solaire donne le moyen de montrer à de nombreux spectateurs des phénomènes curieux : par exemple, la circulation du sang dans la queue des têtards ou dans la langue d'une grenouille ; la cristallisation des sels, et particulièrement du sel ammoniac ; les animalcules qu'on observe dans le vinaigre, dans la colle de farine moisie, dans les eaux stagnantes, etc.

* 589. **Microscope photo-électrique.** — Le *microscope photo-électrique* n'est autre que le précédent éclairé par la lumière électrique. Cette lumière, par son intensité, par la fixité qu'on parvient à lui donner et par la facilité avec laquelle on peut se la procurer à toute heure, est de beaucoup préférable à l'emploi de la lumière solaire. Nous ne décrirons ici que le microscope photo-électrique ; la lumière électrique le sera en parlant de la pile.

Ce sont Foucault et M. Donné qui ont imaginé le microscope photo-électrique. La figure 491 représente la disposition que M. Duboscq a donnée à cet appareil. A une boîte rectangulaire de cuivre jaune est fixé extérieurement un microscope solaire ABD, identique avec celui qui a été décrit ci-dessus. Dans l'intérieur sont deux baguettes de charbon a et c , qui ne se touchent pas tout à fait, leur intervalle correspondant exactement à l'axe des lentilles du microscope. L'électricité d'une forte pile arrive par un fil de cuivre K au charbon a , de celui-ci passe sur le charbon c , qui, pour cela, doit d'abord être en contact avec le charbon a ; puis ensuite on les écarte un peu, l'électricité étant suffisamment conduite par le charbon vaporisé qui passe de a sur c . Enfin, du charbon c , l'électricité rejoint, par une colonne métallique o , un second fil de cuivre H qui la ramène à la pile.

Pendant le passage de l'électricité, il se produit entre les deux charbons un arc lumineux qui répand une lumière du plus vif éclat et éclaire fortement le microscope. Pour cela, on place en D, dans l'intérieur du tube, une lentille convergente dont le foyer principal correspond à l'intervalle même des deux charbons. De

la sorte, les rayons lumineux qui entrent dans les tubes D et B sont parallèles à leur axe, et tout se passant alors comme dans le microscope solaire ordinaire, il se forme sur un écran E, plus ou moins éloigné, une image très-amplifiée de petits objets placés

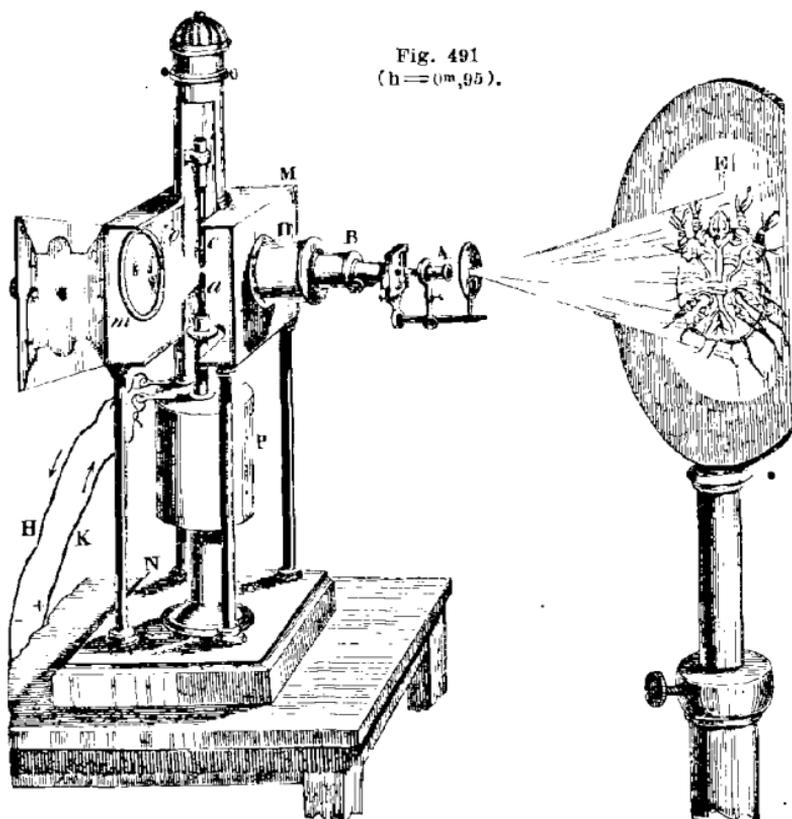


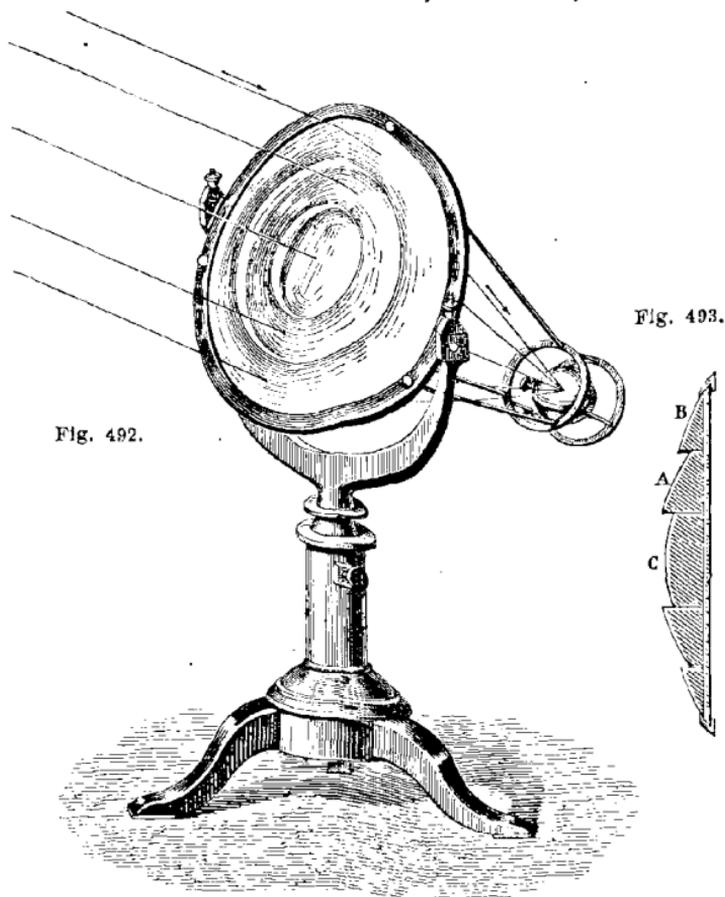
Fig. 491
(h = 0^m,95).

entre deux lames de verre, au bout du tube B. Dans le dessin, l'objet figuré sur l'écran est l'*acarus* de la gale.

Dans l'appareil ci-dessus, les deux charbons s'usent, et s'usent inégalement, *a* plus vite que *c*. Il résulte de là que leur intervalle tend à augmenter, et que la lumière s'affaiblit et même s'éteint. En traitant plus tard de la lumière électrique, on verra comment fonctionne l'appareil P, qui porte les deux charbons, pour entretenir leur intervalle constant et dans une position fixe.

590. **Lentilles à échelons, phares.** — Les lentilles de grandes dimensions présentent d'extrêmes difficultés de construction; elles donnent lieu, en outre, à une forte aberration de sphéricité, et

perdent beaucoup de leur diaphanéité à cause de leur épaisseur. C'est pour obvier à ces inconvénients qu'on a construit les *lentilles à échelons*. Ces lentilles, imaginées par Buffon et perfectionnées par Fresnel, sont formées, au centre, d'une lentille



plan-convexe C (fig. 492 et 493), entourée d'une suite d'anneaux de verre concentriques A et B, dont chacun a sa face plane située du même côté que la face plane de la lentille centrale, tandis que les faces opposées ont une courbure telle, que les foyers des différents anneaux viennent se former au foyer de la lentille. L'ensemble de ces anneaux forme donc, avec la lentille C, une lentille unique représentée en coupe dans la figure 493. Le dessin a été pris d'après une lentille de 60 centimètres de diamètre environ, dont les anneaux sont formés d'une seule pièce

de verre; mais dans les lentilles plus grandes chaque anneau est lui-même formé de plusieurs segments.

Derrière la lentille est un support fixé par trois tringles, sur lequel se posent les corps qu'on veut soumettre à l'action des rayons solaires qui tombent sur la lentille. Le support correspondant au foyer, les substances qu'on y place sont fondues et volatilisées par la haute température qui se produit. L'or, le platine, le quartz, sont fondus rapidement.

Autrefois on faisait usage de réflecteurs paraboliques pour porter à de grandes distances la lumière des *phares*. On nomme ainsi des feux qu'on allume sur les côtes, la nuit, pour servir de guides aux navigateurs. Aujourd'hui on fait usage de lentilles à échelons. Le *feu* est produit par une forte lampe à 4 ou 5 mèches concentriques, ou par la lumière électrique. Il est placé au foyer principal d'une lentille à échelons, en sorte que le faisceau émergent est parallèle, et ne perdant de son intensité que par son passage à travers l'atmosphère (563), il peut être visible jusqu'à 60 kilomètres. Pour que tous les points de l'horizon soient successivement éclairés par un même phare, la lentille se meut autour de la lampe, au moyen d'un mécanisme d'horlogerie, et fait sa révolution en un temps qui varie d'un phare à un autre. Il en résulte que pour les différents points de l'horizon, il y a successivement apparition et éclipse de lumière à des intervalles égaux. Les éclipses servent à distinguer les phares d'un feu accidentel; de plus, c'est d'après le nombre des éclipses qui se produisent dans un temps donné qu'on reconnaît un phare, et par suite la côte qui est en vue.

PHOTOGRAPHIE

591. **Daguerréotype.** — Le *daguerréotype*, ainsi appelé du nom de son inventeur, est un appareil qui sert à fixer, sur des substances *sensibles* à la lumière, les images que forment les lentilles convergentes dans la chambre obscure (585). L'art d'obtenir ainsi les images des objets par l'action de la lumière a reçu le nom de *photographie*. On distingue la *photographie sur plaque métallique*, *sur papier* et *sur verre*.

Dès 1770, le célèbre chimiste suédois Scheele avait reconnu que le chlorure d'argent, qui se conserve blanc dans l'obscurité, noircit par l'action de la lumière. A l'aide de cette propriété du chlorure d'argent on pouvait déjà reproduire des gravures; car si, sur une feuille de papier recouverte de cette substance, on applique une gravure et qu'on expose le tout à la lumière solaire de manière que celle-ci soit interceptée par les parties noires de la gra-

vure, le papier chloruré n'est noirci que dans les parties qui correspondent aux clairs, et les autres restent blanches. Dans la copie ainsi obtenue, les teintes sont renversées, c'est-à-dire que les noires sont devenues les claires, et réciproquement. Cette copie a en outre le défaut de ne pouvoir être conservée que dans l'obscurité; car, exposée à la lumière, elle noircit dans toutes ses parties, et disparaît.

Il restait à produire les images sans inversion de clairs et d'ombres, et à les fixer, c'est-à-dire à les rendre, une fois formées, insensibles à l'action de la lumière. Charles, en France, Wedgwood et Davy, en Angleterre, s'occupèrent de la solution de ce problème, qui a été résolu par Niepce et Daguerre. Le premier, après des recherches patientes continuées de 1814 à 1829, était parvenu à former, sur une lame de cuivre plaquée d'argent, une image inaltérable à la lumière, dans laquelle les teintes claires ou sombres occupaient la même place que dans l'objet. Mais dans le procédé de Niepce, où la substance impressionnable était le bitume de Judée, plongé ensuite dans un mélange d'huile de lavande et de pétrole, l'action de la lumière devait se prolonger pendant 10 à 12 heures, ce qui était tout à fait impraticable pour le portrait.

En 1829, Niepce communiqua ses procédés à Daguerre, déjà connu par l'invention du *diorama*, et qui lui-même s'occupait, depuis plusieurs années, des mêmes recherches; mais ce ne fut qu'après un travail de dix ans que Daguerre fit connaître, en 1839, la belle découverte qui eut un si grand retentissement en France et à l'étranger. Niepce, mort depuis six ans, ne put recueillir la part de gloire qui lui revenait si bien.

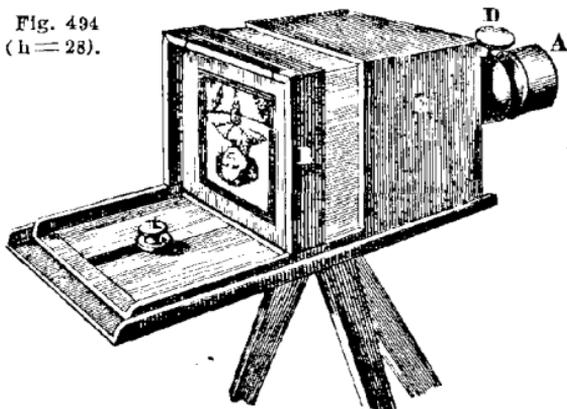
Le procédé de Daguerre se compose de cinq opérations principales : 1^o le polissage de la plaque mince de cuivre doublée d'argent, sur laquelle doit se former l'image; 2^o le dépôt sur cette plaque de la *couche sensible*, c'est-à-dire de la substance qui la rend impressionnable à la lumière; 3^o l'exposition de la plaque, dans la chambre noire, à l'action de la lumière; 4^o l'exposition de cette même plaque aux vapeurs mercurielles qui font apparaître l'image; 5^o la fixation de l'image.

La plaque une fois polie au rouge d'Angleterre et au tripoli, on l'expose à de la vapeur d'iode jusqu'à ce qu'elle ait pris une teinte jaune d'or. Elle est alors apte à recevoir l'action de la lumière, mais seulement pour prendre des vues ou des copies. Elle ne pourrait encore être employée pour le portrait, parce qu'elle exige une action de la lumière de 8 à 10 minutes pour être impressionnée. Il reste donc à la soumettre à l'action de substances *accélérateurs*, c'est-à-dire qui exaltent la sensibilité de la couche d'io-

dures, et permettent à l'image de se produire seulement en quelques secondes. Ces substances sont une dissolution aqueuse de brome, ou du bromure de chaux solide. La plaque est exposée à la vapeur de l'une de ces substances pendant 30 à 60 secondes.

Comme elle est alors très-impressionnable à la lumière, on la

Fig. 494
(h = 28).

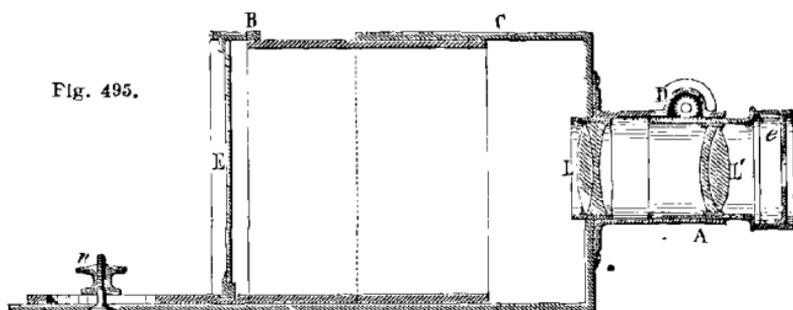


renferme dans un châssis de bois où elle est recouverte, du côté argenté, par un écran à coulisse. Dans cet état, elle est portée dans une petite chambre noire portable, représentée en perspective dans la figure 494, et en coupe, sur une échelle plus grande, dans la figure 495.

Cette pièce, qu'on désigne sous le nom de *daguerréotype*, est une véritable chambre noire à tirage (585), composée d'une partie fixe C, et d'une partie mobile B, qui peut entrer plus ou moins dans la première. Dans un tube de laiton A est l'*objectif*, c'est-à-dire l'appareil qui sert à concentrer la lumière sur la plaque et à y produire l'image. Il consista d'abord en une seule lentille biconvexe achromatique; mais on ne tarda pas à adopter des objectifs à deux lentilles achromatiques L, L' (fig. 495), qu'on désigne sous le nom d'*objectifs à verres combinés*. Ils opèrent plus vite que les objectifs à un seul verre, ont une distance focale moindre, et permettent de mettre très-facilement au foyer. Pour cela, la lentille L étant fixe, la seconde lentille L' peut s'en approcher ou s'en écarter plus ou moins à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon D, qui font marcher le tube dans lequel est cette lentille. La paroi opposée à l'objectif est formée d'un écran de verre dépoli fixé dans un cadre E, qui s'enlève à volonté. S'agit-il d'obtenir un portrait, on fait asseoir le modèle à 3 ou 4 mètres en avant de l'objectif, puis on tire la caisse mobile B, jusqu'à ce que l'image, qui

se produit renversée sur la plaque de verre, apparaisse avec netteté, ce qui a lieu lorsque la plaque est sensiblement au foyer. On achève ensuite de mettre au foyer, en approchant ou en écartant l'objectif au moyen du bouton D. Pour les portraits, on met au foyer par rapport aux yeux de la personne qui pose, cette partie du visage étant la plus centrale.

Le foyer trouvé, on enlève le cadre E et l'écran de verre, et



l'on met à la place le châssis qui contient la plaque iodée; retirant enfin l'écran à coulisse qui masque la face argentée, l'image qui se formait sur le verre se forme actuellement sur la plaque. C'est alors que la lumière produit son action et dessine sur la plaque une image invisible. Le temps pendant lequel doit se prolonger l'exposition de la plaque à la lumière varie avec l'objectif, avec la préparation de la couche sensible et avec l'intensité de la lumière; il peut aller de 8 à 50 secondes.

Lorsqu'il est temps d'arrêter l'action de la lumière, ce qu'on ne reconnaît qu'avec une grande habitude, on abaisse l'écran à coulisse, et on retire le châssis dans lequel la plaque se trouve dans une complète obscurité, ce qui est aussi indispensable qu'avant son introduction dans la chambre noire. Si l'on regardait la plaque en ce moment, on n'apercevrait encore aucune trace d'image; pour rendre celle-ci visible, on expose la plaque à l'action de vapeurs de mercure à 75 degrés environ. Ces vapeurs se déposent, en gouttelettes imperceptibles, sur les parties qui ont été fortement éclairées; et, au bout de quelques minutes, il se forme un amalgame d'argent et de mercure qui donne les blancs de l'épreuve, tandis que les autres parties restent noires par l'effet même du bruni de la plaque. L'image est alors visible, et peut rester exposée à la lumière. Toutefois la plaque est encore recouverte d'une couche d'iodure d'argent, qui donne à l'épreuve une teinte rougeâtre. On fait disparaître cette teinte en lavant la plaque dans une dissolution d'hyposulfite de soude.

L'épreuve ainsi obtenue ne résistant pas à la plus légère friction, il reste à fixer l'image. Pour cela, on lave la plaque dans une solution faible de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude. Dans cette opération, de l'argent se dissout, tandis que l'or se combine avec le mercure et l'argent de la plaque; l'amalgame de mercure et d'argent qui forme les blancs de l'épreuve augmente alors de solidité et d'éclat en se combinant avec l'or, d'où résulte un remarquable accroissement d'intensité dans les clairs de l'image. C'est à M. Fizeau qu'est dû l'emploi du chlorure d'or, qui est le principal perfectionnement qu'on ait apporté à la découverte de Daguerre.

Le procédé de Daguerre est abandonné aujourd'hui et remplacé par la photographie sur verre et sur papier.

592. Photographie sur plaques de verre collodionées. — La photographie sur verre et celle sur papier comprennent deux opérations distinctes. Dans la première on obtient une image dont les teintes sont renversées, c'est-à-dire que les parties claires sont devenues les noires, et réciproquement; c'est l'*image négative*. Dans la seconde opération, on se sert de la première image pour en former une seconde dont les teintes sont renversées de nouveau, et se retrouvent, par conséquent, dans leur ordre naturel; c'est l'*image positive*.

Épreuves négatives sur verre. — On nettoie une plaque de verre en la frottant avec un tampon de linge trempé d'abord dans de la *terre pourrie* délayée dans de l'alcool, puis avec de l'alcool seul, et on la frotte ensuite avec une peau de daim. De la propreté de la plaque dépend en grande partie la réussite de l'épreuve.

La plaque bien nettoyée, on la pose horizontalement, et l'on verse en son milieu du collodion liquide contenant une dissolution d'iodure de potassium; puis on incline la plaque dans différents sens, de manière à obtenir une couche de collodion bien uniforme dans toute son étendue, et on l'incline enfin vers l'un de ses angles afin de laisser couler l'excès de liquide.

L'éther du collodion se vaporisant, celui-ci prend un aspect voilé. A ce moment, on plonge la plaque dans une dissolution contenant 1 gramme d'azotate d'argent pour 10 grammes d'eau; là l'iodure de potassium se transforme en iodure d'argent. Cette opération doit être faite dans une pièce obscure, éclairée seulement par une bougie, ou par une lampe recouverte d'un verre jaune orangé, ou d'un cylindre de papier de même couleur. On laisse la plaque environ une minute dans le bain d'argent, puis on la fait égoutter; quand elle est bien sèche, on la place dans un châssis fermé, et on la porte dans la chambre noire de Daguerre (fig. 494), de la même manière qu'on l'a déjà vu pour les pla-

ques métalliques (591). Là, sous l'influence de la lumière, l'iodure d'argent éprouve un commencement de décomposition, mais sans que l'image soit encore apparente, l'action n'ayant pas été assez prolongée. Pour rendre l'image visible, on plonge la plaque dans une dissolution d'acide pyrogallique avec addition d'acide acétique cristallisable, et l'on chauffe légèrement; partout où l'iodure a éprouvé un commencement de décomposition, il se forme un gallate d'argent qui est noir, et l'image apparaît subitement. Les parties ombrées de l'image qui n'ont pas reçu l'action de la lumière restent blanches, l'iodure d'argent n'ayant pas été décomposé. Mais comme ce sel noircirait promptement par l'action de la lumière, et ferait ainsi disparaître l'image, on lave la plaque dans une dissolution d'hyposulfite de soude, qui dissout l'iodure d'argent; ce qui rend l'image inaltérable par la lumière.

Épreuves positives sur papier. — L'épreuve négative, une fois obtenue, sert à produire un nombre indéfini d'images positives. Pour cela, on la recouvre d'un papier imprégné de chlorure d'argent, et ayant comprimé l'épreuve et le papier entre deux lames de verre, on expose le tout à l'action de la lumière, de manière que les parties noires de l'image négative portent ombre sur le papier au chlorure d'argent. Il se reproduit alors sur celui-ci une copie de l'image négative, où les parties claires sont remplacées par les ombres, et réciproquement; on a donc ainsi une image positive. Il reste à la fixer, ce qu'on obtient en lavant le papier, comme ci-dessus, dans une dissolution d'hyposulfite de soude. Enfin, pour donner du ton à l'épreuve, ce qu'on appelle la *viver*, on la plonge quelques heures dans un bain de chlorure d'or, contenant un gramme de chlorure pour un litre d'eau.

593. *Épreuves positives sur verre.* — On obtient de belles épreuves positives sur verre en préparant d'abord les plaques comme pour les épreuves négatives (592); mais l'exposition à la lumière, dans la chambre obscure, doit être moins prolongée que pour les plaques négatives, moitié environ. On les plonge ensuite dans une dissolution saturée de protosulfate de fer. L'image paraît alors subitement; mais elle est négative. Pour la rendre positive, on plonge la plaque dans un vase plein d'eau, afin d'enlever l'excès de sulfate de fer, puis on verse dessus une dissolution de cyanure de potassium, contenant 1 de cyanure pour 10 d'eau. Aussitôt l'image se dépouille complètement et devient positive. On lave alors, on vernit avec du vernis à tableau, et enfin on recouvre le tout d'une couche de bitume de Judée. C'est ensuite sur l'autre face de la plaque qu'on regarde l'image.

594. *Photographie sur plaques de verre albuminées.* — Les

plaques de verre préparées au collodion présentent cet inconvénient, qu'elles doivent être employées aussitôt leur préparation, tandis que celles préparées à l'albumine peuvent attendre huit jours et plus avant d'être soumises à l'action de la lumière; mais elles doivent subir cette action pendant beaucoup plus longtemps que les plaques préparées au collodion. Aussi sont-elles sans usage pour le portrait, et seulement employées à prendre des vues.

C'est à Niepce de Saint-Victor qu'est dû le procédé de photographie par l'albumine. Pour préparer cette substance, on bat en neige un certain nombre de blancs d'œufs, on laisse reposer, on décante, puis on ajoute 1 pour 100 d'iode de potassium et 25 pour 100 d'eau. On a ainsi un liquide qu'on peut conserver plusieurs jours dans un flacon bien bouché.

La plaque de verre sur laquelle on veut étendre l'albumine doit être parfaitement décapée de la même manière que pour le collodion (592). Enfin, on chauffe la plaque légèrement pour y faire adhérer, du côté opposé à celui qui doit servir, un bout de tube de gutta-percha, qui sert de manche pour manier la plaque.

Tenant la plaque par son manche, on verse dessus une couche du liquide albumineux, préparé comme il a été dit ci-dessus; puis, prenant le manche de gutta-percha entre les deux mains, on le fait tourner rapidement, ainsi que la plaque, ce qui imprime au liquide un mouvement centrifuge qui fait accumuler sur les bords de la plaque l'excès d'albumine, qu'on enlève avec une pipette.

La plaque, une fois albuminée et séchée, est placée pendant une minute dans un bain d'argent contenant 8 d'azotate d'argent et 8 d'acide acétique cristallisable pour 100 d'eau. Retirée du bain, elle peut être placée dans la chambre noire à l'état humide; lorsqu'on veut s'en servir à l'état sec, il faut la débarrasser de l'excès d'argent qu'elle contient en la lavant dans de l'eau distillée, puis la faire sécher dans l'obscurité, et alors on peut la conserver plusieurs jours avant de s'en servir.

Quand la plaque ainsi préparée a subi l'action de la lumière dans la chambre noire, pendant 20 minutes environ, on fait apparaître l'image en plongeant la plaque dans une dissolution d'acide gallique qu'on chauffe doucement à la lampe. Quelques gouttes d'une dissolution d'azotate d'argent ajoutées au bain d'acide gallique hâtent notablement l'apparition de l'image et donnent plus de vigueur. Enfin, ayant lavé la plaque à grande eau, on fixe l'image par une immersion pendant 5 minutes dans un bain d'hyposulfite de soude, contenant 8 d'hyposulfite pour 100 d'eau.

L'image ainsi obtenue est négative, et sert ensuite à donner des épreuves positives sur verre albuminé ou sur papier.

CHAPITRE VI

VISION

595. **Structure de l'œil humain.** — L'œil est l'organe de la *vision*, c'est-à-dire du phénomène en vertu duquel la lumière émise ou réfléchie par les corps fait naître en nous la sensation qui nous décele leur présence.

Situé dans une cavité osseuse qu'on nomme *orbite*, l'œil est maintenu par les muscles qui servent à le mouvoir, par le nerf optique, la conjonctive, les paupières et l'aponévrose orbito-oculaire. Tous ces moyens, en lui assurant une contention solide, lui permettent des mouvements très-variés et très-étendus. Son

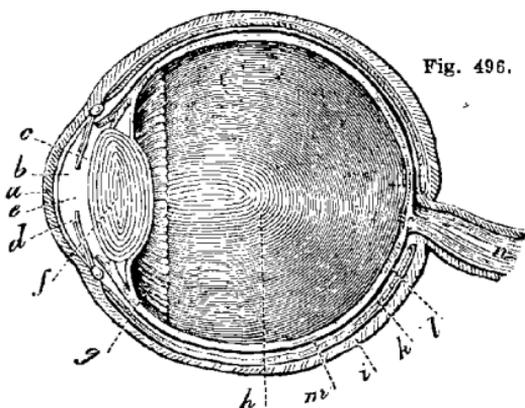


Fig. 496.

volume est à peu près le même chez tous les individus, l'ouverture variable des paupières le fait seule paraître plus ou moins volumineux.

La figure 496 montre une coupe transversale de l'œil d'avant en arrière. On voit que sa forme générale est celle d'un sphéroïde dont la courbure, à la partie antérieure, est plus grande qu'à la partie postérieure. L'œil est composé de membranes et de milieux, qui sont la *cornée*, la *sclérotique*, l'*iris*, la *pupille*, l'*humeur aqueuse*, le *cristallin*, le *corps vitré*, la *membrane hyaloïde*; la *choroïde*, la *rétine*, le *nerf optique*.

Cornée. — La cornée *a* est une membrane transparente située en avant du globe de l'œil. Elle a sensiblement la forme d'une petite calotte sphérique ayant une base de 11 à 12 millimètres de diamètre. Sa circonférence, taillée en biseau aux dépens de sa face externe, s'enchâsse dans la sclérotique *i*, et l'adhérence de ces deux membranes est telle, qu'elles ont été considérées par quelques anatomistes comme une seule et même membrane.

Sclérotique. — La sclérotique *i* est une membrane qui, avec la cornée, enveloppe toutes les parties constituantes de l'œil. Elle présente en avant une ouverture à peu près circulaire, dans laquelle est enchâssée la cornée; à la partie postérieure et interne, elle est perforée pour donner passage au nerf optique.

Iris. — L'iris *d* est un diaphragme annulaire, opaque, adhérent par son périmètre extérieur, et libre par son bord central. Cette membrane est placée entre la cornée et le cristallin. C'est elle qui forme la partie colorée de l'œil; elle

est percée, non pas à son centre, mais un peu en dedans, d'une ouverture qu'on nomme *pupille*, et qui, chez l'homme, est circulaire. Chez quelques animaux, elle est étroite et allongée dans le sens vertical, particulièrement chez ceux du genre *félis*, et dans le sens transversal chez les ruminants. C'est par la pupille que les rayons lumineux pénètrent dans l'œil. Son diamètre, variable pour un même individu, est en moyenne de 3 à 7 millimètres; mais ces limites peuvent être dépassées. Les alternatives d'agrandissement et de resserrement de la pupille s'opèrent rapidement; elles sont fréquentes et jouent un rôle important dans le phénomène de la vision. La pupille se contracte sous l'influence d'une vive lumière; elle se dilate, au contraire, dans l'obscurité. Les mouvements de l'iris paraissent être involontaires.

D'après ce qui précède, l'iris est un écran à ouverture variable, dont la fonction est de régler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil, puisque la grandeur de la pupille varie en sens contraire de l'intensité de la lumière. L'iris sert encore à corriger l'aberration de sphéricité, en empêchant les rayons marginaux de traverser les bords du cristallin; c'est-à-dire qu'il remplit à l'égard de l'œil le rôle d'un diaphragme dans les instruments d'optique (576).

Humeur aqueuse. — Entre la partie postérieure de la cornée et la partie antérieure du cristallin est un liquide transparent qu'on appelle *humeur aqueuse*. L'espace *e*, occupé par cette humeur, est partagé en deux compartiments par l'iris; la partie *b*, comprise entre la cornée et l'iris, se nomme *chambre antérieure*; la partie *c*, qui est entre l'iris et le cristallin, est la *chambre postérieure*.

Cristallin. — Le cristallin est un corps lenticulaire *f*, placé derrière l'iris et très-près de cette membrane. Remarquable par sa transparence, le cristallin est enveloppé dans une membrane diaphane comme lui, qu'on nomme sa *capsule*, et qui adhère par son bord à la couronne annulaire formée par les *procès ciliaires g*. Sa face antérieure a une convexité moindre que la face postérieure. Son tissu est composé d'une suite de lamelles à peu près concentriques, plus dures au centre qu'à la circonférence. Les couches les plus superficielles ont une mollesse telle, qu'elles sont presque à l'état liquide. On leur a donné le nom d'*humeur de Morgagni*. Leur pouvoir réfringent décroît du centre à la périphérie.

Corps vitré, membrane hyaloïde. — On appelle *corps vitré*, ou *humeur vitrée*, une masse transparente, comparable à l'albumine de l'œuf, qui occupe toute la partie *h* du globe de l'œil située en arrière du cristallin. Le corps vitré est enveloppé par la *membrane hyaloïde i*, qui tapisse la face postérieure de la capsule cristalline et toute la face interne d'une autre membrane qu'on nomme *rétine*.

Rétine, nerf optique. — La rétine *m* est une membrane destinée à recevoir l'impression de la lumière et à la transmettre au cerveau par l'intermédiaire d'un nerf *n*, nommé le *nerf optique*, qui part du cerveau, pénètre dans l'œil, et s'épanouit sur la rétine, sous la forme d'un réseau.

La rétine et le nerf optique ne jouissent que de la propriété spéciale de recevoir et de transmettre au cerveau l'impression des images; ils sont tout à fait insensibles à l'action des corps vulnérants. Ces organes ont été coupés, piqués, sans que les animaux soumis à ces expériences aient manifesté la moindre douleur.

Choroïde. — La choroïde *k* est une membrane interposée entre la rétine et la sclérotique. Elle est essentiellement vasculaire et reconvertie, sur sa face interne principalement, d'une matière noire semblable au pigment de la peau des nègres, et destinée à absorber les rayons qui ne doivent pas coopérer à la vision.

La choroïde se prolonge en avant en formant une suite de replis saillants *g*, qu'on nomme *procès ciliaires*, et qui s'engagent entre l'iris et la capsule cristalline, à laquelle ils adhèrent, en formant autour d'elle un disque assez comparable à celui d'une fleur radiée. Par son tissu vasculaire, la choroïde sert à transporter le sang dans l'intérieur de l'œil, et surtout aux *procès ciliaires*.

596. *Indices de réfraction des milieux transparents de l'œil.* — Les indices de réfraction des parties transparentes de l'œil ont été déterminés par

Brewster. Ils sont réunis dans le tableau suivant, avec celui de l'eau comme terme de comparaison.

Eau.	1,3358	Enveloppe extérieure du cristallin.	1,3767
Humeur aqueuse.	1,3366	Centre du cristallin	1,3990
Humeur vitrée.	1,3394	Réfraction moyenne du cristallin.	1,3839

597. **Marche des rayons dans l'œil.** — D'après les diverses parties qui composent l'œil, on peut comparer cet organe à une chambre obscure (585) dont la pupille est l'ouverture, le cristallin la lentille convergente, et la rétine l'écran sur lequel va se peindre l'image. L'effet est donc le même que celui par lequel se forme, au foyer conjugué d'une lentille biconvexe, l'image d'un objet placé

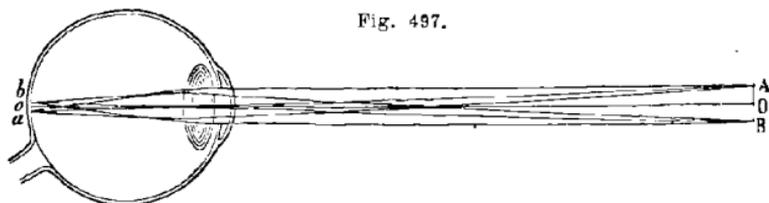


Fig. 497.

en avant de la lentille. Soit, en effet, un objet AB (fig. 497) placé en avant de l'œil, et considérons les rayons émis d'un point quelconque A de cet objet vers l'œil. A leur entrée dans l'humeur aqueuse, ils éprouvent une première réfraction qui les rapproche de l'axe Az , tiré par le centre optique du cristallin; puis ils rencontrent celui-ci, qui les réfracte de nouveau comme une lentille biconvexe; et enfin, après avoir subi une dernière réfraction dans l'humeur vitrée, ils vont concourir en un point a et y former l'image du point A. Les rayons partis du point B allant de même former en b l'image de ce point, il en résulte une image ab très-petite, réelle et renversée, qui se forme exactement sur la rétine quand l'œil est bien conformé.

598. **Renversement des images.** — Pour s'assurer que les images formées sur la rétine sont bien réellement renversées, on prend un œil d'albinos, parce que la chorôïde des yeux de ces animaux est privée de pigment, et que, par conséquent, la lumière peut la traverser complètement; puis on dépouille cet œil, à la partie postérieure, du tissu cellulaire qui l'enveloppe. Ainsi préparé, on le fixe à une ouverture pratiquée au volet d'une chambre obscure, et l'on observe alors, à l'aide d'une loupe, que les images renversées des objets extérieurs viennent se peindre sur la rétine.

Le renversement des images dans l'œil a beaucoup occupé les physiciens et les physiologistes, et de nombreuses théories ont été proposées pour expliquer comment il se fait que nous ne voyions pas les objets renversés. Les uns ont admis que c'est par l'habitude et par une véritable éducation de l'œil que nous voyons les objets redressés, c'est-à-dire dans leur position relative par rapport à nous. D'autres pensent que nous rapportons le lieu réel des objets dans la direction des rayons lumineux qu'ils émettent, et que, ces rayons se croisant dans le cristallin (fig. 497), l'œil voit les points A et B respectivement dans les directions aA et bB ; par suite l'objet paraît droit. Telle était l'opinion de Dalember, Müller, Volkmann et autres soutiennent que, comme nous voyons tout renversé, et non pas uniquement un objet parmi d'autres, rien ne peut paraître renversé, puisque nous manquons alors de termes de comparaison. Il faut avouer qu'aucune de ces théories n'est bien satisfaisante.

599. **Axe optique, angle optique, angle visuel.** — On nomme *axe optique principal* d'un œil son axe de figure, c'est-à-dire la droite par rapport à laquelle il est symétrique. Dans un œil bien conformé, c'est la droite qui passe par le centre de la pupille et par le centre du cristallin; telle est la droite Oo

(fig. 497). Les lignes Aa , Bb , sont des axes secondaires. C'est dans la direction de l'axe optique principal que l'œil voit le plus nettement les objets.

L'angle optique est l'angle BAC (fig. 498) formé par les axes optiques princi-

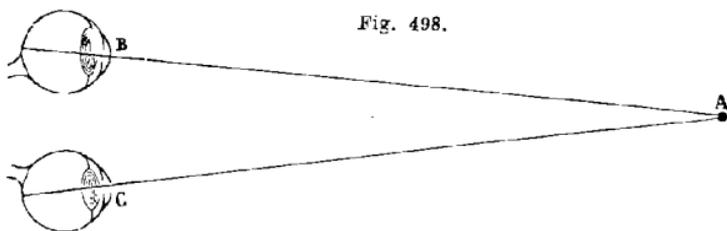


Fig. 498.

aux des deux yeux, lorsqu'ils sont dirigés vers un même point. Cet angle est d'autant plus petit, que les objets sont plus éloignés.

L'angle visuel est l'angle AOB (fig. 499) sous lequel est vu un objet, c'est-à-dire l'angle formé par les axes secondaires menés du centre optique du cristallin aux extrémités opposées de l'objet. Pour une même distance, cet angle croît avec la grandeur de l'objet, et, pour un même objet, il décroît quand la distance augmente, comme il arrive si l'objet passe de AB en $A'B'$. Il résulte de là que les

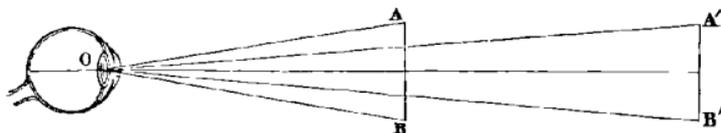


Fig. 499.

objets paraissent d'autant plus petits, qu'ils sont plus éloignés, car les axes secondaires AO et BO se croisant au centre du cristallin, la grandeur de l'image projetée sur la rétine dépend de la grandeur de l'angle visuel AOB .

600. **Appréciation de la distance et de la grandeur des objets.** — L'appréciation de la distance et de la grandeur dépend du concours de plusieurs circonstances, qui sont : l'angle visuel, l'angle optique, la comparaison avec des objets dont la grandeur nous est familière, la diminution de netteté de l'image par l'interposition d'un air plus ou moins vaporeux.

Lorsque la grandeur d'un objet est connue, comme la taille d'un homme, la hauteur d'un arbre ou d'une maison, on en apprécie la distance par l'ouverture de l'angle visuel sous lequel on le voit. Si la grandeur de l'objet est inconnue, on la juge relativement à celle des objets qui l'entourent.

Une colonnade, une avenue d'arbres, nous paraissent diminuer de grandeur à mesure que leur distance augmente, parce que l'angle visuel décroît ; mais l'habitude de voir des colonnes, des arbres, avec la hauteur qui leur convient, fait que notre jugement rectifie l'apparence produite par la vision. De même, quoique des montagnes fort éloignées soient vues sous un fort petit angle et n'occupent qu'un faible espace dans le champ de la vision, habitués aux effets de perspective aérienne, nous leur restituons leur grandeur réelle.

L'angle optique est aussi un élément essentiel pour apprécier la distance ; cet angle augmentant ou diminuant quand les objets s'approchent ou s'éloignent, le mouvement que nous imprimons à nos yeux pour que leurs axes optiques courent vers l'objet que nous regardons, nous donne l'idée de son éloignement. Toutefois ce n'est que par une longue habitude que nous arrivons à établir ainsi une relation entre la distance qui nous sépare des objets et le mouvement cor-

respondant de nos yeux. On remarque, en effet, que les aveugles de naissance auxquels on rend la vue par l'opération de la cataracte jugent d'abord tous les objets à la même distance.

601. **Distance de la vue distincte.** — On appelle *distance de la vue distincte* la distance à laquelle les objets doivent être placés pour être vus avec plus de netteté. Cette distance varie avec les individus, et souvent, pour le même individu, d'un œil à l'autre. Pour de petits objets, comme des caractères d'imprimerie, elle est, à l'état normal de l'œil, de 25 à 30 centimètres. Les personnes qui ne voient qu'à une distance plus courte sont *myopes*, et celles qui ne voient qu'à une distance plus grande sont *presbytes* (612).

602. **Adaptation de l'œil à toutes les distances.** — L'œil présente une propriété remarquable qui ne se rencontre au même degré dans aucun instrument d'optique : c'est que, quoique les images tendent à se former d'autant plus en avant de la rétine que les objets sont plus éloignés (531, 2^e), elles viennent se former toujours sur cette membrane; car l'œil voit nettement à des distances très-variables, à partir de celle qui correspond à la vue distincte. Toutefois, si nous pouvons voir nettement à des distances très-inégales, nous ne le pouvons pas simultanément, ce qui indique quelques modifications dans le système de l'œil, ou du moins la nécessité de fixer notre attention sur l'objet que nous voulons voir. En effet, si l'on vise deux objets alignés, situés, par exemple, l'un à un mètre, l'autre à deux mètres de l'œil, en regardant le premier objet, le second paraît nébuleux, tandis que, si l'on regarde le second, c'est le premier à son tour qui devient nébuleux. Donc, quand l'œil est disposé pour voir à une distance, il ne l'est pas pour voir à une autre, mais il peut successivement s'adapter à l'une et à l'autre.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer comment l'œil peut voir nettement à des distances très-différentes. Pouillet et Mile en trouvent la cause dans les dilatations et les contractions de la pupille. Suivant le dernier, les rayons lumineux éprouvent, sur les bords de l'iris, une *diffraction* ou *inflexion* qui peut donner lieu à des distances focales très-différentes. Se fondant sur l'inégale réfrangibilité du cristallin, laquelle décroît du centre à la circonférence, et observant qu'il doit en résulter une suite de foyers dont les plus rapprochés sont formés par les rayons qui traversent le cristallin plus près de son centre, Pouillet admet que la pupille s'ouvrant plus ou moins, les objets éloignés sont vus par les bords du cristallin, et les plus rapprochés par le centre. On remarque, en effet, que les contractions et les dilatations du trou pupillaire sont liées à l'accommodation de l'œil aux distances; mais il importe d'observer qu'elles le sont aussi aux variations d'intensité de la lumière, et que, pour une même distance, l'ouverture de la pupille peut varier beaucoup.

Rehaut, Olbers et autres ont émis l'opinion que le diamètre de l'œil, d'avant en arrière, varie sous l'influence de la pression des muscles qui font mouvoir cet organe, de manière à rapprocher ou à écarter la rétine du cristallin, en même temps que l'image s'en approche ou s'en écarte elle-même.

Hunter et Young ont attribué au cristallin une propriété contractile en vertu de laquelle il prend une forme plus ou moins convexe, de manière à faire toujours converger les rayons sur la rétine.

Képler, Camper et autres ont admis que, par l'action des procès ciliaires, le cristallin peut se déplacer et se rapprocher plus ou moins de la rétine.

Enfin, on a admis que la netteté de la vision à des distances très-diverses peut provenir, non pas de ce que la rétine ou le cristallin se déplace de manière que l'image vienne toujours se former sur la rétine, mais de ce que les variations qu'éprouve la distance focale du cristallin, à mesure que les objets s'éloignent, sont assez petites pour que l'image conserve une netteté suffisante.

Cette dernière théorie est confirmée par les expériences de Magendie et par celles de de Haldat. Le premier a observé, sur un œil d'albinos, que la netteté des images ne variait pas pour des objets placés à des distances fort inégales; et

de Haldat a trouvé que si l'on place un cristallin comme objectif au volet d'une chambre obscure, on obtient sur un verre dépoli des images également nettes des objets extérieurs, que ceux-ci soient à la distance de 3 à 4 décimètres, ou de 20 à 30 mètres. Cette propriété du cristallin à l'état d'inertie semble contraire aux lois de la réfraction; elle doit être attribuée à la structure de cet organe, qu'elle distingue tout à fait des lentilles ordinaires. De Haldat n'a point donné l'explication de ce phénomène.

603. **Vue simple avec les deux yeux.** — Lorsque les deux yeux se fixent sur un même objet, il se forme sur chaque rétine une image, et cependant nous ne voyons qu'un objet. Pour expliquer la vue simple avec les deux yeux.

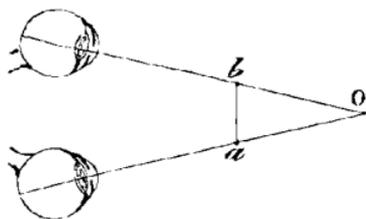


Fig. 500.

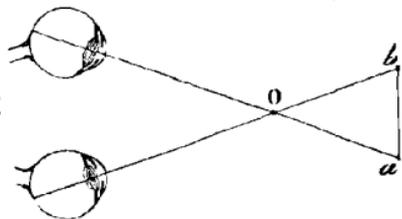


Fig. 501.

(Gassendi admettait qu'à un même instant la perception n'a lieu que pour l'un ou l'autre image, ce qui ne peut être admis d'après les expériences de Wheatstone, que nous rapportons plus loin (605).

Taylor et Wollaston ont émis l'opinion que deux points homologues de droite ou de gauche, sur les deux rétines, correspondent à un même filet nerveux cérébral de droite ou de gauche, bifurqué à l'entre-croisement des deux nerfs optiques. Cette opinion est d'accord avec un fait qu'on observe chez quelques individus, c'est la paralysie transitoire de la rétine, par moitié et du même côté pour chaque œil de droite ou de gauche simultanément, en sorte que les malades ne voient que la moitié droite ou la moitié gauche des objets. Wollaston et Arago ont observé sur eux-mêmes cette affection de la rétine.

Brewster attribue l'unité de sensation à l'habitude que nous acquérons de rapporter à un même objet les impressions simultanées sur les deux rétines.

Voici les principaux faits qui s'observent dans la vision avec les deux yeux. On voit plus clair avec deux yeux qu'avec un; regardant un objet d'abord avec un seul œil, puis avec les deux, la différence d'éclat est sensible.

Lorsque les deux yeux sont fixés chacun sur un objet différent, de manière que les deux axes optiques concourent au delà ou en deçà de ces objets, il peut se produire des illusions d'optique remarquables. Par exemple, si l'on regarde deux objets identiques et de petites dimensions a et b , au moyen de deux tubes isolants qui donnent aux axes optiques des deux yeux les directions concourantes aO et bO (fig. 500), on ne voit qu'un objet unique, mais plus éloigné, au point de rencontre O des deux axes.

Si le point de croisement des deux axes est en avant des points qu'on regarde (fig. 501), on ne voit encore qu'un seul objet, mais plus près, au point O .

Si les objets a et b sont deux petits disques, l'un rouge et l'autre vert, on voit un disque blanc, le vert et le rouge étant deux couleurs complémentaires (548). Ces diverses expériences démontrent que les impressions dans les deux yeux sont simultanées et se superposent pour donner une sensation unique.

604. **Cause du relief apparent des corps.** — On doit à Wheatstone des expériences qui montrent une différence essentielle entre la vision avec les deux yeux et la vision avec un seul. Il résulte de ces expériences que ce n'est qu'avec

les deux yeux qu'on peut avoir une perception nette du relief des corps, c'est-à-dire de leurs trois dimensions. Il est même probable qu'avec un seul œil le relief ne nous paraît appréciable que parce que les objets que nous regardons nous sont généralement connus. En effet, dans la vision avec les deux yeux, quand l'objet est à une faible distance, les deux axes devant converger vers l'objet, il en résulte que la perspective change pour chaque œil et que les deux images sont sensiblement inégales. C'est ce qu'il est facile de constater en regardant alternativement un même objet avec chaque œil. Par exemple, supposons qu'on regarde à vol d'oiseau une petite pyramide régulière C, à base hexagonale (fig. 503), en se plaçant de manière que la verticale menée par son sommet passe exactement entre les deux yeux. Ceux-ci étant ouverts tous les deux,

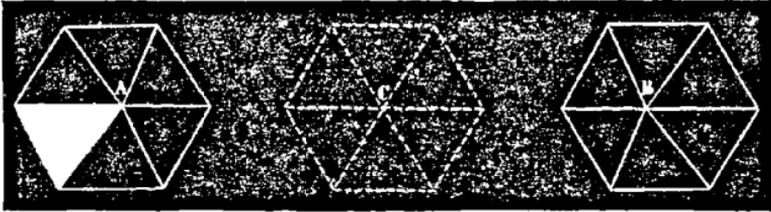


Fig. 502.

Fig. 503.

Fig. 504.

on la voit telle qu'elle est représentée dans la figure 503. Mais si, conservant la même position, on ferme l'œil gauche, l'œil droit voit alors seul la pyramide, les faces latérales de gauche plus en raccourci que celles de droite (fig. 504). Au contraire, si l'on ferme l'œil droit, le gauche aperçoit la figure 502; c'est-à-dire que ce sont les faces latérales de droite qui sont maintenant vues plus en raccourci. Il est donc démontré que les images perçues par les deux yeux ne sont pas identiques; il reste à constater par l'expérience que c'est bien de la perception simultanée de ces deux images que résulte le relief apparent des corps.

605. Stéréoscope. — En s'appuyant sur les considérations qui précèdent, Wheatstone imagina, en 1838, un appareil à l'aide duquel on voit en relief, sur une surface plane, les images d'objets à trois dimensions. De là le nom de *stéréoscope* donné à cet appareil, de deux mots grecs qui signifient *voir solide*.

Le principe du stéréoscope consiste à placer devant chaque œil une image différente d'un même objet, l'une avec la perspective correspondant à l'œil droit, et l'autre avec celle qui correspond à l'œil gauche, lorsqu'ils regardent cet objet à une petite distance. Si l'on dispose alors l'appareil de manière que, l'œil droit ne voyant que l'image qui lui est destinée, et l'œil gauche l'autre, les deux images se superposent, il est évident qu'il doit se former sur chaque rétine exactement la même image que si l'on regardait l'objet même. En effet, on obtient ainsi une perception tellement vive et distincte du relief, que l'illusion est complète et vraiment surprenante.

Dans le stéréoscope construit par Wheatstone, c'était par la réflexion sur deux miroirs plans qu'on obtenait la superposition des deux images. Mais dans le stéréoscope modifié par Brewster, la superposition des deux images se produit à l'aide de deux lentilles convergentes. La figure 505 montre quelle est la marche des rayons dans l'appareil. En A est le dessin que doit regarder l'œil gauche, et en B celui destiné à l'œil droit. Au-dessus sont deux lentilles *m* et *n*, qui sont respectivement les oculaires des deux yeux. Or les rayons partis de deux points homologues des images se réfractent à leur passage dans ces lentilles, et prennent les mêmes directions que s'ils étaient partis d'un point unique C. C'est donc là que se superposent les images virtuelles des dessins A et B, et qu'apparaît l'objet avec un relief d'une fidélité parfaite. Par exemple, si l'on place

en B et en A les deux figures 502 et 504, on apercevra en C une image unique et en relief de la pyramide, telle qu'elle est représentée dans la figure 502.

Il est indispensable que les deux lentilles *m* et *n* impriment rigoureusement la même déviation aux rayons, et pour cela elles doivent être identiques. Brewster a atteint ce résultat en coupant en deux une lentille biconvexe, et en plaçant la moitié droite devant l'œil gauche, et la moitié gauche devant l'œil droit, comme le représente la figure 505.

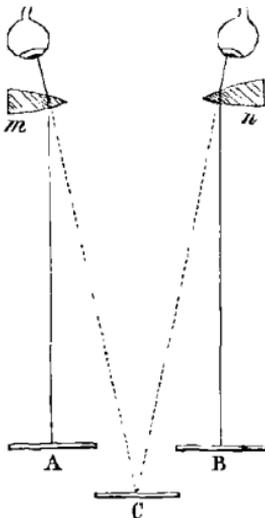


Fig. 505.

A l'aide du stéréoscope, Foucault et le docteur Regnault ont constaté que, lorsque les deux rétines sont impressionnées simultanément par deux couleurs différentes, il y a perception d'une couleur mixte unique. L'aptitude à la recombinaison des deux teintes en une teinte unique varie d'une manière notable d'un individu à un autre, et peut être excessivement faible, même nulle chez quelques personnes. En éclairant avec deux faisceaux de couleurs complémentaires (548) deux disques blancs placés au fond du stéréoscope, et en regardant chaque disque coloré avec un œil, on voit un disque blanc unique, ce qui montre que la sensation de la lumière blanche peut naître de deux impressions chromatiques complémentaires et simultanées sur chacune des deux rétines.

606. *Partie insensible de la rétine.* — La rétine n'est pas également sensible dans toutes ses parties, ainsi que le prouve l'expérience suivante due à Mariotte : on marque deux points noirs sur un papier blanc, à quelques centimètres de distance

l'un de l'autre, puis, le papier étant très-rapproché de l'œil, on fixe le point de gauche avec l'œil droit, ce qui n'empêche pas de voir l'autre point ; mais si l'on éloigne lentement le papier, le point de droite disparaît à une certaine distance, pour reparaître bientôt si l'on continue à éloigner le papier. La même chose a lieu si l'on regarde le point de droite avec l'œil gauche.

Mariotte a remarqué qu'au moment où le point cesse d'être visible, son image se projette sur l'insertion même du nerf optique. On a donné le nom de *punctum cæcum* à ce point insensible à l'action de la lumière.

607. *Persistance de l'impression sur la rétine.* — Lorsqu'on fait tourner rapidement un charbon incandescent, on aperçoit comme un ruban de feu continu ; de même, la pluie qui tombe sous forme de grosses gouttes apparaît dans l'air comme une suite de filets liquides. Ces différentes apparences sont dues à ce que l'impression des images sur la rétine persiste encore après que l'objet qui l'a produite a disparu ou s'est déplacé. La durée de cette persistance varie avec la sensibilité de la rétine et l'intensité de la lumière. Plateau, à Bruxelles, a trouvé qu'elle est, en moyenne, d'une demi-seconde.

L'impression des couleurs persiste aussi bien que celle de la forme des objets ; car si l'on fait tourner des cercles divisés en secteurs peints de diverses couleurs, alors celles-ci se confondent et donnent la sensation de la couleur qui résulterait de leur mélange. Le bleu et le jaune donnent le vert ; le jaune et le rouge, l'orangé ; le bleu et le rouge, le violet ; les sept couleurs du spectre, le blanc, comme le démontre le disque de Newton (646, 6°).

Il existe plusieurs appareils curieux dont les effets s'expliquent par la persistance de la sensation sur la rétine. Tels sont le *thaumatrope*, le *phénakisticope*, la *roue de Faraday*, le *kaléidophone*.

608. *Images accidentelles.* — Un objet coloré étant placé sur un fond noir,

si on le regarde fixement pendant un certain temps, la vue est bientôt fatiguée, et l'intensité de la couleur s'affaiblit; dirigeant alors les yeux sur un carton blanc ou sur le plafond, on aperçoit une image de même forme que l'objet, mais d'une couleur complémentaire, c'est-à-dire qui formerait du blanc si elle était réunie à celle de l'objet. Pour un objet vert, l'image est rouge, et réciproquement; si l'objet est jaune, l'image est violette. Ces apparences colorées ont été signalées par Buffon, qui leur a donné le nom d'*images* ou de *couleurs accidentelles*.

Les couleurs accidentelles persistent d'autant plus longtemps, que l'objet observé a été plus vivement éclairé et que l'action de la lumière a été prolongée davantage. Elles ne s'éteignent pas, en général, d'une manière progressive continue, mais offrent ordinairement des disparitions et des réapparitions alternatives. On observe encore que si, après avoir contemplé un objet coloré, on ferme les yeux rapidement en les abritant aussi parfaitement que possible de toute lumière, les images accidentelles n'en apparaissent pas moins.

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène des couleurs accidentelles. Darwin a admis :

1^o Que la partie de la rétine fatiguée par une couleur est devenue insensible aux rayons de cette couleur, et n'est plus impressionnée que par sa couleur complémentaire;

2^o Que cette partie de la rétine prend spontanément un mode d'action opposé qui produit la sensation de la couleur complémentaire.

La première partie de cette théorie n'explique pas le fait ci-dessus, que les couleurs accidentelles apparaissent même dans l'obscurité; et la seconde partie n'est que l'énoncé même du phénomène des images accidentelles.

608. **Irradiation.** — L'*irradiation* est un phénomène par lequel les objets blancs ou d'une couleur très-vive, vus sur un fond obscur, paraissent avec des dimensions plus grandes que celles qui leur sont propres. L'inverse a lieu pour un corps noir vu sur un fond blanc. On admet que l'irradiation provient de ce que l'impression sur la rétine se propage au delà du contour de l'image.

L'effet de l'irradiation est très-sensible sur la grandeur apparente des astres, qui peuvent ainsi paraître plusieurs fois plus grands qu'ils ne sont réellement.

D'après les recherches de Plateau, l'irradiation varie considérablement d'une personne à une autre, et même d'un jour à l'autre pour une même personne. Ce savant a constaté, en outre, que l'irradiation croît avec l'éclat de l'objet et la durée de la contemplation. Enfin, elle se manifeste à toutes les distances; les lentilles divergentes l'augmentent, celles qui sont convergentes la diminuent.

610. **Auréoles accidentelles, contraste des couleurs.** — On nomme *auréoles accidentelles* des couleurs qui, au lieu de succéder à l'impression d'un objet, comme les couleurs accidentelles, apparaissent autour de l'objet lui-même lorsqu'on le regarde fixement. L'impression de l'auréole est opposée à celle de l'objet, c'est-à-dire que, si celui-ci se détache en clair, l'auréole est obscure; elle est claire, si l'objet est obscur.

Le *contraste des couleurs* est une réaction réciproque entre deux couleurs voisines, en vertu de laquelle chacune d'elles s'ajoute à la couleur complémentaire de l'autre. Ce contraste a été observé par M. Chevreul, qui en a fait une étude approfondie et en a donné la loi. C'est par l'influence réciproque des auréoles accidentelles que s'explique le contraste des couleurs.

M. Chevreul a trouvé que les couleurs rouge et orangé étant juxtaposées, le rouge tire sur le violet, et l'orangé sur le jaune. Avec le rouge et le bleu, la première couleur tire sur le jaune et la seconde sur le vert; avec le jaune et le bleu, le jaune passe à l'orangé et le bleu à l'indigo; et ainsi de suite pour un grand nombre de combinaisons. On conçoit combien il importe, dans la fabrication des étoffes, des tapis, de savoir apprécier l'effet dû au contraste des couleurs.

611. **L'œil n'est pas achromatique.** — On a longtemps attribué à l'œil humain un achromatisme parfait (562); mais cette opinion ne peut être admise

d'une manière absolue depuis les expériences de Wollaston, de Young, de Fraunhofer et de Müller.

Fraunhofer a observé que, dans une lunette à deux verres, un fil très-fin, placé à l'intérieur de l'instrument, au foyer de l'objectif, est vu distinctement au travers de l'oculaire, lorsque la lunette est éclairée uniquement avec de la lumière rouge; mais que le fil cesse d'être visible si l'on éclaire la lunette avec de la lumière violette, l'oculaire étant resté dans la même position. Or on remarque que, pour revoir le fil, il faut diminuer la distance des lentilles beaucoup plus que ne l'indique le degré de réfrangibilité de la lumière violette dans le verre. Il faut donc admettre que, dans cette expérience, il y a un effet dû à l'aberration de réfrangibilité de l'œil.

Müller, de son côté, en contemplant avec un seul œil un disque blanc placé sur un fond noir, a trouvé que l'image est pure quand l'œil est accommodé à la distance du disque, c'est-à-dire que l'image vient se faire sur la rétine; mais il a observé que si l'œil n'est pas accommodé à cette distance, c'est-à-dire si l'image se fait en avant ou en arrière de la rétine, le disque paraît entouré d'une bande bleue très-étroite.

Müller conclut de ces expériences que l'œil est achromatique tant que l'image est reçue à la distance focale, ou tant qu'il s'accommodé à la distance de l'objet. On ne peut pas dire jusqu'ici quelle est précisément la cause de cet achromatisme apparent de l'œil; mais on l'attribue généralement à la ténuité des faisceaux lumineux qui passent par l'ouverture pupillaire, et à ce que les rayons inégalement réfrangibles, rencontrant les surfaces des milieux de l'œil sous des incidences presque normales, sont très-peu réfractés, d'où il résulte que l'aberration de réfrangibilité est insensible (561).

Quant à l'aberration de sphéricité, on a déjà vu comment elle est corrigée par l'Iris (595), véritable diaphragme arrêtant les rayons marginaux qui tendent à traverser le cristallin, et ne laissant passer que les plus rapprochés de l'axe.

612. Myopie, presbytie. — Les affections les plus communes de l'organe de la vue sont la myopie et le presbytie. La *myopie* est une accommodation habituelle des yeux pour une distance moindre que celle de la vue distincte ordinaire, en sorte que les personnes qui en sont affectées ne voient nettement que les objets très-rapprochés. La myopie est due à une trop grande convexité du cristallin; l'œil étant alors trop convergent, le foyer, au lieu de se former sur la rétine, se forme en avant, ce qui fait que l'image est confuse. On remédie à ce défaut de l'œil au moyen de verres divergents, qui, en écartant les rayons de l'axe commun, reculent le foyer et le portent sur la rétine.

La contemplation habituelle de petits objets, les observations microscopiques, peuvent faire naître la myopie. Ce vice de conformation est commun chez les jeunes gens; il diminue avec l'âge.

Le *presbytie* est le contraire de la myopie. Dans cette affection, l'œil voit très-bien les objets éloignés, mais ne distingue pas nettement les objets rapprochés. Le presbytie est dû à ce que l'œil n'étant pas assez convergent, l'image des objets rapprochés va se former au delà de la rétine; mais si les objets s'éloignent, l'image se rapproche de la rétine (531), et lorsqu'ils sont à une distance convenable, elle se forme exactement sur cette membrane; alors on voit nettement.

Le presbytie se corrige au moyen de lunettes à verres convergents. Ces verres rapprochant les rayons avant leur entrée dans l'œil, si la convergence en est convenablement choisie, l'image est ramenée exactement sur la rétine.

Il y a encore peu d'années qu'on faisait uniquement usage de verres biconvexes pour les presbytes, et biconcaves pour les myopes. Wollaston proposa, le premier, de remplacer ces verres par des lentilles concaves-convexes C et F (fig. 421), qu'on place de manière que leurs courbures soient de même sens que celle de l'œil. Ces verres faisant voir plus nettement les objets éloignés qui entourent l'axe optique, on leur a donné le nom de *verres périscopiques*.

613. Bésicles. — Les verres dont se servent les myopes et les presbytes se désignent sous le nom général de *bésicles*. On grave ordinairement sur ces verres des numéros qui marquent, *en pouces*, leur distance focale.

On peut calculer le numéro que doit prendre un presbyte ou un myope, lorsqu'on connaît la distance à laquelle il voit distinctement. Pour les presbytes, on fait usage de la formule $f = \frac{pd}{d-p}$ [1], dans laquelle f étant le numéro du verre qu'on doit adopter, p est la distance de la vue distincte pour les vues ordinaires, laquelle est de 30 centimètres ou 11 pouces, et d la distance de la vue distincte de la personne affectée de presbytie.

La formule [1] ci-dessus se tire de l'égalité $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ (541), en y remplaçant p' par d . On fait ici usage de la formule [6] du paragraphe 541, et non pas de la formule [5], parce que l'image qu'on voit dans les bésicles étant du même côté que l'objet par rapport à la lentille, le signe de p' doit être contraire à celui de p , ainsi que cela a lieu pour les images virtuelles, d'après le paragraphe déjà cité.

Pour les myopes, on calcule f par la formule $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$, qui appartient aux lentilles divergentes (541), et donne $f = \frac{pd}{p-d}$ [2], en remplaçant p' par d .

Soit proposé, par exemple, de calculer le numéro des verres que doit adopter un presbyte pour lequel la distance de la vue distincte est 35 pouces, sachant que la distance de la vue distincte ordinaire est de 11 pouces. En faisant $p = 11$ et $d = 35$, dans la formule [1] ci-dessus, on trouve $f = \frac{35 \times 11}{35 - 11} = 16$.

Quant à la mesure de la distance de la vue distincte, on l'obtient avec une assez grande précision au moyen d'un petit appareil qu'on nomme *optomètre*.

614. Diplopie. — La *diplopie* est une affection de l'œil qui fait qu'on voit les objets doubles, c'est-à-dire qu'on en voit deux au lieu d'un. En général, les deux images se superposent presque entièrement, et l'une d'elles est beaucoup plus apparente que l'autre. La diplopie peut résulter du concours de deux yeux inégaux; mais elle peut aussi affecter un seul œil. Ce dernier cas est sans doute dû à quelque défaut de conformation dans le cristallin ou dans d'autres parties de l'œil, qui fait que le faisceau lumineux se bifurque et va former sur la rétine deux images au lieu d'une. Un seul œil peut être même affecté de *triplopie*; mais, dans ce cas, la troisième image est excessivement faible.

615. Achromatopsie. — On nomme *achromatopsie* une affection singulière qui nous rend incapables de juger des couleurs, ou du moins de certaines couleurs. Chez quelques personnes, en effet, l'insensibilité est complète, tandis que d'autres apprécient quelques couleurs. Les personnes atteintes de cette affection distinguent très-bien les contours des corps, les parties claires ou dans l'ombre, mais elles n'en distinguent pas les teintes.

On désigne aussi l'achromatopsie sous le nom de *daltonisme*, parce que Dalton, qui l'a décrite avec soin, en était affecté.

616. Ophthalmoscope. — L'*ophthalmoscope*, destiné à examiner l'œil, se compose : 1° d'un réflecteur sphérique concave M, de verre ou de métal (fig. 506 et 507), d'une distance focale de 20 à 25 centimètres, et percé à son centre d'un trou de 4 millimètres de diamètre; 2° d'une lentille convergente achromatique o, qu'on maintient devant l'œil qui veut explorer; 3° de plusieurs lentilles, les unes divergentes, les autres convergentes, qu'on fixe par une pince derrière le miroir, afin de corriger au besoin la vue de l'observateur, s'il est myope ou presbyte. Le réflecteur M est percé d'un trou à son centre quand il est métallique; mais s'il est de verre, ce qui est préférable, on enlève seulement, à la partie centrale, la couche de tain qui recouvre la face postérieure.

Pour se servir de l'ophthalmoscope, on place le sujet dans une chambre obscure, et l'on met à côté de lui une lampe dont le pied porte un écran E, destiné à arrêter la lumière du côté de la tête du sujet et à la maintenir dans l'obscurité.

L'observateur, tenant alors d'une main le réflecteur M, le dirige de manière à

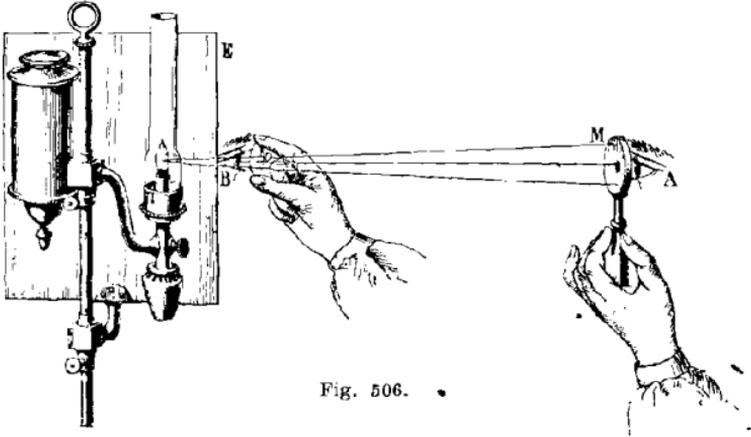


Fig. 506.

concentrer vers l'œil B du sujet la lumière envoyée par la lampe, tandis que, de l'autre main, il maintient devant l'œil la lentille o. Par cette disposition, le fond de l'œil se trouvant fortement éclairé, on en distingue très-bien les lésions.

La figure 507 fait voir comment se produit l'image que perçoit l'observateur en regardant à travers le trou central du réflecteur : *ab* étant la partie éclairée de la rétine, soit d'abord le cas où la lentille *o* n'est pas maintenue devant l'œil B : les rayons qui éclairent le fond de l'œil étant renvoyés vers le cristallin *c*, le traversent en se réfractant comme dans une lentille et vont former en *a'b'* une image

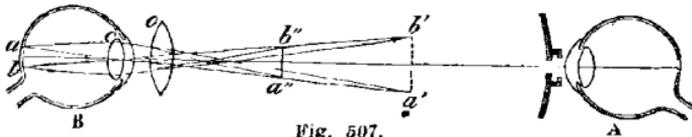


Fig. 507.

aérienne, réelle et renversée de la partie *ab* du fond de l'œil. C'est cette image que l'observateur voit par le trou du miroir ; mais elle est confuse. Au contraire, si l'on interpose la lentille *o*, les rayons se réfractent de nouveau en la traversant, l'image va se former en *a''b''*, plus petite et plus nette, mais toujours réelle et renversée. Avec une lentille divergente, l'image serait virtuelle et redressée ; car, dans ce cas, la lentille biconcave et le cristallin *c* forment un système analogue à la lunette de Galilée (583).

La grande quantité de lumière que l'ophthalmoscope concentre sur l'œil peut, dans beaucoup de cas, irriter d'une manière fâcheuse. Il importe alors d'interposer entre la lampe et le réflecteur des verres colorés, qui absorbent les rayons nuisibles, lesquels sont surtout les rayons rouges, les rayons jaunes et les rayons violets. MM. Foilin et Jansen ont reconnu que les meilleurs verres sont ceux légèrement colorés en vert, ou teints en bleu par le cobalt.

Pour plus de détails sur les ophthalmoscopes et leur application, nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage du Dr Foilin : *Leçons sur l'exploration de l'œil*.

POLARISATION

633. *La réflexion.* — La polarisation est une modification particulière des rayons lumineux, en vertu de laquelle, une fois réfléchis ou réfractés, ils deviennent incapables de se réfléchir ou de se réfracter de nouveau dans certaines directions. Le nom de polarisation a été adopté pour caractériser ces nouvelles propriétés de la lumière, parce que, pour les expliquer dans la théorie de l'émission, on admet que les molécules lumineuses ont des pôles et des axes qui, par la réflexion sous un certain angle, se tournent tous dans une même direction. La polarisation a été découverte en 1810 par Malus, physicien français, mort deux ans plus tard.

La lumière se polarise par réflexion ou par réfraction. Réfléchi sur une glace de verre noir, la lumière se polarise lorsque la réflexion se produit sous un angle de $35^{\circ}25'$ avec la glace. Voici quelques-unes des propriétés que possède alors le rayon polarisé :

1^o Ce rayon n'éprouve aucune réflexion en tombant sur une seconde lame de verre, sous le même angle de $35^{\circ}25'$, si le plan d'incidence sur cette seconde lame est perpendiculaire au plan d'incidence sur la première, tandis qu'il se réfléchit plus ou moins sous les autres incidences.

2^o Transmis au travers d'un prisme biréfringent (637, 3^o), il ne donne qu'une image, si la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan d'incidence, tandis que, dans toute autre position par rapport à ce plan, il donne deux images plus ou moins intenses.

3^o Il ne peut pas se transmettre au travers d'une plaque de tourmaline (637, 2^o) dont l'axe de cristallisation est parallèle au plan d'incidence, et se transmet, au contraire, d'autant plus facilement, que l'axe de la tourmaline approche davantage de la direction perpendiculaire à ce plan.

Tous les corps peuvent, comme le verre, polariser la lumière par réflexion, mais plus ou moins complètement et sous des angles d'incidence inégaux. Le marbre noir, par exemple, polarise complètement la lumière, tandis que le diamant, le verre ordinaire, le verre d'antimoine, ne la polarisent que partiellement. De tous les corps, ce sont les métaux qui ont le plus faible pouvoir polarisant.

634. *Angle et plan de polarisation.* — L'angle de polarisation d'une substance est l'angle que doit faire le rayon incident avec une surface plane et polie de cette substance, pour que le rayon réfléchi soit polarisé le plus complètement possible. Pour l'eau, cet angle est de $37^{\circ}15'$; pour le verre, de $35^{\circ}25'$; pour le quartz, de $32^{\circ}28'$; pour le diamant, de 22° ; il est de $33^{\circ}30'$ pour l'obsidienne, espèce de verre noir naturel qui polarise très-bien la lumière.

Brewster a fait connaître, sur l'angle de polarisation, la loi suivante, remarquable par sa simplicité : *L'angle de polarisation est l'angle d'incidence pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.* Toutefois cette loi n'est pas applicable à la lumière réfléchi par les cristaux biréfringents.

Dans la polarisation par réflexion, on nomme *plan de polarisation* le plan de réflexion dans lequel la lumière se trouve polarisée; ce plan coïncide avec le plan d'incidence et contient, par conséquent, l'angle de polarisation. C'est dans ce plan qu'un rayon déjà polarisé ne peut se réfléchir sous l'angle de polarisation dans un second plan perpendiculaire au premier; c'est encore dans ce plan qu'elle n'est pas transmissible au travers d'une tourmaline dont l'axe est parallèle au plan. Tout rayon polarisé par réflexion possède aussi un plan de polarisation, c'est-à-dire un plan dans lequel il présente les propriétés qu'on vient d'énoncer.

635. *Polarisation par simple réfraction.* — Quand un rayon de lumière non polarisée tombe sur une lame de verre à faces parallèles, sous l'angle de polarisation, il n'est qu'en partie réfléchi; l'autre partie traverse la lame en se

réfractant, et la lumière transmise est polarisée perpendiculaire au plan de réflexion, et, par conséquent, de la lumière qui a été polarisée par réflexion. Ainsi, que le faisceau réfléchi et le faisceau réfracté contiennent une égale quantité de lumière polarisée, et que la réunion de ces deux faisceaux donne de la lumière naturelle. On peut donc regarder la lumière ordinaire comme formée de deux faisceaux égaux, polarisés à angle droit.

Une seule lame de verre ne polarisant jamais complètement la lumière, on peut en réunir plusieurs qu'on superpose, et qui, par des réflexions et des réfractions successives, produisent un effet plus complet. Des lames de verre ainsi réunies forment ce qu'on appelle une *pile de glaces*, appareil qu'on utilise fréquemment pour obtenir un faisceau de lumière polarisée.

636. **Polarisation par double réfraction.** — La lumière se polarise par double réfraction, lorsqu'elle traverse un cristal de spath d'Islande ou de toute autre substance biréfringente; les deux faisceaux, distincts à leur émergence, sont tous les deux polarisés entièrement, mais dans des plans différents, qui sont exactement ou très-sensiblement perpendiculaires entre eux. Pour le démontrer, on regarde au travers d'un rhomboèdre de spath d'Islande un point noir tracé sur une feuille de papier. A l'œil nu, on aperçoit deux images qui présentent le même éclat; mais si l'on interpose une tourmaline qu'on fait tourner dans son propre plan, chaque image disparaît et reparaît deux fois dans une révolution de la tourmaline, ce qui fait voir que les deux rayons émergents sont polarisés dans des plans perpendiculaires entre eux (637, 2°). En effet, l'image ordinaire s'éteint au moment où l'axe de la tourmaline est parallèle à la section principale de la surface d'incidence, et l'image extraordinaire, au moment où ce même axe est perpendiculaire à cette même section; on conclut de là que le faisceau ordinaire est polarisé dans le plan de la section principale, et le faisceau extraordinaire dans un plan perpendiculaire à cette section.

637. **Polariscopes ou analyseurs.** — On nomme *polariscopes*, ou *analyseurs*, de petits instruments qui servent à reconnaître quand la lumière est polarisée et à déterminer son plan de polarisation. Les analyseurs les plus usités sont la glace de verre noir, la tourmaline en plaque mince, le prisme biréfringent, le prisme de Nicol et les piles de glace décrites ci-dessus (635).

1° *Glace noire.* On verra ci-après, dans l'appareil que représente la figure 519, qu'une glace noire *m* fait reconnaître si la lumière est polarisée en refusant de la réfléchir sous l'angle de polarisation, quand le plan d'incidence sur cette glace est perpendiculaire au plan de polarisation; la glace *m* est donc un analyseur.

2° *Tourmaline.* — L'analyseur le plus simple est une lame de tourmaline brune, taillée parallèlement à son axe de cristallisation. Ce minéral, qui est biréfringent, a la propriété de ne laisser passer que la lumière naturelle et la lumière polarisée dans un plan perpendiculaire à son axe; mais il se comporte comme un corps opaque à l'égard de la lumière polarisée dont le plan de polarisation est parallèle à cet axe. Pour se servir de cet analyseur, on l'interpose entre l'œil et le faisceau lumineux qu'on veut observer, puis on tourne lentement la tourmaline dans son propre plan: si alors le faisceau présente toujours la même intensité, il ne contient pas de lumière polarisée; mais si l'éclat décroît et croît successivement, le faisceau contient d'autant plus de lumière polarisée, qu'il éprouve des variations d'intensité plus considérables. Au moment du minimum, le plan de polarisation est déterminé par l'axe de la tourmaline et par le rayon visuel. C'est le rayon extraordinaire qui passe dans une tourmaline taillée parallèlement à l'axe; le rayon ordinaire est complètement absorbé, du moins si la tourmaline est suffisamment colorée.

3° *Prisme biréfringent.* — On construit, avec le spath d'Islande, des prismes biréfringents qui sont employés comme analyseurs dans plusieurs instruments d'optique, notamment dans l'appareil de Biot pour étudier la polarisation circu-

laire (fig. 522). Il est nécessaire que ces prismes soient achromatisés; car lorsque la lumière qui les traverse n'est pas simple, elle est décomposée par la réfraction. Pour cela, on accole au prisme de spath un prisme de verre, d'un angle tel, qu'en réfractant la lumière en sens contraire, il détruit à peu près complètement l'effet de dispersion. On obtient le maximum d'écart entre les images ordinaire et extraordinaire en taillant le prisme biréfringent de manière que ses arêtes soient parallèles ou perpendiculaires à l'axe optique du cristal.

Le prisme biréfringent étant fixé à l'extrémité d'un tube de cuivre (fig. 516), on reconnaît qu'un faisceau lumineux qu'on fait passer dans ce tube est complètement polarisé, quand, en tournant le tube sur lui-même, on trouve, pendant une révolution complète, quatre positions rectangulaires où l'on n'aperçoit qu'une image. C'est l'image ordinaire qui disparaît quand le plan de la section principale est perpendiculaire au plan de polarisation, et c'est l'image extraordinaire qui s'éteint toutes les fois que le plan de polarisation coïncide avec la section principale. Dans toutes les autres positions du prisme biréfringent, l'intensité relative des images varie. Le prisme biréfringent peut servir à déterminer la direction du plan de polarisation, puisqu'il suffit de chercher la position de la section principale du prisme pour laquelle, le faisceau incident étant normal, l'image extraordinaire s'éteint.

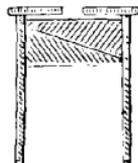


Fig. 516.

4° *Prisme de Nicol*. — Le prisme de Nicol est l'analyseur le plus précieux, parce qu'il est tout à fait incolore, qu'il polarise complètement la lumière, et qu'il ne transmet qu'un seul rayon polarisé dans la direction de son axe.

Fig. 517.



Pour le construire, on prend un rhomboèdre de spath d'Islande de 20 à 30 millimètres de hauteur environ, sur 8 à 9 de largeur, et on le coupe en deux suivant un plan perpendiculaire au plan des grandes diagonales des bases et passant par les sommets obtus les plus rapprochés l'un de l'autre, puis on rejoint les deux moitiés dans le même ordre avec du baume de Canada. Le parallélépipède ainsi construit constitue le prisme de Nicol (fig. 517).

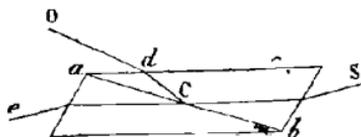


Fig. 518.

L'indice de réfraction du baume de Canada étant plus petit que l'indice ordinaire du spath d'Islande, mais plus grand que son indice extraordinaire, il en résulte qu'un faisceau lumineux SC (fig. 518) pénétrant dans le prisme, le rayon ordinaire éprouve sur la surface ab la réflexion totale, et prend la direction CdO , tandis que le rayon extraordinaire Ce passe seul; c'est-à-dire que le prisme de Nicol, de même que la tourmaline, ne laisse passer que le rayon extraordinaire. Il peut donc servir d'analyseur comme la tourmaline. On l'utilise aussi, sous le nom de *polariseur*, pour obtenir un faisceau de lumière blanche polarisée. Le prisme biréfringent sert au même usage.

638. *Appareil de Noremborg*. — Noremborg a imaginé un appareil simple et peu dispendieux, à l'aide duquel on peut répéter la plupart des expériences

relatives à la lumière polarisée. Cet appareil se compose de deux colonnes de cuivre *b* et *d* (fig. 519), qui soutiennent une glace non étamée *n*, mobile autour d'un axe horizontal. Un petit cercle gradué *c* indique l'angle de cette glace avec la verticale. Entre les pieds des deux colonnes est une glace étamée *p*, fixe et horizontale. A leur extrémité supérieure, ces mêmes colonnes supportent un limbe

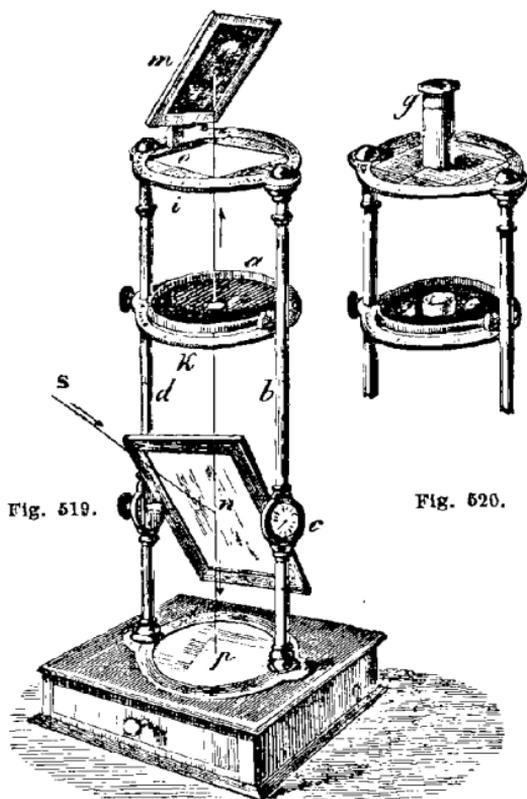


Fig. 519.

Fig. 520.

gradué, dans lequel peut tourner un disque *o*. Celui-ci, au centre duquel est une ouverture quadrangulaire, porte une glace de verre noir *m*, faisant avec la verticale un angle égal à l'angle de polarisation. Enfin, un disque annulaire gradué *k* peut se fixer, par une vis de pression, à différentes hauteurs sur les colonnes. Un deuxième anneau *a*, soutenu par le premier, peut prendre autour d'un axe horizontal différentes inclinaisons, et porte un écran noir *e*, percé à son centre d'une ouverture circulaire.

La glace *n* faisant avec la verticale un angle de $35^{\circ}25'$, c'est-à-dire égal à l'angle de polarisation du verre, les rayons S_n , qui rencontrent cette glace sous cet angle, se polarisent (633) en se réfléchissant dans la direction *np*, vers la glace *p*, qui les renvoie dans la direction *pmr*. Après avoir traversé la glace *n*, le faisceau polarisé tombe sur la glace noire *m* sous un angle de $35^{\circ}25'$, puisque cette glace fait précisément le même angle avec la verticale. Or, si l'on fait tourner horizontalement le disque *o* auquel est fixée la glace *m*, celle-ci se

déplace en conservant toujours la même inclinaison, et l'on remarque deux positions où elle ne réfléchit pas le faisceau incident nr : c'est lorsque le plan d'incidence, sur cette glace, est perpendiculaire au plan d'incidence $Sn\rho$ sur la glace η . Telle est la position représentée dans le dessin. Dans toute autre position, le faisceau polarisé est réfléchi par la glace m en quantité variable, et le maximum de lumière réfléchie a lieu lorsque les plans d'incidence, sur les glaces m et η , sont parallèles entre eux. Si la glace m fait avec la verticale un angle plus grand ou plus petit que $35^{\circ}26'$, le faisceau polarisé est toujours réfléchi dans toutes les positions du plan d'incidence.

Si, au lieu de recevoir la lumière polarisée sur la glace noire m , on la reçoit sur un prisme biréfringent ($637,3^{\circ}$) placé dans un tube g (fig. 520), on n'obtient qu'une image toutes les fois que le plan de la section principale du prisme coïncide avec le plan de polarisation sur la glace η , et c'est alors le rayon ordinaire qui est transmis. On ne voit encore qu'une image quand le plan de la section principale est perpendiculaire au plan de polarisation, et c'est alors le rayon extraordinaire qui passe. Pour toute autre position du prisme, on voit deux images dont l'intensité varie avec la position de la section principale.

Enfin, si l'on substitue une tourmaline au prisme biréfringent, et qu'on la fasse tourner sur elle-même, le faisceau polarisé s'éteint complètement lorsque l'axe de la tourmaline est parallèle au plan d'incidence $Sn\rho$.

Les différentes propriétés de la lumière polarisée énoncées précédemment ($633^{\circ} 1^{\circ}, 2^{\circ}, 3^{\circ}$) se trouvent donc ainsi démontrées. On va voir d'autres applications de l'appareil de Noremberg à l'étude de la polarisation rotatoire dans le quartz, et à l'observation des couleurs de la lumière polarisée.

* POLARISATION ROTATOIRE

639. Rotation du plan de polarisation. — Lorsqu'un rayon polarisé traverse une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe de cristallisation, ce rayon est encore polarisé à l'émergence, mais non plus dans le même plan de polarisation qu'avant son passage dans le quartz. Avec certains échantillons, le nouveau plan est tourné à gauche de l'ancien; avec d'autres, il l'est à droite. C'est à ce phénomène qu'on a donné le nom de *polarisation rotatoire*. Il a été observé d'abord par Seebeck et Arago; mais il a été étudié surtout par Biot, qui a fait connaître les lois suivantes :

1^o *La rotation du plan de polarisation n'est pas la même pour les diverses couleurs simples; elle est d'autant plus grande, que ces couleurs sont plus réfrangibles.*

2^o *Pour une même couleur simple et pour des plaques d'un même cristal, la rotation est proportionnelle à l'épaisseur.*

3^o *Dans la rotation de droite à gauche ou de gauche à droite, la même épaisseur imprime sensiblement la même rotation.*

On a nommé *dextrogyres* les substances qui tournent à droite : telles sont le sucre de canne en dissolution dans l'eau, l'essence de citron, la solution alcoolique de camphre, la dextrine et l'acide tartrique; et l'on a appelé *lévogyres* les substances qui tournent à gauche, comme l'essence de térébenthine, l'essence de laurier, la gomme arabique.

640. Coloration produite par la polarisation circulaire. — Quand on regarde avec un prisme biréfringent une lame de quartz de quelques millimètres d'épaisseur, taillée perpendiculairement à l'axe, et traversée par un faisceau de lumière polarisée, on observe deux images vivement colorées dont les teintes sont complémentaires (548); car, en se recouvrant par leurs bords, elles donnent du blanc (fig. 521). En tournant alors le prisme, les deux images changent de teintes et prennent successivement toutes les couleurs du spectre, tout en continuant à être complémentaires.

Ce phénomène est une conséquence de la première loi sur la polarisation circulaire (639, 1^o). En effet, Biot ayant reconnu que le quartz fait tourner le plan de polarisation du rayon rouge de près de $17^{\circ}30'$, et celui du rayon violet de $44^{\circ}5'$, il résulte de la grande différence de ces deux angles que, lorsque la lumière polarisée qui a traversé la plaque de quartz émerge, les diverses couleurs simples qu'elle renferme sont polarisées dans des plans différents. Par conséquent, lorsque le faisceau ainsi transmis par le quartz est reçu à travers un prisme biréfringent qui le décompose en deux autres polarisés à angle droit (636), les diverses couleurs simples se partagent inégalement entre les deux images ordinaire et extraordinaire fournies par le prisme; d'où il résulte que ces images sont nécessairement complémentaires, les couleurs qui manquent à l'une se retrouvant dans l'autre.



Fig. 521.

Ces phénomènes de coloration s'observent bien avec l'appareil de Noremburg (fig. 519). Pour cela, on place sur l'écran e (fig. 520) une plaque de quartz s , taillée perpendiculairement à l'axe et fixée dans un disque de liège, puis, la glace n (fig. 519) étant inclinée de manière à faire passer dans le quartz un faisceau polarisé, on regarde au travers d'un prisme biréfringent g (fig. 520), et en faisant tourner le tube dans lequel est ce prisme, on observe les images complémentaires fournies par le passage dans le quartz de la lumière polarisée (fig. 521).

641. **Pouvoir rotatoire des liquides.** — Le quartz est la seule substance solide dans laquelle on ait observé la polarisation circulaire; mais Biot l'a retrouvée dans un grand nombre de liquides et de dissolutions. Le même savant a observé, en outre, que le déplacement du plan de polarisation peut faire connaître des différences de composition dans des corps où l'on n'en distingue aucune par l'analyse chimique. Par exemple, le sucre de raisin fait tourner à gauche le plan de polarisation, tandis que le sucre de canne le fait tourner à droite, quoique la composition chimique des deux sucres soit la même.

Biot a trouvé que le pouvoir rotatoire des liquides est beaucoup moindre que celui du quartz. Dans le sirop du sucre de canne concentré, qui est un des liquides qui possèdent le pouvoir rotatoire au plus haut degré, ce pouvoir est trente-six fois moindre que dans le quartz; d'où il résulte qu'on est forcé d'opérer sur des colonnes liquides d'une assez grande longueur, 20 centimètres environ.

La figure 522 représente l'appareil qui a été adopté par Biot pour mesurer le pouvoir rotatoire des liquides. Dans une gouttière de cuivre g , fixée à un support r , est un tube d de 20 centimètres de long, où est renfermé le liquide sur lequel on veut expérimenter. Ce tube, qui est de cuivre, est étamé intérieurement et fermé à ses deux extrémités par deux glaces parallèles. En m est une glace de verre noirci, faisant avec l'axe des tubes b , d , a , qui est le même pour tous les trois, un angle égal à l'angle de polarisation; d'où la lumière réfléchiée par la glace m , dans la direction bda , est polarisée. Au centre du cercle divisé h , dans le tube a , et perpendiculairement à l'axe bda , est un prisme biréfringent achromatisé, qu'on peut tourner à volonté autour de l'axe de l'appareil au moyen d'un bouton n . Celui-ci est fixé à une alidade c , qui porte un vernier et qui marque le nombre de degrés dont on tourne. Enfin, d'après la position du miroir m , le plan de polarisation Sod du faisceau réfléchi est vertical, et le zéro de la graduation sur le cercle h est dans ce plan.

Avant qu'on ait placé le tube d dans la gouttière g , l'image extraordinaire fournie par le prisme biréfringent s'éteint toutes les fois que l'alidade c correspond au zéro de la graduation, parce qu'alors le prisme biréfringent se trouve tourné de manière que sa section principale coïncide avec le plan de polarisation (637, 3^o). Il en est encore de même quand le tube d est plein d'eau ou de tout autre liquide *inactif*, comme l'alcool, l'éther, ce qui montre que le plan de polarisa-

tion n'a pas tourné. Mais si on remplit le tube d'une dissolution de sucre de canne, ou de tout autre liquide actif, l'image extraordinaire reparait, et pour l'éteindre il faut tourner l'alidade d'un certain angle à droite ou à gauche, suivant que le liquide est lévogyre ou dextrogyre, ce qui démontre que le plan de polarisation a tourné du même angle. Avec la dissolution de sucre de canne,

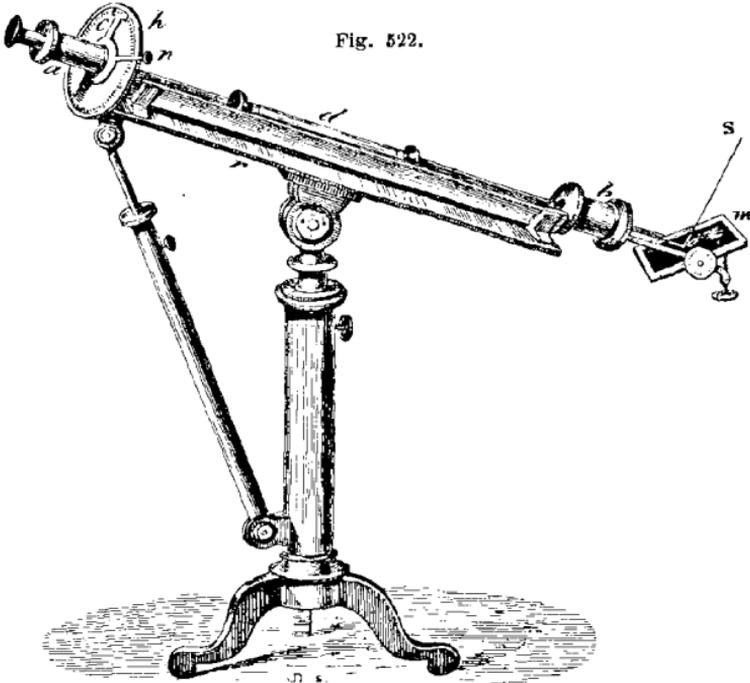


Fig. 522.

la rotation a lieu vers la droite, et si, avec une même dissolution, on prend des tubes plus ou moins longs, on trouve que la rotation croît proportionnellement à la longueur, ce qui est conforme à la deuxième loi de Biot (639). Enfin si, avec un tube de longueur constante, on prend des dissolutions de plus en plus riches en sucre, la rotation croît comme la quantité de sucre dissoute; donc, de l'angle de déviation on peut déduire l'analyse quantitative d'une dissolution.

Il importe d'opérer avec de la lumière simple; car, les différentes couleurs du spectre possédant des pouvoirs rotatoires différents, la lumière blanche est décomposée en traversant un liquide actif, et l'image extraordinaire ne disparaît complètement dans aucune position du prisme biréfringent, seulement elle change de teinte. Pour obvier à cet inconvénient, on place dans le tube *a*, entre l'œil et le prisme biréfringent, un verre coloré en rouge par l'oxyde de cuivre, lequel ne laisse passer que de la lumière rouge. L'image extraordinaire s'éteint alors toutes les fois que la section principale du prisme coïncide avec le plan de polarisation du faisceau rouge.

642. **Saccharimètre de Soleil.** — Soleil a utilisé la propriété rotatoire des liquides pour construire un appareil destiné à analyser les substances saccharifères; d'où le nom de *saccharimètre* donné à cet appareil.

La figure 523 représente le saccharimètre fixé horizontalement sur son pied,

et la figure 524 en donne une coupe longitudinale. Cet instrument, simple au point de vue pratique, ne laisse pas que d'être compliqué au point de vue théorique; car il suppose connus les principaux phénomènes de la double réfraction et de la polarisation.

Le principe de cet appareil n'est pas l'amplitude de la rotation du plan de polarisation, comme dans celui de Biot, décrit ci-dessus (641), mais la *compensation*, c'est-à-dire l'emploi d'une seconde substance active, agissant en sens inverse de celle qu'on veut analyser, et dont l'épaisseur peut varier jusqu'à ce

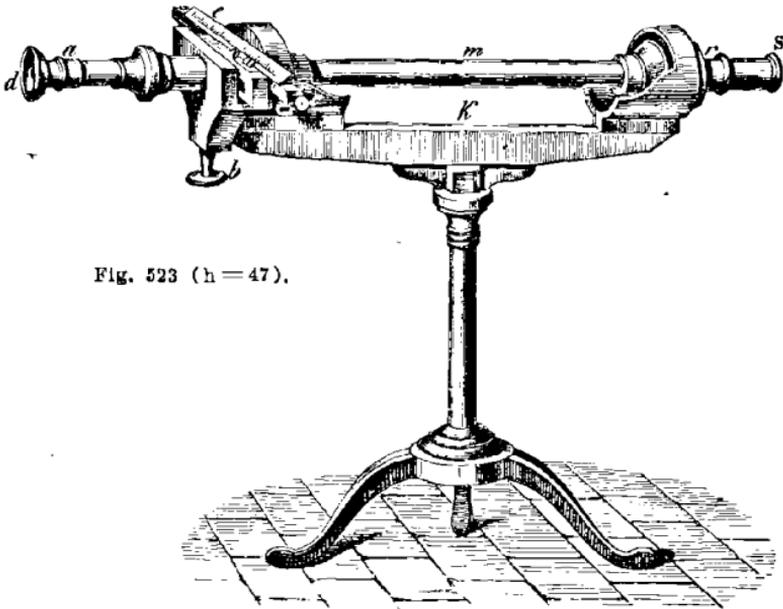


Fig. 523 (h = 47).

que les actions contraires des deux substances se détruisent complètement; en sorte qu'au lieu de mesurer la déviation du plan de polarisation, on mesure l'épaisseur à donner à la substance compensatrice, qui est une plaque de quartz, pour obtenir une compensation parfaite.

Cela posé, on peut distinguer dans l'appareil trois parties principales; un tube qui contient le liquide à analyser, un polariseur et un analyseur.

Le tube *m*, qui renferme le liquide, est de cuivre étamé intérieurement, et fermé à ses deux extrémités par deux glaces à faces parallèles; il est soutenu sur un support *k*, qui se termine à ses deux bouts par deux tubes *r* et *a*, dans lesquels sont les cristaux qui servent de polariseurs et d'analyseurs, et qui sont représentés dans la coupe (fig. 524).

Devant l'orifice *S* se place une lampe ordinaire à modérateur. La lumière émise par cette lampe, dans la direction de l'axe de l'instrument, rencontre d'abord un prisme biréfringent *r*, qui sert de polariseur (537, 8°). L'image ordinaire seule arrive à l'œil, l'image extraordinaire étant projetée hors du champ de la vision, à cause de l'amplitude de l'angle que font entre eux le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire. Enfin le prisme biréfringent est dans une position telle, que le plan de polarisation est vertical et passe par l'axe de l'appareil.

À sa sortie du prisme biréfringent, le faisceau polarisé rencontre une plaque de quartz *q* à double rotation, c'est-à-dire que cette plaque tourne à la fois

le plan de polarisation à droite et à gauche. Pour cela, elle est formée de deux plaques de quartz de rotations contraires, juxtaposées comme le montre la figure 527, de façon que la ligne de séparation soit verticale et dans le même plan que l'axe de l'appareil. Ces quartz, taillés perpendiculairement à l'axe, ont une épaisseur de $3^{\text{mm}},75$, à laquelle correspond une rotation de 90° , et donnent une teinte rose violacée qui est la *teinte de passage*. Le quartz, qu'il soit dextrogyre ou lévogyre, tournant toujours d'une même quantité, à épaisseur égale ($539,3^{\circ}$), il en résulte que les deux quartz *a* et *b* font tourner également le plan de polarisation, l'un à droite, l'autre à gauche. Par conséquent, si on les regarde avec un prisme biréfringent, ils présentent exactement la même teinte.

Fig. 524.

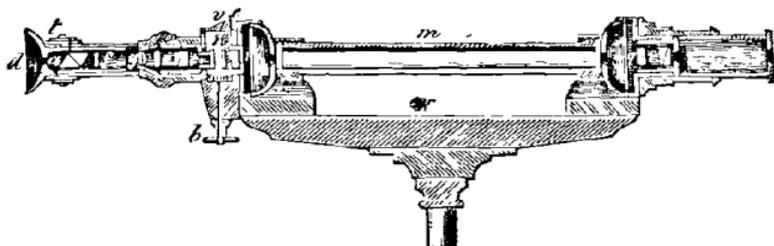


Fig. 525.



Fig. 526.



Fig. 527.

Après avoir traversé le quartz *q*, le faisceau polarisé passe dans le liquide qui contient le tube *m*, et de là rencontre une nouvelle plaque de quartz *t*, simple et d'épaisseur arbitraire, dont on va voir bientôt l'usage.

En *n* est le compensateur destiné à détruire la rotation de la colonne liquide *m*. Il est formé de deux quartz ayant la même rotation, soit à droite, soit à gauche, mais contraire à celle de la plaque *t*. Ces deux quartz, représentés en coupe dans la figure 525, s'obtiennent en coupant obliquement une plaque de quartz à faces parallèles, de manière à former deux prismes de même angle *N*, *N*; en juxtaposant ensuite ces deux prismes, comme le représente la figure, il en résulte une seule plaque à faces parallèles, qui offre l'avantage de pouvoir varier d'épaisseur. Pour cela, chaque prisme est fixé à une coulisse, de façon à pouvoir glisser dans un sens ou dans l'autre, tout en conservant aux faces homologues leur parallélisme. Ce mouvement s'obtient au moyen d'une double crémaillère et d'un pignon qu'on tourne à l'aide d'un bouton *b* (fig. 523 et 524).

Quand les lames se déplacent respectivement dans le sens indiqué par les flèches (fig. 525), il est évident que la somme de leurs épaisseurs augmente, et qu'elle diminue quand les plaques avancent dans le sens opposé. Une échelle *e* et un vernier *v* (fig. 523) suivent les plaques dans leur mouvement, et servent à mesurer les variations d'épaisseur du compensateur. Cette échelle, représentée ainsi que son vernier dans la figure 526, porte deux divisions ayant un zéro commun, l'une de gauche à droite, pour les liquides dextrogyres, l'autre de droite à gauche, pour les liquides lévogyres.

Lorsque le vernier est au zéro de l'échelle, la somme des épaisseurs des plaques *N*, *N* est précisément égale à celle de la plaque *t*, et comme la rotation de cette dernière est contraire à celle du compensateur, l'effet est nul. Mais si

l'on fait marcher dans un sens ou dans l'autre les plaques du compensateur, celui-ci ou le quartz i l'emporte, et il y a rotation à droite ou à gauche.

Après le compensateur est un prisme biréfringent c (fig. 524) servant d'analyseur pour observer le faisceau polarisé qui a traversé le liquide et les diverses plaques de quartz. Pour comprendre plus facilement l'objet du prisme c , nous négligerons pour un instant les cristaux et les lentilles représentés à sa gauche dans le dessin. Si l'on fait d'abord coïncider le zéro du vernier v avec celui de l'échelle, et si le liquide contenu dans le tube est inactif, les actions du compensateur et de la plaque i se détruisent, et, l'effet du liquide étant nul, les deux moitiés de la plaque q , vues au travers du prisme c , donnent rigoureusement la même teinte, ainsi qu'on l'a déjà observé. Mais si l'on remplace le tube plein de liquide inactif par un second tube rempli d'une dissolution sucrée, le pouvoir rotatoire de celle-ci s'ajoute à celui de même sens de l'un des quartz de la plaque à double rotation q , et diminue d'autant le pouvoir rotatoire de l'autre quartz. Il résulte de là que les deux moitiés de la plaque q ne présentent plus la même teinte, et que la moitié a (fig. 527) est rouge, par exemple, tandis que la moitié b est bleue. On fait alors marcher les prismes du compensateur, en tournant le bouton b vers la droite ou vers la gauche, jusqu'à ce que la différence d'action du compensateur et de la plaque i compense le pouvoir rotatoire de la dissolution, ce qui a lieu lorsque les deux moitiés de la plaque q à double rotation reviennent à leur teinte primitive.

Quant au sens de la déviation et à l'épaisseur du compensateur, on les mesure par le déplacement relatif de l'échelle e et du vernier v . Les divisions de l'échelle sont telles, que 10 de ces divisions correspondent à une variation de 1 millimètre dans l'épaisseur du compensateur, et comme le vernier donne lui-même les dixièmes

de ces divisions, il en résulte qu'il mesure des variations de $\frac{1}{100}$ de millimètre dans l'épaisseur du compensateur.

Une fois que la teinte des deux moitiés de la plaque q est bien égale et la même qu'avant l'interposition de la dissolution sucrée, on lit sur l'échelle à quelle division correspond le vernier, et le nombre correspondant donne immédiatement le titre de la dissolution. Pour cela, on se fonde sur ce principe que 168,471 de sucre candi bien desséché et bien pur étant dissous dans l'eau, et la liqueur étant amenée au volume de 100 centimètres cubes et observée dans un tube de 20 centimètres de longueur, la déviation produite est précisément celle que comporte une épaisseur de quartz de 1 millimètre. Cela posé, pour faire l'analyse d'un sucre brut, on adopte toujours un poids normal de 168,471 de sucre qu'on fait dissoudre dans de l'eau, et le volume de la dissolution étant amené à 100 centimètres cubes, on en remplit le tube de 20 centimètres de longueur, et l'on observe le nombre indiqué par le vernier, quand on a retrouvé la teinte primitive. Ce nombre étant, par exemple, 42, on en conclut que cette dissolution contient, de sucre cristallisable, 42 pour 100 de ce que contenait la dissolution du sucre candi, et, par conséquent, $168,471 \times \frac{42}{100}$, ou 68,918. Toutefois ce ré-

sultat n'est exact qu'autant qu'on est assuré que le sucre soumis à l'expérience n'est pas mélangé de sucre incristallisable, ou d'une autre substance lévogyre. Alors on a recours à l'*inversion*, c'est-à-dire qu'on transforme, au moyen de l'acide chlorhydrique, le sucre cristallisable, qui est dextrogyre, en sucre incristallisable, qui est lévogyre; puis on fait une nouvelle opération qui, combinée avec la première, donne la quantité de sucre cristallisable.

Il nous reste à faire connaître l'usage des cristaux et des lentilles o , g , f , a , placés à la suite du prisme c (fig. 524). Leur ensemble forme ce que Soleil a nommé le *producteur des teintes sensibles*. En effet, la teinte la plus sensible, c'est-à-dire celle qui permet de distinguer une différence très-faible dans la colo-

ration des deux moitiés de la plaque à rotation, n'est pas la même pour tous les yeux ; pour le plus grand nombre, c'est une nuance d'un bleu violacé qui rappelle celle de la fleur de lin. Il importe donc de produire facilement cette teinte ou toute autre plus sensible à l'œil de l'observateur. Pour cela, en avant du prisme *c* est d'abord une plaque de quartz *o* taillée perpendiculairement à l'axe, puis une petite lunette de Gaillée (583), formée d'un verre biconvexe *g* et d'un verre biconcave *f*, pouvant se rapprocher entre eux, ou s'écarter suivant la distance de la vue distincte de l'observateur. Enfin l'appareil se termine par un prisme de Nicol *a*, qu'on tourne à volonté sur lui-même. Le prisme biréfringent *c* agissant comme polariseur par rapport au quartz *o*, et le prisme *a* comme analyseur, lorsqu'on tourne ce dernier à droite ou à gauche, la lumière qui a traversé le prisme *c* et la plaque *o* change de teinte (640), et finit par donner celle que l'expérimentateur a adoptée pour teinte fixe.

Dans le saccharimètre de Soleil, la quantité de sucre se mesure au moyen d'une plaque de quartz à épaisseur variable. Or on construit aussi, aujourd'hui, des saccharimètres où la quantité de sucre se mesure directement par l'amplitude de la rotation, comme dans l'appareil de Blot (641). Ces saccharimètres offrent l'avantage de s'appliquer à toutes les substances. Tels sont le saccharimètre de MM. Cornu et Duboseq, et celui de M. Laurent.

643. **Analyse de l'urine des diabétiques.** — Dans la maladie connue sous le nom de *diabète sucré*, les urines sont chargées d'une forte quantité d'un sucre fermentescible qu'on nomme sucre de diabète. Ce sucre, à l'état naturel dans les urines, fait tourner le plan de polarisation à droite. Pour doser le sucre contenu dans les urines des diabétiques, on commence, si elles ne sont pas assez limpides, par les clarifier par le sous-acétate de plomb ; on filtre, on remplit le tube *m* de l'urine clarifiée, puis on tourne le bouton *b* jusqu'à ce qu'on obtienne, pour la plaque à deux rotations, la même teinte qu'avant l'interposition de l'urine. L'expérience ayant appris que 100 parties de l'échelle du saccharimètre représentent le déplacement à donner aux quartz compensateurs lorsqu'il entre dans l'urine 225^{es},6 de sucre par litre, il en résulte que chaque division de l'échelle représente 2^{es},256 de sucre. Donc, pour obtenir la quantité de sucre contenue dans une urine donnée, il faut multiplier 2^{es},256 par le nombre qu'indique le vernier au moment où l'on retrouve la teinte primitive.

* COULEURS PRODUITES PAR L'INTERFÉRENCE DES RAYONS POLARISÉS

644. **Lois de l'interférence des rayons polarisés.** — Après la découverte de la polarisation, Arago et Fresnel cherchèrent si les rayons polarisés présentaient entre eux les mêmes phénomènes d'interférence que les rayons non polarisés, et ce fut ainsi qu'ils arrivèrent à découvrir les lois suivantes sur l'interférence de la lumière polarisée, et en même temps les brillants phénomènes de coloration décrits ci-après (645 à 650).

1^{re} LOI. — Deux rayons polarisés dans le même plan interfèrent entre eux absolument comme deux rayons naturels.

2^e LOI. — Deux rayons polarisés dans deux plans perpendiculaires n'interfèrent pas dans le cas où interféreraient deux rayons naturels.

3^e LOI. — Deux rayons polarisés d'abord dans des plans perpendiculaires peuvent être amenés dans le même plan de polarisation, sans acquérir pour cela la propriété d'interférer entre eux.

4^e LOI. — Deux rayons polarisés dans des plans perpendiculaires, et ramenés ensuite au même état de polarisation, interfèrent comme la lumière ordinaire, s'ils ont été primitivement polarisés dans un même plan.

5^e LOI. — Dans les phénomènes d'interférence par des rayons qui ont subi la double réfraction, le lieu des franges colorées n'est pas déterminé uniquement

par la différence des routes ou des vitesses; car il faut tenir compte d'une demi-ondulation en plus ou en moins, suivant que l'on considère le plan de la réfraction extraordinaire ou ordinaire.

Ces lois donnent l'explication des diverses circonstances dans lesquelles les rayons polarisés donnent ou ne donnent pas lieu aux phénomènes de coloration qui vont être décrits.

645. Teintes produites par la lumière polarisée en traversant les lames minces biréfringentes. — En étudiant les propriétés de la lumière polarisée (633), on a vu qu'un faisceau polarisé par sa réflexion sur un premier miroir ne se réfléchit plus sur un second, si les deux plans de réflexion sont perpendiculaires entre eux, ou encore que la lumière polarisée ne peut traverser une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de polarisation; enfin, que la lumière polarisée par son passage à travers un prisme biréfringent ne donne qu'une seule image quand le plan de la section principale de ce prisme est perpendiculaire ou parallèle au plan de polarisation. Or, dans ces diverses expériences, il suffit que la lumière, après être polarisée, traverse une lame mince de mica, de sulfate de chaux, de cristal de roche, de chaux carbonatée, ou de toute autre substance biréfringente, pour que les phénomènes soient entièrement changés.

Pour observer les effets qui se produisent alors, l'appareil le plus commode est celui de Noremborg (fig. 519 et 520). En *g* (fig. 520) est un prisme biréfringent, ou une tourmaline, ou un prisme de Nicol. La plaque mince cristallisée est placée sur l'écran *e*, ou en *p*, sur la glace étamée; mais il est à remarquer que, dans ce dernier cas, la lumière polarisée sur la glace non étamée *n* traverse deux fois la lame cristallisée placée en *p*, et que par suite on obtient le même effet que si la plaque, n'étant traversée qu'une fois par la lumière polarisée, avait une épaisseur double.

L'analyseur placé en *g* étant un prisme biréfringent, on a vu (638) que tant qu'aucune lame cristallisée n'est encore placée sur l'appareil, le faisceau polarisé sur la glace *n* est renvoyé vers le prisme le traverse en subissant une double réfraction, d'où l'œil placé au-dessus voit deux images de l'ouverture *e* percée au centre du diaphragme *a*. Ces deux images sont blanches et d'intensités inégales, et en faisant tourner le prisme sur son support, chacune d'elles s'affaiblit successivement et s'éteint toutes les fois que la section principale du prisme devient perpendiculaire ou parallèle au plan de polarisation du faisceau.

Cela posé, lorsqu'on interpose au-dessous du prisme une lame biréfringente, taillée parallèlement à l'axe, voici les phénomènes qu'on observe :

1° La section principale de la lame étant parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation du faisceau, l'œil aperçoit toujours deux images blanches qui subissent, lorsqu'on fait tourner le prisme biréfringent, les mêmes variations d'intensité que si la lame n'existait pas.

2° Lorsque la section principale de la lame n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan de polarisation, les deux images sont colorées, et leurs couleurs sont complémentaires; car lorsqu'elles se superposent par leurs bords, la partie commune est blanche.

3° La lame restant fixe, si l'on fait tourner le prisme, les teintes des images ne changent pas, mais leur intensité varie, et le maximum d'éclat a lieu quand la section principale du prisme fait avec celle de la lame un angle de 45 ou de 135 degrés, c'est-à-dire dans les positions intermédiaires à celles qui correspondent au cas où les deux images sont blanches; de plus, les images échangent successivement leurs couleurs, en passant par le blanc, ce qui a lieu lorsque les sections principales du prisme et de la lame sont parallèles ou perpendiculaires entre elles.

En employant pour analyseur une tourmaline ou un prisme de Nicol au lieu d'un prisme biréfringent, on observe encore les mêmes phénomènes de coloration, seulement on n'a qu'une image.

646. Influence de l'épaisseur des lames. — Pour des lames de même sub-

stance, les teintes changent avec l'épaisseur et diminuent d'intensité à mesure que les lames sont plus épaisses. Il est même une limite d'épaisseur au delà de laquelle on n'obtient plus de coloration. Pour le mica, cette limite est de 88 centièmes de millimètre; pour la chaux sulfatée et le cristal de roche, de 45 centièmes; et pour le spath d'Islande, de 25 millèmes. C'est ce qui rend la coloration très-difficile à obtenir avec cette substance, à cause de la difficulté de la tailler en lames assez minces. Au contraire, pour le mica et la chaux sulfatée, qui se clivent facilement en lames extrêmement minces, l'expérience réussit très-bien.

On obtient d'une même lame des teintes différentes, en l'inclinant plus ou moins par rapport au faisceau polarisé qui la traverse. Cela revient, en effet, à faire varier son épaisseur.

Pour une même substance, avec des lames d'épaisseur croissante, les teintes varient suivant les mêmes lois que les teintes des anneaux colorés de Newton, correspondant à des couches d'air de plus en plus épaisses (631); seulement l'épaisseur de la lame cristallisée doit l'emporter de beaucoup sur celle de la couche d'air. En effet, pour une teinte de même ordre, l'épaisseur du mica doit être 440 fois celle de la couche d'air; pour le cristal de roche et la chaux sulfatée, 230 fois; et pour le spath d'Islande, 18 fois seulement.

647. **Théorie de la coloration produite par la lumière polarisée.** — En se fondant sur la théorie des ondulations, Fresnel a donné une explication simple et complète des teintes produites par la lumière polarisée lorsqu'elle traverse des lames biréfringentes, en faisant voir que ces teintes ont pour cause l'inégale vitesse des rayons ordinaire et extraordinaire, après qu'ils ont traversé la lame biréfringente, inégalité d'où résultent, entre les deux systèmes d'ondulations, des retards ou des avances qui les placent dans des conditions convenables pour interférer, et par suite pour développer des couleurs (629).

648. **Anneaux colorés produits par la lumière polarisée en traversant les lames biréfringentes.** — Dans l'expérience faite avec l'appareil de Noremberg et décrite précédemment (638), la lame cristallisée étant traversée perpendiculairement à ses faces par un faisceau de lumière parallèle, toutes les parties de

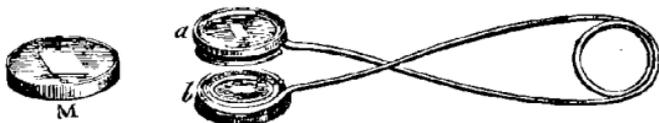


Fig. 528.

Fig. 529.

la lame agissent de la même manière, et l'on a partout la même teinte. Or les effets ne sont plus les mêmes lorsque les rayons incidents traversent la lame sous des obliquités différentes; car cela revient à des épaisseurs inégales, d'où résultent des anneaux tout à fait semblables à ceux de Newton (631).

Le meilleur appareil pour observer ces nouveaux phénomènes est la *pince à tourmalines*. On nomme ainsi un petit instrument qui se compose de deux tourmalines taillées parallèlement à l'axe, et enchâssées chacune dans un disque de cuivre. Ces deux disques, qui sont percés à leur centre et noirs, sont eux-mêmes montés dans deux anneaux de fil de cuivre argenté, lequel s'enroule sur lui-même comme le montre la figure 529, de manière à former ressort et à faire appliquer l'une contre l'autre les deux tourmalines. Celles-ci tournant avec les disques, on les dispose, à volonté, de sorte que leurs axes soient parallèles ou perpendiculaires entre eux.

Le cristal sur lequel on veut expérimenter étant fixé au centre d'un disque de liège (fig. 528), on place celui-ci entre les deux tourmalines, puis on applique la pince en avant de l'œil de manière à recevoir la lumière diffuse du ciel. La tourmaline opposée à l'œil agit alors comme polariseur, et l'autre comme ana-

lyseur (637). Si le cristal qu'on observe ainsi, étant à un seul axe et taillé perpendiculairement à l'axe, est éclairé par une lumière simple, de la lumière rouge, par exemple, on voit se produire une série d'anneaux circulaires alternativement rouges et obscurs. Avec une autre couleur simple, on obtient des anneaux semblables, mais leur diamètre augmente avec la réfringibilité de la couleur. Au contraire, le diamètre des anneaux diminue quand l'épaisseur des lames

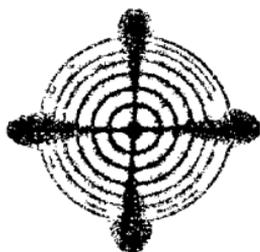


Fig. 530.



Fig. 531.



Fig. 532.

augmente, et au delà d'une certaine épaisseur, il ne s'en produit plus. Si, au lieu d'éclairer les lames avec de la lumière homogène, on les éclaire avec de la lumière blanche, comme les anneaux de différentes teintes qui se produisent alors n'ont pas le même diamètre, ils se superposent en partie, en produisant des anneaux irisés très-brillants.

La position du cristal est sans influence sur les anneaux; mais il n'en est pas de même de la position relative des deux tourmalines. Par exemple, en expérimentant sur un spath d'Islande taillé perpendiculairement à l'axe, et de 1 à 20 millimètres d'épaisseur, lorsque les axes des tourmalines sont perpendiculaires entre eux, on observe une belle série d'anneaux vivement colorés et traversés par une croix noire (fig. 530); si les axes sont parallèles, les anneaux se colorent de teintes complémentaires de celles qu'ils avaient d'abord, et ils sont alors traversés par une croix blanche (fig. 531).

Pour se rendre compte de la formation des anneaux par la lumière polarisée en traversant les lames biréfringentes, il faut observer que, dans le cas que nous considérons, ces lames sont traversées par un faisceau conique convergent dont le sommet est l'œil de l'observateur. D'où il suit que l'épaisseur de la lame que doivent traverser les rayons augmente avec leur divergence, mais que pour des rayons de même obliquité, cette épaisseur est la même; d'où résultent des différences de vitesse du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire qui expliquent la formation des couleurs et leur disposition circulaire autour de l'axe du faisceau et du cristal. Quant à la croix noire, elle est due à ce que la lumière polarisée est absorbée dans le plan de la section principale de la tourmaline et dans le plan perpendiculaire.

On observe des effets analogues avec tous les cristaux à un axe, comme la tourmaline, l'émeraude, le corindon, le béryl, le phosphate de plomb, le prussiate de potasse, le cristal de roche. Toutefois, avec ce dernier, la croix disparaît par un effet de polarisation rotatoire (640).

649. **Anneaux dans les cristaux à deux axes.** — Dans les cristaux à deux axes, il se produit encore des anneaux colorés, mais d'une forme plus compliquée. Les bandes colorées, au lieu d'être circulaires et concentriques, présentent alors la forme de courbes à deux centres, le centre de chaque système correspondant à l'un des axes du cristal. Les figures 533, 534 et 535 représentent les courbes que donne avec la pince à tourmalines l'azotate de potasse taillé perpendiculairement à l'axe. Quand les axes des deux tourmalines sont rectangu-

lares, on a la figure 533; puis, en tournant lentement le cristal, sans changer les tourmalines, on passe par la figure 534, pour arriver à la figure 535, lorsqu'on a tourné de 45 degrés. Si les axes des tourmalines sont parallèles, on obtient les mêmes courbes colorées, mais leurs teintes sont supplémentaires et la croix noire se change en croix blanche. Si l'angle des deux axes du cristal dé-



Fig. 533.



Fig. 534.

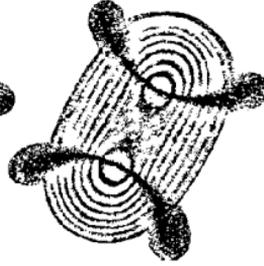


Fig. 535.

passé 20 à 25 degrés, on ne peut voir à la fois les deux systèmes de courbes; c'est ce qui arrive pour l'aragonite, qui donne la figure 532.

Herschel, qui a mesuré les anneaux donnés par les cristaux à deux axes, les rapporte au genre de courbe connu en géométrie sous le nom de *lemniscate*.

650. Coloration produite par le verre trempé ou comprimé. — Le verre

Fig. 536.



Fig. 537.

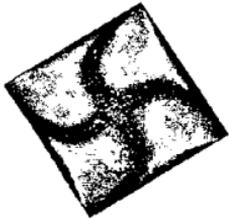


Fig. 538.



Fig. 539.



Fig. 540.

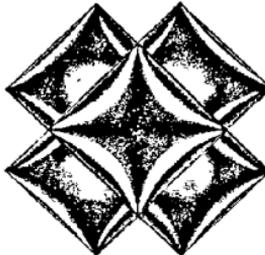
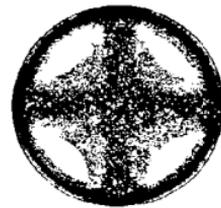


Fig. 541.



ordinaire n'est pas doué de la double réfraction; mais il acquiert cette propriété si, par une cause quelconque, son élasticité est modifiée dans une direction plus que dans l'autre. Pour cela il suffit de le comprimer fortement dans un sens,

de le courber ou de le tremper, c'est-à-dire de le refroidir rapidement après l'avoir chauffé. Si le verre est alors traversé par un faisceau de lumière polarisée, on obtient des effets de coloration tout à fait analogues à ceux observés ci-dessus dans les cristaux biréfringents, mais beaucoup plus variés, selon la forme circulaire, carrée, rectangulaire, triangulaire, qu'on donne aux plaques de verre, et suivant le degré de tension de leurs molécules.

Le polariseur étant une glace noire sur laquelle on reçoit la lumière des nues, et l'analyseur un prisme de Nicol au travers duquel on regarde les plaques de verre traversées par la lumière polarisée, les figures 536, 537 et 539 représentent les images qu'on observe en faisant tourner successivement, dans son propre plan, une plaque carrée de verre trempé. Les figures 538 et 541 représentent les images que donne une plaque circulaire, et la figure 540 celle fournie par deux plaques rectangulaires superposées, image qui varie, lorsqu'on fait tourner le système de plaques. Les verres comprimés, ou courbés, présentent des effets de même genre, qui varient dans les mêmes conditions.

651. **Polarisation de la chaleur.** — De même que la lumière, la chaleur peut se polariser par réflexion et par réfraction (633); mais les recherches à ce sujet présentent de grandes difficultés. Les premières furent faites en 1810 par Bérard et Malus lui-même; ce dernier étant mort, Bérard les continua seul.

Dans les expériences de ce savant, les rayons calorifiques réfléchis sur une première glace étaient reçus sur une deuxième, comme dans l'appareil de Noremburg (fig. 519), et de là tombaient sur un réflecteur métallique qui les concentrait sur la boule d'un thermomètre différentiel. Bérard observa ainsi un minimum d'intensité quand le plan de réflexion sur la seconde glace était perpendiculaire au plan de réflexion sur la première. Ce phénomène étant le même que celui que présente la lumière dans la même expérience (633), Bérard en conclut que la chaleur se polarisait en se réfléchissant sur la première glace.

Melloni a appliqué son thermo-multiplicateur à l'étude de la polarisation de la chaleur, et en faisant passer les rayons calorifiques au travers de deux tourmalines parallèles, ou au travers de deux piles de mica, il a constaté qu'ils se polarisent par réfraction. Il a trouvé de plus que l'angle de polarisation (634) est sensiblement le même pour la chaleur que pour la lumière.

Plus tard, Foucault et M. Fizeau ont fait voir que les rayons calorifiques obscurs peuvent interférer; de son côté, M. Desains a constaté la rotation du plan de polarisation des mêmes rayons lorsqu'ils traversent le quartz, et enfin, récemment, il a reproduit avec eux le phénomène des réseaux. Toutes ces expériences font voir l'analogie complète qui existe entre les rayons calorifiques et les rayons lumineux, et conduisent à admettre que les phénomènes de la chaleur et de la lumière sont le résultat de mouvements semblables dans la matière pondérable et dans l'éther.

LIVRE VIII

MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES AIMANTS

652. **Aimants naturels et aimants artificiels.** — On nomme *aimants* des substances qui ont la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux, qui sont le nickel, le cobalt et le chrome. Toutefois nous citerons bientôt des expériences qui prouvent que les aimants agissent réellement sur tous les corps, tantôt par attraction, tantôt par répulsion, mais d'une manière très-faible (661).

On distingue des aimants naturels et des aimants artificiels. L'*aimant naturel*, ou *pierre d'aimant*, est un oxyde de fer connu en chimie sous le nom d'*oxyde magnétique*. Sa formule est $\text{Fe}_3\text{O}_4 = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$; c'est-à-dire qu'il est formé d'un équivalent de protoxyde et d'un équivalent de sesquioxyle. L'oxyde magnétique est très-abondant dans la nature; on le rencontre dans les terrains anciens, et surtout en Suède et en Norvège, où on l'exploite comme minerai de fer, et où il donne la meilleure qualité de fer connue. Toutefois la plupart des échantillons d'oxyde de fer magnétique n'attirent pas le fer; ce n'est qu'accidentellement qu'ils sont doués de cette propriété.

Les *aimants artificiels* sont des barreaux ou des aiguilles d'acier trempé, qui ne possèdent pas naturellement les propriétés des aimants naturels, mais qui les ont acquises par des frictions avec un aimant, ou par des procédés électriques qui seront décrits plus tard. On construit aussi, sous l'influence des courants électriques, des aimants artificiels puissants avec du fer *doux*, c'est-à-dire sensiblement exempt de toute matière étrangère; mais leur aimantation, purement temporaire, ne persiste que pendant la durée du courant qui la produit.

Les propriétés des aimants artificiels et des aimants naturels sont identiquement les mêmes.

Le pouvoir attractif des aimants s'exerce à toutes les distances et à travers tous les corps; il décroît très-vite quand la distance

augmente (678), et varie avec la température. Coulomb a fait voir que l'intensité magnétique d'un barreau diminue à mesure qu'on élève sa température, et reprend sa valeur première quand il revient à la température primitive, pourvu qu'on n'ait pas dépassé une certaine limite; car, à la température rouge, les aimants perdent complètement leur puissance attractive.

L'attraction que l'aimant exerce sur le fer est réciproque, ce qui est un principe général de toutes les attractions. On le vérifie en présentant une masse de fer à un aimant : celui-ci est attiré.

La force attractive des aimants a reçu le nom de *force magnétique*, et leur théorie physique se désigne elle-même sous le nom de *magnétisme*, expression qu'on ne doit pas confondre avec celle de *magnétisme animal*, qu'on a adoptée pour exprimer l'influence qu'une personne exercerait sur une autre par l'empire de sa volonté, influence qui est loin d'être démontrée.

653. **Pôles et ligne neutre.** — Les aimants ne possèdent pas dans tous leurs points la même force magnétique. En effet, si l'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on voit celle-ci

Fig. 542.



adhérer abondamment vers les extrémités du barreau sous la forme de houpes hérissées (fig. 542); mais l'adhérence de la limaille décroît rapidement à mesure qu'on s'éloigne des extrémités, jusqu'à la région moyenne du barreau, où elle est nulle. La partie de la surface de l'aimant où la force magnétique est insensible a reçu le nom de *ligne neutre*, et les deux points voisins des extrémités, où se manifeste le maximum d'attraction, se nomment *pôles*. Tout aimant, naturel ou artificiel, présente deux pôles et une ligne neutre; toutefois, dans l'aimantation des barreaux et des aiguilles, il se produit parfois des alternatives de pôles contraires situés entre les pôles extrêmes. Ces pôles intermédiaires se nomment *points conséquents*. Tantôt ils sont en nombre pair, tantôt en nombre impair. Nous supposons toujours que les aimants n'ont que deux pôles, ce qui est le cas ordinaire.

Les pôles se désignent, l'un sous le nom de *pôle austral*, l'autre sous celui de *pôle boréal*, expressions empruntées à l'action que les pôles terrestres exercent sur les pôles des aimants (662). Dans les dessins, le pôle austral sera toujours représenté par les lettres

a ou *A*, le pôle boréal par les lettres *b* ou *B*, et l'on appellera pôles de même nom ceux représentés par les mêmes lettres.

654. **Actions mutuelles des pôles.** — Les deux pôles d'un aimant paraissent identiques quand on les présente à de la limaille de fer; mais cette identité n'est

qu'apparente. En effet, qu'on suspende une aiguille aimantée *ab* (fig. 543) à un fil fin, et qu'on approche du pôle austral *a* le pôle austral *A* d'une autre aiguille, on remarque une vive répulsion; qu'on approche, au contraire, le pôle *A* du pôle boréal de l'aiguille mobile, il se produit une forte attraction. Donc les pôles *a* et *b* ne sont pas identiques, puisque l'un est repoussé et l'autre attiré par le même pôle *A* de l'aimant qu'on tient à la main.

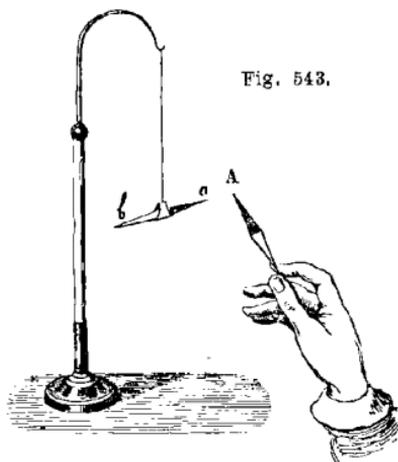


Fig. 543.

On vérifie de même que les deux pôles de ce dernier diffèrent entre eux, en les présentant successivement au même pôle *a* de l'aiguille mobile. Avec l'un, il y a répulsion, et attraction avec l'autre. On peut donc poser cette loi simple sur les actions réciproques entre deux aimants :

Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de noms contraires s'attirent.

Les actions contraires du pôle boréal et du pôle austral se démontrent encore par l'expérience suivante. On fait porter à un bar-

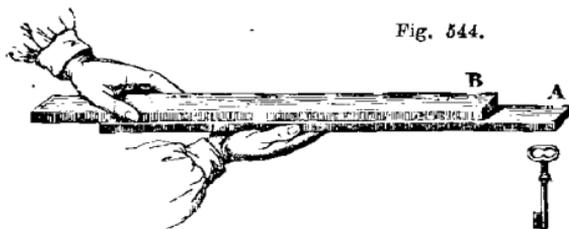


Fig. 544.

reau aimanté un objet de fer, une clef par exemple; puis sur ce premier barreau on en fait glisser un second sensiblement de même force, en ayant soin de mettre en regard les pôles contraires (fig. 544). La clef continue à être portée, tant que les deux pôles sont éloignés; mais aussitôt qu'ils sont suffisamment rapprochés, elle

tombe, comme si le barreau qui la soutenait avait perdu tout à coup sa propriété magnétique; cependant il n'en est rien, car celui-ci peut la porter de nouveau aussitôt qu'on a retiré le second barreau.

655. **Hypothèse de deux fluides magnétiques.** — Pour expliquer les phénomènes qu'on vient de faire connaître, on a longtemps admis l'hypothèse de deux *fluides magnétiques*, agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre; et on désignait ces fluides sous les noms, l'un de *fluide austral*, l'autre de *fluide boréal*, du nom des pôles des aimants où leurs actions sont prépondérantes.

Dans cette hypothèse, les deux fluides, avant l'aimantation, sont réunis autour des molécules des substances magnétiques (657), et se neutralisent mutuellement; mais, sous l'influence d'une force plus grande que leur attraction réciproque, ils sont séparés et orientés autour des molécules, le fluide boréal dans une direction, le fluide austral dans la direction opposée, et il y a alors aimantation, laquelle persiste tant que dure l'orientation, et cesse avec elle.

Ampère a donné sur le magnétisme une hypothèse fondée sur les propriétés des courants électriques, plus simple et plus satisfaisante que la précédente. Aujourd'hui qu'on renonce de toute part à l'ancienne hypothèse des fluides impondérables, il convient d'adopter exclusivement la théorie suivante due à Ampère.

656. **Théorie d'Ampère sur le magnétisme.** — Il sera démontré, dans l'électro-dynamique (830), que *deux courants électriques parallèles et de même direction s'attirent*, et que *deux courants parallèles de directions contraires se repoussent*.

Se fondant sur cette action mutuelle des courants, Ampère a expliqué les attractions et les répulsions magnétiques en admettant, autour des molécules des substances magnétiques, des courants particuliers de directions indéterminées les uns par rapport aux autres avant l'aimantation, mais tous de même sens dans les aimants. Or on verra (848) que tous ces courants, connus sous le nom de *courants d'Ampère*, équivalent à une suite de courants parallèles et de même sens, enroulés d'un pôle à l'autre à la surface de chaque aimant; par suite, lorsqu'on met en présence les pôles de deux aimants, ce sont ces courants qui, suivant qu'ils sont de même sens ou de sens contraires dans ces pôles, donnent lieu aux attractions et aux répulsions magnétiques.

Cette hypothèse, qui relie le magnétisme à l'électricité, satisfait à l'explication de tous les phénomènes magnétiques.

657. **Différence entre les substances magnétiques et les aimants.** — On nomme *substances magnétiques* les substances qui sont attirées par l'aimant, comme le fer, l'acier, le nickel. Elles con-

tiennent les courants d'Ampère, mais dirigés confusément autour des molécules. Les composés ferrugineux sont généralement magnétiques, et le sont d'autant plus, qu'ils contiennent plus de fer. Quelques-uns cependant, comme le persulfure de fer, ne sont pas attirés par l'aimant. Les substances magnétiques privées de force coercitive (659), comme le fer doux, le nickel pur, portées à une haute température, ne sont plus attirables à l'aimant. Le fer cesse d'être magnétique vers 600 degrés, et le nickel vers 350.

Il est facile de distinguer une substance magnétique d'un aimant: la première n'a pas de pôles; présentée successivement aux deux extrémités d'une aiguille mobile *ab* (fig. 543), elle les attire toutes les deux, tandis qu'un aimant attirerait l'une et repousserait l'autre, si l'on avait soin de le présenter par le même pôle.

658. **Aimantation par influence, fantômes magnétiques et lignes de force.** — Lorsqu'une substance magnétique est mise en contact avec un barreau aimanté, les courants d'Ampère s'orientent



Fig. 544.

tous de même sens, et la substance devient, tant que l'orientation persiste, un aimant complet, ayant ses deux pôles et sa ligne neutre. Par exemple, si l'on fait porter par l'un des pôles d'un aimant un petit cylindre de fer doux *ab* (fig. 545), ce cylindre peut, à son tour, porter un second cylindre semblable, puis celui-ci un troisième, et ainsi de suite, jusqu'à sept ou huit, suivant la force du barreau. Chacun des cylindres est donc un aimant; mais seulement tant que continue l'influence du barreau aimanté. Car si l'on interrompt le contact de celui-ci avec le premier cylindre, aussitôt les autres cylindres se détachent et ne conservent aucune trace de magnétisme. L'orientation des courants d'Ampère n'a donc été que momentanée. Le nickel s'aimante aussi très-bien sous l'influence d'un fort aimant.

L'aimantation par influence explique la formation des houppes de limaille qui s'attachent aux pôles des aimants (fig. 542). Les parcelles en contact avec l'aimant, devenant autant de petits aimants, agissent par influence sur les parcelles voisines, celles-ci sur les suivantes, et ainsi de suite; ce qui donne naissance à la disposition filamenteuse de la limaille.

C'est par le même effet que se produisent les *fantômes magnétiques*. On nomme ainsi la disposition en courbes symétriques que prend la limaille de fer sous l'influence d'un barreau aimanté (fig. 546). Pour obtenir ces courbes, on applique sur un barreau disposé horizontalement une feuille de carton mince, sur laquelle, à l'aide d'un petit tamis, on fait tomber de la limaille de fer. Celle-ci, surtout si l'on frappe doucement sur le carton,

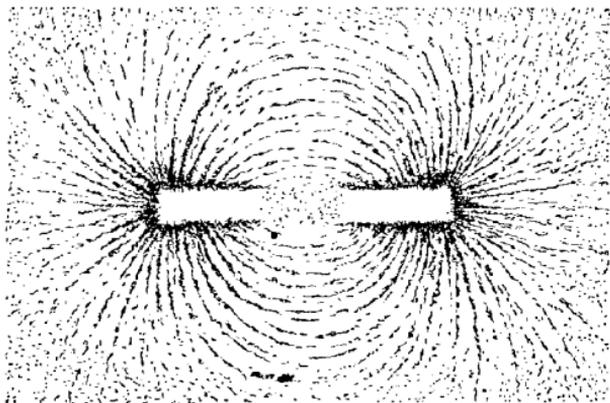


Fig. 546.

se dispose, sous l'influence des pôles de l'aimant, en courbes régulières, allant d'un pôle à l'autre, puis changeant de direction aux extrémités du barreau, comme vers un autre pôle dans l'espace.

Ce sont ces courbes qui ont donné à Faraday l'idée de ce qu'il a appelé *lignes de force*, lignes qu'il supposait traverser l'espace, et à l'aide desquelles il expliquait les attractions et les répulsions magnétiques et électriques, et même l'attraction universelle.

659. **Force coercitive.** — On nomme *force coercitive* la force plus ou moins intense qui, dans une substance magnétique, s'oppose à l'orientation des courants d'Ampère, ou, quand ils ont été orientés, à leur retour à leur direction primitive. D'après l'expérience ci-dessus, cette force est nulle dans le fer doux, puisque ce métal s'aimante instantanément par l'influence d'un aimant. Dans l'acier trempé, cette force est grande, et l'est d'autant plus, que la trempe est plus forte. En effet, mis en contact avec un aimant, un barreau d'acier ne s'aimante que lentement; il est même nécessaire de le frictionner avec l'un des pôles de l'aimant, si l'on veut lui faire acquérir toute sa force. L'orientation des courants

d'Ampère éprouve donc ici une résistance qui ne se rencontre pas dans le fer doux. Il en est de même de leur retour à leur première direction; car un barreau d'acier, une fois aimanté, ne perd que difficilement ses propriétés magnétiques. On verra bientôt que par l'oxydation, la pression ou la torsion, le fer doux peut acquérir une force coercitive, mais peu durable.

660. **Expérience des aimants brisés.** — La présence des courants d'Ampère dans toutes les parties d'un aimant se démontre par l'expérience suivante. On prend une aiguille à tricoter d'acier; on l'aimante en opérant des frictions avec le pôle d'un aimant, puis, ayant constaté l'existence des deux pôles et de la ligne neutre en plongeant l'aiguille dans de la limaille de fer, on la casse en son milieu, c'est-à-dire dans la direction de sa ligne neutre. Or, en présentant successivement les deux moitiés aux pôles d'une aiguille mobile (fig. 543), on remarque qu'au lieu de ne contenir qu'un pôle, elles ont chacune deux pôles contraires et une ligne neutre. Si l'on brise de même ces nouveaux aimants en deux parties, on trouve encore que chacune d'elles est un aimant complet; et ainsi de suite aussi loin qu'on peut continuer la division.

661. **Action des aimants sur tous les corps; corps diamagnétiques.** — Coulomb, en 1802, observa que les aimants agissent sur tous les corps à des degrés plus ou moins marqués; phénomène qu'il constata en faisant osciller de petits barreaux de différentes substances entre les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, puis loin de l'influence de tout aimant, et en comparant les nombres d'oscillations exécutés, dans les deux cas, en des temps égaux. On attribua d'abord ce phénomène à la présence de matières ferrugineuses dans les corps soumis à l'expérience; mais Lebaillif, Faraday et MM. Becquerel ont démontré que les aimants exercent réellement une action sur tous les corps, même sur les gaz. On a constaté de plus que cette action est tantôt attractive et tantôt répulsive: les corps attirés ont reçu le nom de *corps magnétiques*, et ceux qui sont repoussés celui de *corps diamagnétiques*. Parmi ces derniers sont le bismuth, le plomb, le soufre, la cire, l'eau, etc. Le cuivre est tantôt magnétique, tantôt diamagnétique, ce qui tient probablement à son degré de pureté.

Faraday, en 1847, avait reconnu que les aimants puissants exercent sur les flammes une action répulsive qu'il a attribuée à une différence de diamagnétisme entre les gaz. Depuis, M. Ed. Becquerel a constaté que, de tous les gaz, c'est l'oxygène qui a la plus grande puissance magnétique, et qu'un mètre cube de ce gaz condensé agirait sur une aiguille aimantée comme 5^{gr},5 de fer.

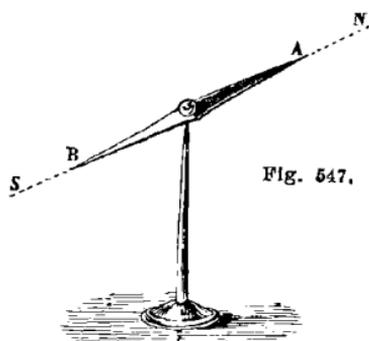
Quelques physiiciens ont regardé le diamagnétisme comme dis-

finct du magnétisme. M. Ed. Becquerel lie entre eux les phénomènes de magnétisme et de diamagnétisme en admettant 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 est due à ce que celles-ci sont entourées d'un milieu plus magnétique qu'elles, l'éther.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME TERRESTRE, BOUSSOLES

662. **Action directrice de la terre sur les aimants.** — Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée à un fil, comme le représente la figure 543, ou lorsqu'on la pose sur un pivot autour duquel elle



peut librement tourner (fig. 547), on observe que l'aiguille, au lieu de s'arrêter dans une position quelconque, finit toujours par se fixer dans une direction qui est, plus ou moins, celle du nord au sud. La même chose a lieu si, dans un vase plein d'eau, on pose un disque de liège, et sur celui-ci un barreau aimanté; le liège oscille d'abord, et lorsqu'il s'arrête la ligne droite qui joint les

deux pôles de l'aimant est encore plus ou moins dans la direction du nord au sud. Mais il est à observer que, dans cette expérience, le liège et le barreau n'avancent ni vers le nord ni vers le sud. La force qui agit ici sur les aimants n'est donc pas attractive, mais seulement directrice.

Des observations analogues ayant été faites sur tous les points du globe, on a assimilé la terre à un immense aimant dont les pôles seraient voisins des pôles terrestres, et dont la ligne neutre coïnciderait sensiblement avec l'équateur. Dans cette supposition, la terre agissant sur les aiguilles comme le ferait un aimant, les pôles de même nom se repoussent, et ceux de noms contraires s'attirent (654). C'est pourquoi, quand une aiguille aimantée se fixe dans la direction du nord au sud, le pôle qui regarde le nord se nomme *pôle austral*, et celui qui regarde le sud, *pôle boréal*.

Ampère a expliqué l'action magnétique de la terre en admettant

à sa surface l'existence de courants électriques dirigés de l'est à l'ouest parallèlement à l'équateur, hypothèse qui fait de la terre un véritable aimant (850).

663. **Couple magnétique terrestre.** — L'action magnétique de la terre sur une aiguille aimantée peut être comparée à un *couple*, c'est-à-dire à un système de deux forces égales, parallèles et de directions contraires, appliquées aux deux extrémités de l'aiguille. En effet, soit une aiguille ab mobile sur un pivot, et faisant un angle plus ou moins grand avec le méridien magnétique MM' (fig. 548). Le pôle boréal de la terre agissant par attraction sur le pôle austral a , et par répulsion sur le pôle boréal b , il en résulte deux forces contraires an et bs , parallèles au méridien magnétique, et égales; car le pôle terrestre est assez éloigné, et l'aiguille assez petite, pour qu'on puisse admettre que les directions an et bs sont parallèles, et que les pôles a et b de l'aiguille sont également distants du pôle boréal de la terre. Le pôle austral de celle-ci agissant de la même manière sur l'aiguille, il en résulte deux autres forces, encore égales entre elles et parallèles au méridien magnétique, l'une attractive dirigée suivant bs ,

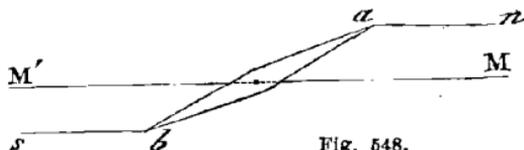


Fig. 548.

l'autre répulsive agissant suivant an . Or les deux forces appliquées en a s'ajoutent pour donner une résultante égale à leur somme; et comme il en est de même des deux forces appliquées en b , finalement l'aiguille est soumise à l'action de deux forces égales, parallèles et contraires, tendant à la faire tourner dans le même sens. Ce sont ces forces qui constituent le *couple magnétique terrestre*; et c'est ce couple qui fait tourner l'aiguille jusqu'à ce qu'elle s'arrête dans le méridien magnétique, position où les forces appliquées en a et b se font équilibre.

664. **Méridien magnétique, déclinaison.** — On sait que le *méridien astronomique* d'un point de la surface du globe est le plan qui passe par ce point et par les deux pôles terrestres, et que la *méridienne* est la trace de ce plan sur la surface du globe. De même, on appelle *méridien magnétique* d'un lieu donné le plan vertical qui passe en ce lieu par les deux pôles d'une aiguille aimantée mobile, en équilibre sur un axe vertical.

Le méridien magnétique ne coïncidant pas, en général, avec le méridien astronomique, on nomme *déclinaison de l'aiguille ai-*

mantée en un lieu l'angle que fait, en ce lieu, le méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que fait l'aiguille avec la méridienne. La déclinaison est *orientale* ou *occidentale*, selon que le pôle austral de l'aiguille se place à l'est ou à l'ouest du méridien astronomique.

665. **Variations de la déclinaison.** — La déclinaison de l'aiguille aimantée, très-variable d'un lieu à un autre, est occidentale en Europe et en Afrique, orientale en Asie et dans les deux Amériques. De plus, dans un même lieu, elle présente de nombreuses variations : les unes, qu'on peut considérer comme régulières, sont séculaires, annuelles ou diurnes; les autres, qui sont irrégulières, se désignent sous le nom de *perturbations*.

Variations séculaires. — Pour un même lieu, la déclinaison varie avec le temps, et l'aiguille paraît faire, à l'est et à l'ouest du méridien astronomique, des oscillations dont la durée est de plusieurs siècles. On connaît la déclinaison, à Paris, depuis 1580. Le tableau suivant représente les variations qu'elle a subies :

Années.	Déclinaison.	Années.	Déclinaison.
1580	11° 30' à l'est.	1825	22° 19' à l'ouest.
1666	0	1835	22 4 —
1700	8 12 à l'ouest.	1850	20 31 —
1780	20 35 —	1854	20 10 —
1790	22 00 —	1860	19 22 —
1814	22 34 —	1875 (15 juin). 17 21,2 —	

Ce tableau montre que, depuis 1580, la déclinaison a varié, à Paris, de plus de 34 degrés, et que le maximum de déviation occidentale a eu lieu en 1814; depuis, l'aiguille revient vers l'orient.

Variations annuelles. — Les variations annuelles ont été signalées par Cassini, qui a observé, en 1784, que, de l'équinoxe du printemps au solstice d'été, l'aiguille, à Paris, rétrogradait vers l'est, et qu'au contraire elle avançait vers l'ouest dans les neuf mois suivants. Le maximum de variation observé pendant la même année a été de 20 minutes. Du reste, les variations annuelles sont fort peu connues et ne paraissent pas constantes.

Variations diurnes. — Outre les variations séculaires et annuelles, la déclinaison éprouve des variations diurnes qui sont très-faibles et qu'on ne peut observer que sur de longues aiguilles et à l'aide d'instruments très-sensibles. Dans nos climats, l'extrémité nord de l'aiguille marche tous les jours de l'est à l'ouest, depuis le lever du soleil jusque vers une heure après midi. Elle 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. La nuit, l'aiguille ne présente

que peu de variations, mais subit cependant de nouveau un très-faible déplacement vers l'ouest.

A Paris, l'amplitude moyenne de la variation diurne est, pour avril, mai, juin, juillet, août et septembre, de 13 à 15 minutes, et, pour les autres mois, de 8 à 10 minutes. Il y a des jours où elle s'élève à 25 minutes, et d'autres où elle ne dépasse pas 5 minutes. Le maximum de déviation n'a pas lieu partout à la même heure. L'amplitude des variations diurnes décroît des pôles vers l'équateur, où elle est très-faible. Près de l'équateur, il existe une ligne sans variation diurne.

Variations accidentelles, ou perturbations. — La déclinaison de l'aiguille aimantée est troublée dans ses variations diurnes par plusieurs causes, telles que les aurores boréales, les éruptions volcaniques, la chute de la foudre. L'effet des aurores boréales se fait sentir à de grandes distances. Des aurores qui ne sont visibles que dans le nord de l'Europe, agissent encore sur l'aiguille, à Paris, où l'on a observé des variations accidentelles de 20 minutes. Dans les régions polaires, l'aiguille oscille quelquefois de plusieurs degrés. Sa marche, irrégulière pendant toute la journée qui précède l'aurore boréale, sert de présage au phénomène.

666. **Boussole de déclinaison.** — La *boussole de déclinaison* est un instrument qui sert à mesurer la déclinaison magnétique en un lieu, quand on connaît le méridien astronomique de ce lieu. Elle se compose d'une boîte de cuivre rouge AB (fig. 549), au centre de laquelle est une aiguille aimantée *ab*, mobile sur un pivot. A la paroi de la boîte sont appliqués deux montants qui supportent un axe horizontal X, sur lequel est fixée une lunette astronomique L, mobile dans un plan vertical. La boîte AB est soutenue par un pied P sur lequel elle tourne librement dans le sens horizontal, entraînant la lunette dans son mouvement. Un cercle fixe QR, qu'on nomme *cercle azimutal*, sert à mesurer le nombre de degrés dont la lunette a tourné, au moyen d'un vernier V fixé à la boîte. Enfin, l'inclinaison de la lunette, par rapport à l'horizon, se mesure par un vernier K, qui reçoit son mouvement de l'axe de la lunette, et se déplace sur un arc de cercle gradué et fixe α .

Le méridien astronomique d'un lieu étant connu, pour déterminer la déclinaison en ce lieu, on commence par disposer la boussole bien horizontalement, au moyen de vis calantes S, S', et d'un niveau *n*; puis on amène la lunette dans le plan du méridien astronomique, et on note la position du vernier sur le limbe PQ. Faisant ensuite tourner la boîte AB jusqu'à ce que le pôle nord de l'aiguille vienne exactement en regard d'un repère tracé sur la paroi, dans le plan vertical de la lunette, l'arc dont a tourné

le vernier sur le limbe donne la déclinaison, occidentale ou orientale suivant le sens de la rotation.

Si le méridien astronomique du lieu n'est pas connu, on peut le déterminer à l'aide de la boussole même. Pour cela, on fait

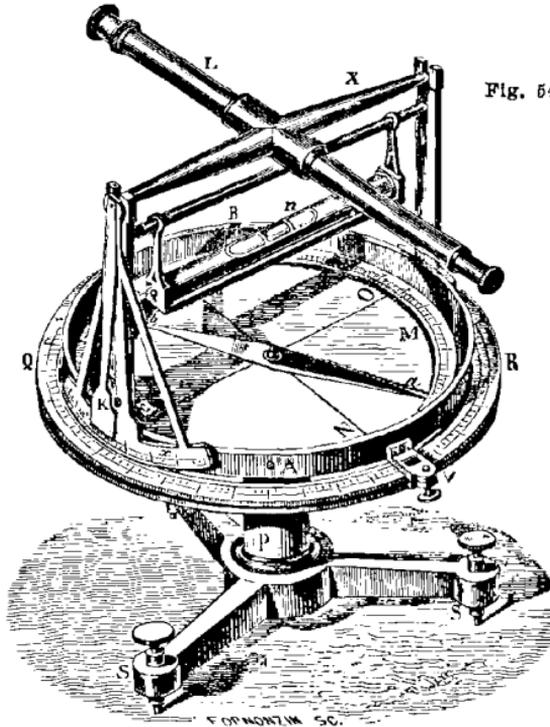


Fig. 549.

usage du cercle azimutal QR et de l'arc de cercle x , et observant avec la lunette un astre connu, avant et après son passage au méridien, on emploie la *méthode des hauteurs égales*, décrite dans les traités de cosmographie pour déterminer la méridienne.

667. Méthode du retournement. — Les indications de la boussole de déclinaison ne sont exactes qu'autant que l'axe magnétique de l'aiguille, c'est-à-dire la droite qui passe par ses deux pôles, coïncide avec l'axe de figure, c'est-à-dire avec la droite qui joint ses deux extrémités. En général, cette condition n'est pas satisfaite. On corrige cette cause d'erreur par la méthode du retournement. Pour cela, l'aiguille n'est pas fixée à sa chape, mais lui est seulement superposée, afin qu'on puisse l'enlever et, après l'avoir retournée, la remettre en place. La moyenne entre la déclinaison

que marque alors l'aiguille et celle qu'elle marquait d'abord est la déclinaison exacte. En effet, le diamètre NS étant orienté suivant le méridien astronomique, soient ab la direction de l'axe de figure de l'aiguille, et mn celle de son axe magnétique (fig. 550). La véritable déclinaison n'est pas mesurée par l'arc Na , mais par l'arc Nm , qui est plus grand. Si actuellement on retourne l'aiguille, la ligne mn fait toujours le même angle avec le méridien NS; mais l'extrémité nord de l'aiguille, qui était à droite de mn , passe à gauche (fig. 551), en sorte que la déclinaison, qui était

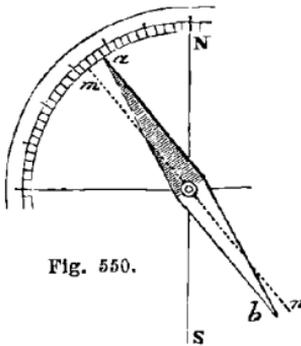


Fig. 550.

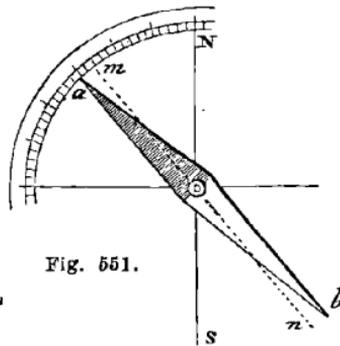


Fig. 551.

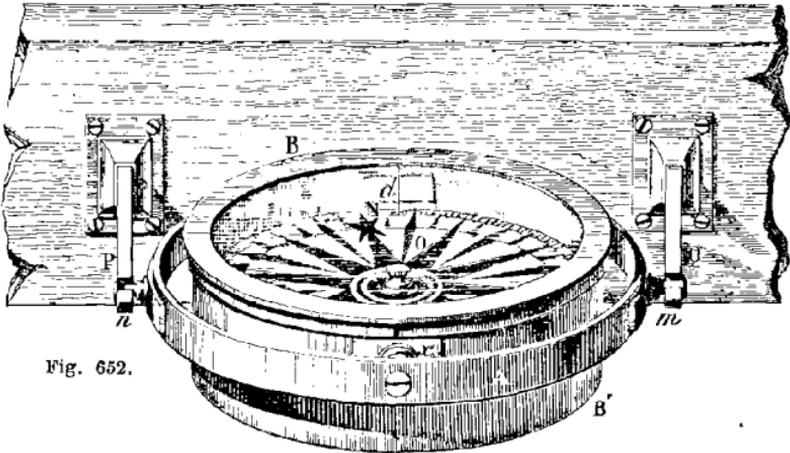
trop petite d'une certaine quantité, devient trop grande précisément de la même quantité. La déclinaison vraie est donc la moyenne entre les deux déclinaisons observées.

668. **Boussole marine.** — L'action directrice de la terre sur l'aiguille aimantée a reçu une importante application dans la *boussole marine*, connue aussi sous les noms de *compas de variation* et de *compas de mer*. C'est une boussole de déclinaison destinée à diriger la marche des navires sur mer. La figure 552 en donne une vue d'ensemble, et la figure 553 une coupe verticale. Elle consiste en une boîte cylindrique de cuivre BB' supportée, à l'aide de deux axes rectangulaires, par la double suspension de Cardan, déjà décrite en parlant du baromètre (fig. 110). La boussole, qui est lestée à la partie inférieure avec une masse de plomb, conserve ainsi la position horizontale malgré le roulis et le tangage du navire.

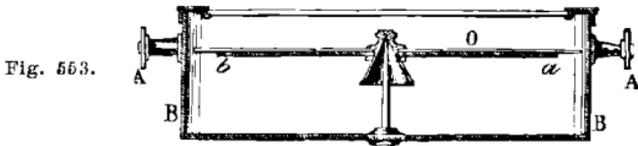
Au fond de la boîte est un pivot sur lequel est posé, au moyen d'une chape, un barreau aimanté ab (fig. 553), qui est l'aiguille de la boussole. Sur ce barreau est fixé un disque de mica, d'un diamètre un peu plus grand que la longueur du barreau, et sur le mica est collé un disque de papier O , sur lequel est tracée une étoile ou *rose* à 32 branches, marquant les 8 rumbes de vents, les demi-rumbes et les quarts. La branche terminée par une petite

étoile et désignée par N correspond au barreau *ab* qui est sous le disque, et marque le méridien magnétique.

La boussole est placée à l'arrière des vaisseaux dans l'*habitacle*. Pour l'appliquer à diriger un navire, on cherche d'abord, sur une



carte marine, suivant quel rumb de vent le vaisseau doit être dirigé pour se rendre à sa destination. Alors, l'œil fixé sur la boussole, le timonier tourne la barre du gouvernail jusqu'à ce que le rumb déterminé, marqué sur la rose, vienne coïncider avec une *ligne de foi*, passant par un trait *d* marqué sur la paroi intérieure de la boîte *BB'*, et dirigé dans le sens de la quille du vaisseau.



Toutefois les variations qu'éprouve la déclinaison sur les différents points du globe obligent les navigateurs à corriger continuellement les observations qu'ils font avec la boussole.

On ne connaît point l'inventeur de la boussole, ni l'époque précise de son invention. Guyot de Provins, poète français du XIII^e siècle, parle, le premier, de l'usage de l'aimant pour la navigation. Les anciens navigateurs, qui ne connaissaient pas la boussole, n'avaient pour guide que le soleil ou l'étoile polaire; aussi étaient-ils obligés de naviguer constamment en vue des côtes.

669. **Inclinaison, équateur magnétique.** — D'après la direction

vers le nord qu'affecte la boussole de déclinaison, on pourrait penser que la force qui la sollicite vient d'un point de l'horizon. Mais il n'en est pas ainsi; car si l'on dispose l'aiguille de manière qu'elle puisse se mouvoir librement dans un plan vertical, autour d'un axe horizontal, on observe que, quoique le centre de gravité de l'aiguille coïncide exactement avec l'axe de suspension, son pôle austral, dans notre hémisphère, incline constamment vers le pôle boréal de la terre. Dans l'autre hémisphère, c'est le pôle boréal de l'aiguille qui incline vers le pôle austral du globe.

Quand le plan vertical dans lequel se meut l'aiguille coïncide avec le méridien magnétique, on nomme *inclinaison* l'angle qu'elle fait avec l'horizon. Dans un autre plan que le méridien magnétique, l'inclinaison augmente, et elle est de 90 degrés dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. En effet, l'action magnétique de la terre se décomposant alors en deux forces, l'une verticale, l'autre horizontale, la première fait prendre à l'aiguille sa position verticale, tandis que la seconde, agissant dans la direction de l'axe de suspension, est détruite.

L'inclinaison, de même que la déclinaison, varie d'un lieu à un autre, mais suivant une loi mieux déterminée. On observe, en effet, vers le pôle boréal de la terre, des points où l'inclinaison est de 90 degrés; puis, à partir de là, elle décroît avec la latitude jusqu'à l'équateur, où elle est nulle, tantôt sur ce cercle même, tantôt en des points qui en sont peu distants. Dans l'hémisphère austral l'inclinaison reparaît, mais en sens contraire; car c'est le pôle boréal de l'aiguille qui s'abaisse au-dessous de l'horizon.

On nomme *équateur magnétique* la courbe qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle, et *pôles magnétiques* les points où l'inclinaison est de 90 degrés. D'après les observations de Duperrey, l'équateur magnétique coupe l'équateur terrestre en deux points presque diamétralement opposés, l'un dans le grand Océan, l'autre dans l'Océan Atlantique. Ces points paraissent animés d'un mouvement de translation d'orient en occident. Quant aux pôles magnétiques, il en existe deux, l'un dans l'hémisphère boréal, près de l'île Melvil; l'autre dans l'hémisphère austral, sur la terre Victoria, à l'ouest du volcan Erebus; mais la position de ces points varie avec celle de l'équateur magnétique.

L'inclinaison varie aussi dans un même lieu, d'une époque à une autre. En 1671, elle était, à Paris, de 75 degrés. Depuis elle a toujours été en décroissant; d'après les observations faites à l'Observatoire de Montsouris, l'inclinaison était de 65° 34',6, le 30 septembre 1873. Depuis vingt-cinq ans, elle a diminué en moyenne de 3',3 par année.

670. **Boussole d'inclinaison.** — On nomme *boussole d'inclinaison* un instrument qui sert à mesurer l'inclinaison magnétique. Cette boussole, toute de cuivre, se compose d'abord d'un cercle horizontal *m*, gradué et porté sur trois vis calantes (fig. 554). Au-dessus de ce cercle est un plateau *A*, mobile autour d'un axe vertical, et portant, à l'aide de deux colonnes, un second cercle gradué

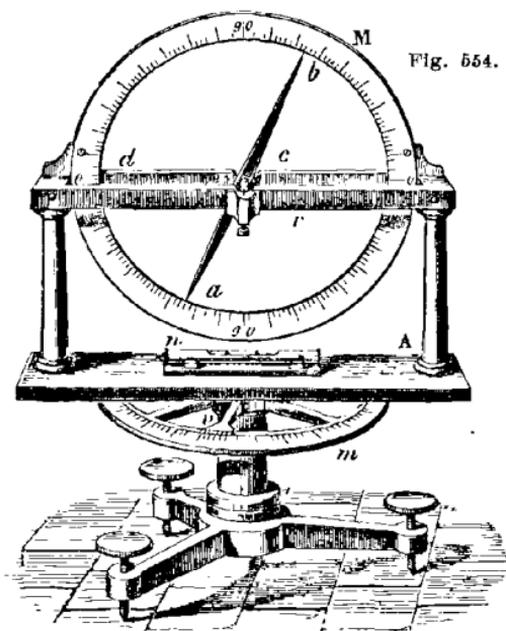


Fig. 554.

M, qui mesure l'inclinaison; un châssis *r* soutient l'aiguille *ab*, et un niveau *n* sert, au moyen des trois vis calantes, à placer horizontalement le diamètre qui passe par les deux zéros du cercle *M*.

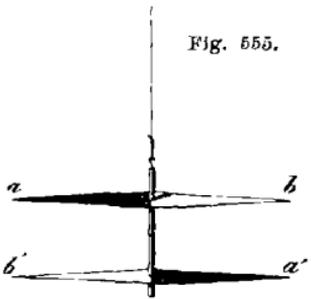
Pour observer l'inclinaison, on commence par déterminer le méridien magnétique, ce qui se fait en tournant le plateau *A* sur le cercle *m* jusqu'à ce que l'aiguille devienne verticale, position qu'elle prend lorsqu'elle est dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique (669). Tournant ensuite le plateau *A* de 90° sur le cercle *m*, on amène le cercle vertical *M* dans le méridien magnétique. L'angle *dca* que fait alors l'aiguille *ab* avec le diamètre horizontal, est l'angle d'inclinaison.

Toutefois il y a ici deux causes d'erreur dont il importe de tenir compte. 1^o L'axe magnétique de l'aiguille peut ne pas coïncider avec son axe de figure; de là une erreur qu'on corrige par la méthode du retournement, de même que pour la boussole de déclinaison.

naison (667). 2° Le centre de gravité de l'aiguille peut ne pas coïncider avec l'axe de suspension, et alors l'angle dca est trop petit ou trop grand, selon que le centre de gravité est au-dessus ou au-dessous du centre de suspension; car, dans le premier cas, l'action de la pesanteur est contraire à celle du magnétisme terrestre pour faire incliner l'aiguille, tandis que dans le second elle est de même sens. On corrige cette erreur en renversant les pôles de l'aiguille; ce qui s'obtient en faisant des frictions avec les pôles contraires de deux barreaux, de manière que chaque pôle de l'aiguille soit frotté par un pôle de même nom que lui. La direction de l'aiguille changeant alors de sens, si son centre de gravité était au-dessus du point de suspension, il est actuellement au-dessous, et l'angle d'inclinaison, qui était trop petit, devient trop grand. On aura donc sa vraie valeur en prenant la moyenne arithmétique entre les résultats obtenus dans les quatre observations.

671. **Aiguille et système astatiques.** — On nomme *aiguille astatique* celle qui est soustraite à l'action magnétique de la terre. Telle serait une aiguille mobile autour d'un axe situé dans le plan du méridien magnétique, parallèlement à l'inclinaison; car le couple magnétique terrestre, agissant alors suivant l'axe, ne peut imprimer à l'aiguille aucune direction déterminée.

Un *système astatique* est l'ensemble de deux aiguilles de même force, réunies parallèlement, les pôles contraires en regard, comme le montre la figure 555. Si les deux aiguilles sont rigoureusement de même force, les actions contraires du globe sur les pôles a' et b , ainsi que sur les pôles a et b' , se détruisent, et le système est complètement astatique. On verra, dans le galvanomètre, une application importante du système magnétique astatique.



CHAPITRE III

AIMANTATION, LOI DES ACTIONS MAGNÉTIQUES

672. **Sources d'aimantation, saturation, intensité.** — Les diverses sources d'aimantation sont les aimants puissants, le magnétisme terrestre et l'électricité. Nous ne ferons connaître que plus tard cette dernière source d'aimantation; quant à l'aimantation par les

aimants, elle s'opère par trois méthodes : celle de la simple touche, celle de la touche séparée et celle de la double touche.

Quelle que soit celle de ces trois méthodes dont on se serve pour aimanter un barreau d'acier, il y a une limite à la puissance magnétique que celui-ci peut acquérir, limite qui dépend de son degré de trempe et de la force des aimants qui servent à l'aimantation. On exprime que cette limite est atteinte en disant que le barreau est aimanté à *saturation*. Lorsque le point de saturation a été dépassé, le barreau y revient bientôt, et tend même à descendre au-dessous, si l'on n'entretient pas sa force magnétique à l'aide d'armures, comme on le verra ci-après (677).

L'expérience a appris qu'un aimant étant aimanté à saturation, *sa force est proportionnelle à la racine cubique du carré de son poids*. Cette loi est connue sous le nom de *loi de Haecker*, mais elle avait été trouvée par Daniel Bernoulli dès 1758.

673. Méthode de la simple touche. — Cette méthode consiste à faire glisser le pôle d'un fort aimant d'un bout à l'autre du barreau qu'on veut aimanter, et à répéter plusieurs fois les frictions, toujours dans le même sens. Les courants d'Ampère (656) sont ainsi orientés successivement dans toute la longueur du barreau, et la dernière extrémité que touche l'aimant mobile présente un pôle contraire à celui avec lequel on a fait les frictions. Ce procédé n'a qu'une faible puissance d'aimantation, d'où il résulte qu'il ne peut être appliqué qu'à de petits barreaux; de plus, il développe fréquemment des points consécutifs (653).

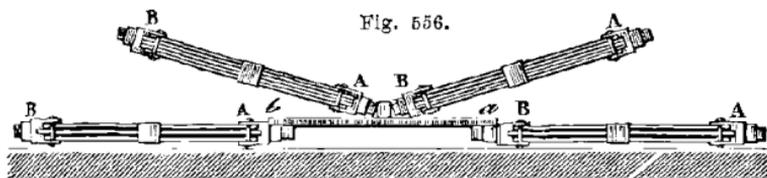
674. Méthode de la touche séparée. — La méthode de la touche séparée, adoptée par Knight, en Angleterre, en 1745, consiste à placer les deux pôles contraires de deux barreaux d'égale force au milieu du barreau à aimanter, et à les faire glisser simultanément chacun vers un des bouts du barreau, en les tenant verticalement. On rapporte ensuite chaque aimant vers le milieu du barreau, et l'on recommence de la même manière. Après plusieurs frictions semblables sur les deux faces, le barreau est aimanté.

Dubamel a perfectionné cette méthode en plaçant les deux bouts du barreau à aimanter sur les pôles contraires de deux aimants fixes, dont l'action concourt avec celle des aimants mobiles qui servent à opérer les frictions, la position relative des pôles étant la même que dans la figure 556.

675. Méthode de la double touche. — Dans la méthode de la double touche, due à Mitchell, les deux aimants qui servent à opérer les frictions sont encore placés au milieu du barreau à aimanter, leurs pôles contraires en regard; mais, au lieu de glisser en sens contraires vers ses extrémités, ils sont maintenus à un intervalle

fixe au moyen d'une petite pièce de bois placée entre eux (fig. 556), et glissent ensemble du milieu à une extrémité, puis de celle-ci à l'autre extrémité, et ainsi de suite, de manière que chaque moitié du barreau reçoive le même nombre de frictions.

Epinus, en 1758, perfectionna cette méthode en plaçant, comme dans le procédé de la touche séparée, deux forts barreaux sous celui qu'on veut aimanter, et en inclinant les barreaux mobiles



d'un angle de 15 à 20 degrés (fig. 556). On aimante ainsi de forts barreaux; mais on obtient souvent des points conséquents.

676. **Aimantation par l'action de la terre.** — L'action de la terre sur les substances magnétiques étant comparable à celle des aimants, le magnétisme terrestre tend constamment à orienter les courants d'Ampère dans le fer et dans l'acier. Dans ce dernier, la force coercitive étant très-grande, l'action de la terre est insuffisante pour produire l'aimantation, du moins instantanément. Il n'en est plus de même sur une barre de fer doux, surtout si on la place dans le méridien magnétique parallèlement à l'inclinaison. Toutefois on n'a ainsi qu'une aimantation instable; car si l'on retourne la barre, les pôles sont aussitôt intervertis, la force coercitive du fer doux étant nulle.

Pendant on parvient à donner au fer doux une force coercitive sensible, si, tandis qu'il est sous l'influence de la terre et dans la direction indiquée ci-dessus, on le soumet à une forte torsion, ou si on le bat à froid sur une enclume, à coups de marteau. Mais la force coercitive ainsi développée est faible et se perd bientôt complètement, ce qui n'a pas lieu pour l'acier.

C'est par l'influence prolongée du magnétisme terrestre qu'on explique la formation des aimants naturels, ainsi que l'aimantation qu'on observe fréquemment dans les vieux objets d'acier ou de fer; car les fers ordinaires du commerce, qui ne sont pas purs, possèdent une faible force coercitive: il en résulte qu'ils présentent presque toujours des traces d'aimantation, ainsi que cela s'observe dans les clous, les pelles, les pinces, etc. La fonte a une grande force coercitive et s'aimante très-bien.

677. **Faisceaux magnétiques, armure des aimants.** — Un *faisceau magnétique* est un ensemble de barreaux aimantés réunis

parallèlement par leurs pôles de même nom. Tantôt on leur donne une forme de fer à cheval (fig. 557), tantôt une forme rectiligne (fig. 558). Le faisceau représenté dans la figure 557 est formé de

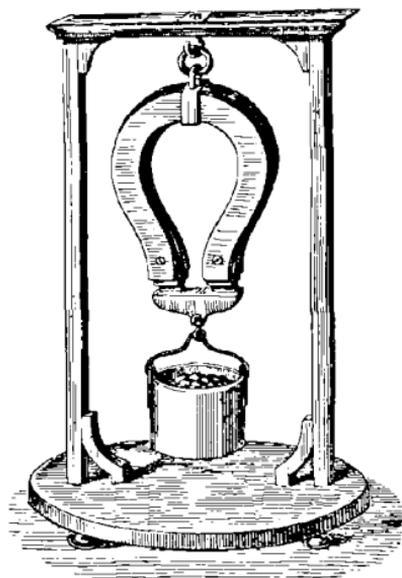


Fig. 557.

5 lames d'acier juxtaposées. Celui de la figure 558 se compose de 12 lames disposées en trois couches de 4 lames chacune. La forme de fer à cheval est préférable pour faire porter un poids à l'aimant, car les deux pôles sont utilisés en même temps. Dans les deux espèces de faisceaux, les lames sont trempées et aimantées séparément, puis superposées et réunies par des vis de fer, ou par des viroles de laiton.

La force d'un faisceau n'est pas égale à la somme des forces de chaque bagreau, ce qui provient des actions répulsives qu'exercent les uns sur les autres les pôles voisins; on augmente la force d'un faisceau en faisant les

lames latérales plus courtes de 1 à 2 centimètres que la lame du milieu (fig. 557 et 558). On nomme *armures* des pièces de fer doux A et B (fig. 558), qu'on

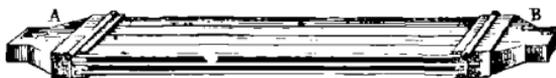


Fig. 558 ($l = 45$).

met en contact avec les pôles pour conserver leur magnétisme, et même pour l'augmenter, par suite d'une action par influence.

La figure 559 représente, avec ses armures, une pierre d'aimant naturel; sur les faces qui correspondent aux pôles sont deux lames de fer doux, terminées chacune par un talon massif. Sous l'influence de l'aimant naturel, ces lames s'aimantent, et les lettres A et B représentant le lieu des pôles de l'aimant naturel, il est facile de voir que les pôles des armures le sont respectivement par les lettres *a* et *b*. Or ces armures, une fois aimantées, réagissent à leur tour sur les courants particuliers de l'aimant naturel, les

orientent avec plus de force et accroissent ainsi sa puissance magnétique. Sans armure, les aimants naturels sont très-faibles; mais, armés, ils deviennent capables de porter des poids qui augmentent progressivement jusqu'à une certaine limite qu'ils ne peuvent dépasser.

Le *portant a'b'*, qui est de fer doux, fait lui-même l'office d'une deuxième armure; car, s'aimantant par influence, ses pôles *a'* et *b'* réagissent sur les pôles *a* et *b* de la première.

Pour armer les aimants artificiels, on les dispose par paire, comme le représente la figure 560, en plaçant en regard les pôles contraires, puis on ferme le circuit avec deux petits barreaux de fer doux AB; ceux-ci s'aimantant par influence, leurs pôles réagissent sur les barreaux aimantés pour leur conserver leur force magnétique. Quant aux aiguilles mobiles (fig. 547), comme elles se dirigent vers les pôles magnétiques du globe, l'influence de celui-ci leur tient lieu d'armure.

Les faisceaux magnétiques construits jusqu'ici ne portaient que quatre à cinq fois leur poids. En substituant aux lames d'acier épaisses dont on faisait usage, des lames très-minces, aimantées à saturation, et superposées en nombre suffisant, M. Jamin obtient des faisceaux qui portent quinze fois leur poids; ce qui est un progrès considérable pour



Fig. 559.

Fig. 560 ($l=40$).

les applications du magnétisme. Un de ces faisceaux est représenté dans la machine magnéto-électrique de Gramme (fig. 778).

* 678. *Loi des attractions et des répulsions magnétiques.* — Coulomb, le premier, a constaté cette loi, que les attractions et les répulsions magnétiques s'exercent en raison inverse du carré de la distance, et il l'a démontrée par deux méthodes, celle de la balance de torsion et celle des oscillations.

1^o *Méthode de la balance de torsion.* — La balance de torsion consiste en une cage de verre (fig. 561), recouverte d'une glace qu'on enlève à volonté, et qui est percée, près des bords, d'une ouverture destinée à introduire un aimant A. Au centre de cette même glace est une seconde ouverture à laquelle est adapté un tube de verre, qui peut tourner à frottement doux sur les bords de l'orifice. Ce tube porte à sa partie supérieure un micromètre. On nomme ainsi un sys-

tème de deux pièces, dont l'une *e*, qui est fixe, est divisée sur son contour en 360 degrés, et l'autre *d*, qui est mobile, porte un point de repère qui indique de combien de degrés on fait tourner cette pièce *d* sur la pièce graduée *e*. A gauche du dessin, en E et en D, sont représentées sur une plus grande échelle les deux pièces du micromètre. Au disque D sont fixés deux montants traversés par un axe horizontal sur lequel s'enroule un fil d'argent très-fin, qui soutient une aiguille aimantée *ab*. Enfin, sur une bande de papier collée sur la cage,

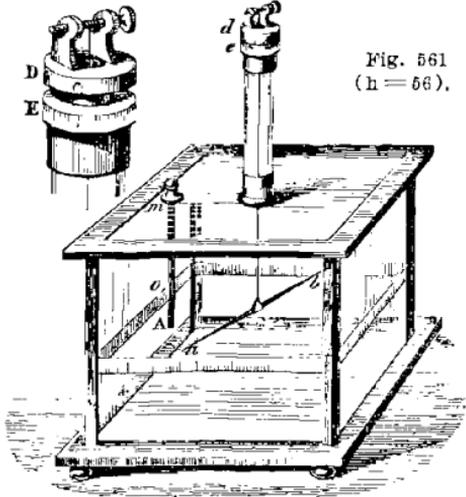


Fig. 561
($h = 56$).

sont tracées, à droite et à gauche du zéro *o*, des divisions qui servent à mesurer l'écart de l'aiguille *ab*, et, par suite, la torsion du fil d'argent.

Le trait de repère *c* du disque D étant au zéro du cercle gradué E, on commence par orienter la cage de manière que le fil qui supporte l'aiguille *ab* et le zéro tracé sur la bande de papier se trouvent dans le méridien magnétique; retirant alors l'aiguille de sa chape, on la remplace par une aiguille semblable, de cuivre, puis on tourne le tube de verre, et avec lui les pièces *e* et *d*, jusqu'à ce que cette aiguille vienne s'arrêter au zéro de la graduation. Le fil d'argent étant alors sans torsion et le barreau aimanté A n'étant pas encore en place,

on enlève l'aiguille de cuivre qui est dans la chape, et l'on y remet l'aiguille aimantée *ab*; celle-ci se trouve ainsi exactement dans le méridien magnétique, sans torsion du fil.

L'appareil ainsi disposé, il est nécessaire, avant d'introduire l'aimant A, de connaître l'action de la terre sur l'aiguille mobile *ab*, lorsque celle-ci dévie du méridien magnétique d'un certain nombre de degrés. Pour cela, on tourne la pièce D jusqu'à ce que l'aiguille *ab* se déplace de 1 degré dans le même sens. Le nombre de degrés moins un dont on a tourné le micromètre représente évidemment la torsion totale du fil. Dans les expériences de Coulomb, ce nombre était 35; mais il varie avec la longueur du fil, son diamètre et l'aimantation de l'aiguille *ab*. Or celle-ci demeurant actuellement en équilibre, il est évident que la force de torsion du fil est précisément égale et contraire à l'action directrice de la terre. Donc cette action, dans les expériences de Coulomb, était représentée par 35, pour une déviation de 1 degré; mais la force de torsion étant proportionnelle à l'angle de torsion ($71,2^\circ$), et l'action de la terre, une fois qu'il y a équilibre, lui étant égale, il en résulte que cette dernière force, pour des déviations de 2, 3 . . . degrés, est représentée par 2 fois, 3 fois 35.

L'action de la terre sur une déviée, on descend dans la cage l'aimant A, en ayant soin de placer en regard les pôles de même nom. Le pôle *a* de l'aiguille mobile est repoussé, et si l'on représente par *d* le nombre de degrés qui mesure l'angle d'écart quand l'aiguille *ab* est en équilibre, cette aiguille tend à revenir vers le méridien magnétique avec une force représentée par la somme $d + 35 \times d$, le terme *d* étant dû à la torsion du fil, et le terme $35 \times d$ à l'action de la terre; puisqu'elle n'y revient pas, il faut que la force répulsive qui s'exerce entre les pôles *a* et A soit elle-même égale à $d + 35 \times d$. Cela posé, on tourne le disque D

de manière que l'angle de déviation d devienne deux fois plus petit. D'après la position de l'aiguille ab , dans la figure ci-dessus, ce serait de gauche à droite qu'il faudrait tourner. En représentant par n la rotation du disque D , on voit que le fil de suspension est tordu, à son bout supérieur, de n degrés à droite, et à son bout inférieur de $\frac{d}{2}$ degrés à gauche; sa torsion est donc $n + \frac{d}{2}$. Par conséquent la force réelle qui tend à ramener l'aiguille vers le méridien magnétique est $\left(n + \frac{d}{2}\right) + 35 \times \frac{d}{2}$, le binôme $n + \frac{d}{2}$ représentant la force de torsion, et le terme $35 \times \frac{d}{2}$ l'action de la terre. Or, l'aiguille ne revenant pas vers le méridien, il faut que la force répulsive qui s'exerce entre les deux pôles a et A soit maintenant représentée par $\left(n + \frac{d}{2}\right) + 35 \times \frac{d}{2}$.

En effectuant les calculs, c'est-à-dire en remplaçant n et d par les nombres fournis par l'expérience, on trouve que la quantité $\left(n + \frac{d}{2}\right) + 35 \times \frac{d}{2}$ est précisément le quadruple de la quantité $d + 35 \times d$, obtenue dans la première expérience. La loi de Coulomb est donc démontrée, car on expérimente sur des arcs d et $\frac{d}{2}$ assez petits pour se confondre sensiblement avec leurs cordes, c'est-à-dire que lorsque l'arc devient deux fois plus petit, il en est sensiblement de même de la distance aA des pôles.

2^o *Méthode des oscillations.* — Cette méthode consiste à faire osciller une aiguille aimantée pendant des temps égaux, d'abord sous l'influence seule de la terre, puis sous l'influence combinée de la terre et du pôle attractif d'un aimant placé successivement à deux distances inégales. Des trois nombres d'oscillations observés, on déduit ensuite par le calcul la loi de Coulomb.

679. *Intensité et distribution du magnétisme terrestre.* — Un grand nombre de physiciens et de navigateurs ont mesuré l'intensité magnétique du globe en différents lieux et à différentes époques. Plusieurs méthodes ont été adoptées, qui reviennent à faire osciller une aiguille d'inclinaison ou de déclinaison pendant un temps donné, et à déduire des nombres d'oscillations les intensités relatives. On a ainsi trouvé les lois suivantes sur l'intensité du magnétisme terrestre :

1^o Elle augmente à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur magnétique, et elle paraît être une fois et demie plus grande aux pôles que sur cette ligne; la ligne sans inclinaison est donc en même temps la ligne de moindre intensité.

2^o Elle décroît à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, et ce décroissement suit probablement la loi du rapport inverse du carré des distances.

3^o Elle varie avec les heures de la journée, et atteint son minimum entre dix et onze heures du matin, et son maximum entre quatre et cinq heures de l'après-midi.

4^o Enfin, elle présente des variations irrégulières, et, comme la déclinaison et l'inclinaison, elle éprouve des perturbations accidentelles par l'influence des aurores boréales.

On nomme *lignes isodynamiques* des lignes qui, sur la surface du globe, présentent en tous leurs points la même intensité magnétique; *lignes isogones*, celles qui présentent partout la même déclinaison, et *lignes isoclines*, celles d'égale inclinaison. Duperrey a construit neuf courbes isodynamiques au nord et autant au sud de l'équateur magnétique, et il a trouvé que ces lignes, par leur courbure et leur direction, ont une grande analogie avec les *lignes isothermes*, ou d'égale température.

LIVRE IX

ÉLECTRICITÉ A L'ÉTAT STATIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES FONDAMENTAUX

680. **Électricité, hypothèses sur sa nature.** — L'électricité est un agent physique puissant, dont la présence se manifeste par des attractions et des répulsions, par des apparences lumineuses, par des commotions violentes, par des décompositions chimiques et par un grand nombre d'autres phénomènes. Les causes qui développent de l'électricité sont le frottement, la pression, les actions chimiques, la chaleur, le magnétisme et l'électricité elle-même.

Thalès, 600 ans avant J.-C., avait déjà remarqué la propriété qu'a l'ambre jaune frotté d'attirer les corps légers. En parlant de cette substance, Pline dit : « Quand le frottement lui a donné la chaleur et la vie, elle attire les brins de paille, comme l'aimant attire le fer. » Mais là se bornèrent les connaissances des anciens sur l'électricité. Ce n'est qu'à la fin du xvi^e siècle que Gilbert, médecin de la reine Élisabeth, à Londres, appela de nouveau l'attention des physiciens sur les propriétés de l'ambre jaune, en faisant voir que beaucoup d'autres substances peuvent aussi acquérir la propriété attractive par le frottement. L'impulsion une fois donnée, les découvertes se succédèrent aussi nombreuses que rapides. Les savants qui, depuis Gilbert, ont surtout contribué aux progrès de l'électricité, sont Otto de Guericke, Dufay, Æpinus, Franklin, Coulomb, Volta, Davy, OErsted, Ampère, Schweigger, Seebeck, Faraday, de la Rive et M. Becquerel. C'est à ce dernier savant et à Davy qu'est due presque toute l'électro-chimie.

Malgré les nombreux travaux dont l'électricité a été l'objet, on ne connaît point la nature de cet agent; de même que pour la chaleur, la lumière et le magnétisme, les physiciens en sont réduits à des hypothèses. Newton pensait que la production de l'électricité était le résultat d'un principe éthéré mis en mouvement par les vibrations des molécules des corps. L'abbé Nollet, se fondant sur

les effets lumineux et calorifiques de l'électricité, la regardait comme une modification de la chaleur et de la lumière. Nous ferons connaître bientôt (687) la théorie de Symmer, dans laquelle on admet l'existence de deux fluides électriques; celle de Franklin, dans laquelle on n'en admet qu'un seul; et enfin, une théorie récente, qui est une modification de celle de Franklin.

681. Électricité statique et électricité dynamique. — Abstraction faite de toute hypothèse, l'étude de l'électricité se partage en deux grandes divisions, comprenant : l'une, les phénomènes que présente l'*électricité statique* ou en repos; l'autre, ceux que présente l'*électricité dynamique* ou en mouvement. A l'état statique, l'électricité a surtout pour cause le frottement; elle s'accumule alors à la surface des corps et s'y maintient en équilibre à un état de *tension* qui se manifeste par des attractions et par des étincelles. A l'état dynamique, l'électricité résulte principalement d'actions chimiques, et traverse les corps sous forme de *courants*, avec une vitesse comparable à celle de la lumière. Elle se distingue alors de l'électricité statique particulièrement par des phénomènes chimiques et par ses rapports avec le magnétisme.

Nous traiterons d'abord de l'électricité statique, en considérant plus particulièrement celle qui est développée par le frottement, et nous dirons qu'un corps est *électrisé* quand il possède la propriété d'attirer les corps légers, ou de produire des effets lumineux.

682. Développement de l'électricité par le frottement. — Un grand nombre de substances, quand on les frotte avec un morceau de drap ou avec une peau de chat, acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, comme les barbes de plume, les brins de paille. Cette propriété se remarque surtout dans l'ambre jaune, la cire à cacheter, la résine, la gutta-percha, le soufre, le verre, la soie, le caoutchouc durci (ou *ébonite*).

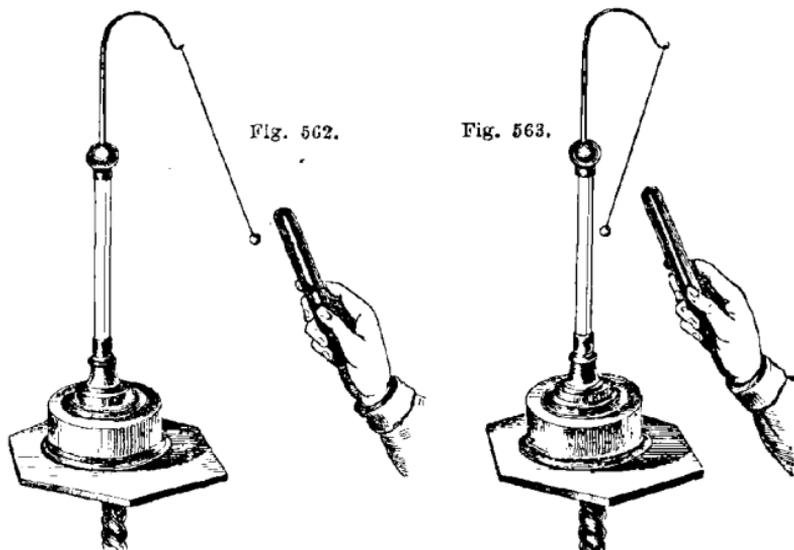
Un corps solide peut aussi s'électriser par le frottement avec un liquide ou un gaz : dans le vide barométrique, le mouvement du mercure électrise le verre; un tube vide d'air, dans lequel on a renfermé quelques globules de mercure, devient lumineux dans l'obscurité lorsqu'on agite le mercure. Quant aux gaz, Wilson avait trouvé qu'un courant d'air dirigé sur une tourmaline, du verre, de la résine, électrisait ces substances; mais Faraday a reconnu depuis qu'il n'y a d'effet électrique qu'autant que l'air est humide ou tient en suspension des poudres sèches.

Le frottement ne paraît pas d'abord développer l'électricité sur plusieurs substances, particulièrement sur les métaux; car, tenant d'une main une barre de métal, si on la frotte avec un morceau de drap, on ne remarque aucune trace d'attraction lorsqu'on

la présente au pendule électrique (683). Il ne faudrait pas en conclure que les métaux ne s'électrisent point par le frottement; c'est là, en effet, une propriété générale pour tous les corps, mais qui ne se manifeste pour beaucoup d'entre eux qu'autant qu'ils sont placés dans des conditions convenables (685).

On ignore la cause du développement de l'électricité par le frottement. Wollaston l'a attribué à une oxydation; mais Gray avait fait voir avant lui que le frottement développe de l'électricité dans le vide, et Gay-Lussac a reconnu qu'il peut aussi en développer dans l'acide carbonique sec.

683. **Pendule électrique.** — On reconnaît qu'un corps est électrisé au moyen de petits instruments qu'on nomme *électroscopes*,



et dont le plus simple est le *pendule électrique* (fig. 562). Il consiste en une petite balle de moelle de sureau suspendue, par un fil de soie, à un support à pied de verre. Lorsqu'on approche un corps électrisé, la petite balle est d'abord attirée (fig. 562), puis repoussée aussitôt qu'il y a eu contact (fig. 563).

684. **Corps conducteurs et corps non conducteurs.** — Lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de cire à cacheter frotté par un bout, on remarque qu'il n'attire que par l'extrémité qui a été frottée; celle qui ne l'a pas été ne donne aucun signe, soit d'attraction, soit de répulsion. Il en est de même avec un tube de verre, un bâton de soufre, tant qu'ils n'ont pas été frottés dans toute leur longueur. On conclut de là que, dans ces corps, la propriété élec-

trique ne se propage pas d'une partie à l'autre ; ce qu'on exprime en disant qu'ils ne *conduisent* pas l'électricité. Au contraire, l'expérience montre qu'aussitôt qu'un corps métallique a acquis sur un de ses points la propriété électrique, instantanément elle se propage sur toute la surface du corps, quelle que soit son étendue ; c'est-à-dire que les métaux *conduisent* bien l'électricité.

De là, la distinction de corps *bons conducteurs* et de corps *mauvais conducteurs*. Les meilleurs conducteurs sont les métaux, l'anthracite, la plombagine, le coke, le charbon de bois bien calciné, les pyrites, la galène ; puis les dissolutions salines, dont le pouvoir conducteur est plusieurs milliers de fois moindre que celui des métaux ; enfin, l'eau à l'état de vapeur et à l'état liquide, les végétaux, le corps humain et tous les corps humides. Les mauvais conducteurs sont le soufre, la résine, la gomme laque, le caoutchouc, la gutta-percha, la soie, le verre, les pierres précieuses, le charbon non calciné, l'essence de térébenthine, les huiles, les gaz secs ; mais si ceux-ci sont humides, ils conduisent par la vapeur avec laquelle ils sont mélangés. Du reste, le degré de conductibilité des corps ne dépend pas seulement de la substance dont ils sont formés, mais encore de leur température et de leur état physique. Le verre, qui est très-mauvais conducteur à la température ordinaire, conduit lorsqu'il est chauffé au rouge. De même la gomme laque et le soufre deviennent conducteurs lorsqu'on les chauffe. L'eau, qui conduit très-bien à l'état liquide, est mauvais conducteur à l'état de glace sèche. Le verre pulvérisé et la fleur de soufre conduisent assez bien.

685. **Corps isolants, réservoir commun.** — Les corps mauvais conducteurs ont reçu le nom de *corps isolants*, ou d'*isoloirs*, parce qu'on les emploie comme supports lorsqu'il s'agit de conserver à un corps conducteur son électricité. Cette condition est indispensable ; car la terre étant formée de substances qui conduisent l'électricité, aussitôt qu'un corps conducteur électrisé communique avec elle par un conducteur, l'électricité s'écoule immédiatement dans le sol, qu'on nomme, à cause de cela, le *réservoir commun*. On isole un corps en le soutenant sur des pieds de verre, en le suspendant à des cordons de soie, ou en le posant sur des gâteaux de résine. Toutefois, les plus mauvais conducteurs n'isolant jamais complètement, tout corps électrisé perd toujours plus ou moins lentement son électricité au travers des supports sur lesquels il repose ; il y a, en outre, déperdition par la vapeur d'eau qui est dans l'air, et c'est ordinairement la plus abondante.

C'est à cause de leur grande conductibilité qu'on ne peut obtenir d'électricité sur les métaux par le frottement, si l'on n'a soin de

les isoler et de les frotter avec un corps non conducteur. Si l'on satisfait à ces conditions, les métaux s'électrisent très-bien par le frottement. Pour le démontrer, on fixe un tube de laiton à un manche de verre (fig. 564), et, tenant ce dernier à la main, on frotte le tube métallique avec un morceau de soie ou de taffetas



Fig. 564 ($l=50$).

ciré; en l'approchant ensuite du pendule électrique, on observe une attraction qui montre que le métal est électrisé. Si l'on tient le métal à la main, il y a bien encore production d'électricité, mais elle se perd immédiatement dans le sol.

686. Hypothèse de deux espèces d'électricité. — On a vu (683) que lorsqu'on présente au pendule électrique un tube de verre frotté avec un morceau de drap, il y a attraction d'abord, puis répulsion aussitôt après le contact. Les mêmes effets se produisant avec un bâton de cire à cacheter frotté de la même manière, il semble d'abord que l'électricité développée sur le verre soit identique avec celle développée sur la résine. Or, en poussant plus loin l'observation, on reconnaît qu'il n'en est pas ainsi. En effet, le tube de verre et le bâton de résine ayant été électrisés comme il vient d'être dit, si, tandis que le pendule électrique est repoussé par le verre, on approche la résine, celle-ci attire vivement la balle de sureau; de même, si au pendule repoussé par la résine après qu'il l'a touchée, on présente le tube de verre, on observe une forte attraction : c'est-à-dire qu'un corps repoussé par l'électricité du verre est attiré par l'électricité de la résine; et, réciproquement, un corps repoussé par l'électricité de la résine est attiré par celle du verre.

Se fondant sur les faits qui précèdent, Dufay, physicien français, admit, en 1734, l'existence de deux électricités de nature différente : l'une qui se développe sur le verre quand on le frotte avec de la laine, l'autre qui se développe sur la résine ou sur la cire d'Espagne quand on les frotte avec un morceau de drap ou une peau de chat. La première a reçu le nom d'*électricité vitrée*; la seconde, celui d'*électricité résineuse*. On va voir (688) comment on interprète aujourd'hui l'hypothèse de Dufay.

687. Théories de Franklin et de Symmer. — De nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer les phénomènes électriques. Deux seulement sont restées, celle de Franklin et celle de Symmer. Franklin, mort à Philadelphie, en 1790, admit, pour cause de l'électricité, un fluide unique, impondérable, agissant

par répulsion sur ses propres molécules et par attraction sur celles de la matière. Tous les corps contiennent, à l'état neutre, une quantité déterminée de ce fluide : si elle augmente, les corps sont électrisés *positivement*, et possèdent les propriétés de l'électricité vitrée; si elle diminue, les corps sont électrisés *négativement*, et présentent les propriétés de l'électricité résineuse. La dénomination d'*électricité positive* équivaut donc à celle d'*électricité vitrée*, et la dénomination d'*électricité négative* à celle d'*électricité résineuse*. L'électricité positive se représente par le signe + (*plus*), et l'électricité négative par le signe - (*moins*), en se fondant sur ce qu'ainsi qu'en algèbre en ajoutant $+ a$ à $- a$ on a zéro, de même en donnant à un corps qui possède déjà une certaine quantité d'électricité positive, une quantité égale d'électricité négative, on obtient l'état neutre.

Franklin ayant, le premier, donné une théorie complète de la bouteille de Leyde (730) dans l'hypothèse d'un seul fluide, cette hypothèse fut d'abord généralement admise par les physiciens et par Dufay lui-même. Cependant des objections sérieuses ayant été faites, surtout par Æpinus, à l'hypothèse d'un seul fluide, Symmer, physicien anglais, opposa à cette théorie celle de deux fluides électriques agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre. Selon ce physicien, ces fluides existent dans tous les corps à l'état de combinaison, formant ce qu'on nomme le *fluide neutre* ou *naturel*. Différentes causes, et surtout le frottement et les actions chimiques, peuvent les séparer, et c'est alors qu'apparaissent les phénomènes électriques; mais ces fluides ont une grande tendance à se réunir pour former de nouveau du fluide neutre. Symmer donna aux deux fluides électriques les noms de *fluide vitré* et de *fluide résineux*, dénominations généralement remplacées par celles de *fluide positif* et de *fluide négatif*, empruntées à la théorie de Franklin.

688. **Théorie moderne de l'électricité.** — La théorie de Symmer a été jusqu'à l'époque actuelle exclusivement adoptée, surtout en France; non pas qu'on y eût une foi bien vive, mais elle paraissait simple et surtout on y était habitué. Aujourd'hui la théorie des deux fluides électriques tombe devant le principe de l'*unité des forces physiques* (8), et on revient, en la modifiant, à la théorie de Franklin.

Tandis que le physicien de Philadelphie admettait, pour cause de l'électricité, un fluide spécial agissant par répulsion sur lui-même et par attraction sur la matière, les physiciens modernes, tendant à ramener tous les phénomènes physiques à une cause unique, pensent que c'est à l'éther même qu'est due l'électricité.

Se basant sur ce que non-seulement la chaleur se transforme en lumière (617), mais aussi en électricité, et que réciproquement l'électricité se transforme en chaleur et en lumière, ils admettent que tous les phénomènes calorifiques, lumineux et électriques doivent être rapportés à une cause unique, l'éther. Seulement, tandis que, dans les phénomènes de chaleur et de lumière, l'éther agit par ses vibrations, il agirait, pour donner naissance à l'électricité, par son déplacement et par sa masse, en se condensant ou se raréfiant à la surface des corps.

Dans cette théorie, un corps est à l'état neutre lorsque l'éther, dont toute matière est imprégnée, est en équilibre dans ce corps; mais dès que, par une cause quelconque, il y a rupture d'équilibre, l'électricité apparaît à l'état positif s'il y a condensation de l'éther, et à l'état négatif s'il y a raréfaction. Dans l'électricité dynamique (681), il y a de plus transport du fluide éthéré sous la forme de flux à travers un conducteur.

Enfin, l'éther étant un fluide éminemment élastique, ses molécules se repoussent; il ne peut donc exister seul, il lui faut la matière proprement dite qui l'attire et le maintient en équilibre. Attiré par les corps, l'éther doit l'être par la terre; il a donc un poids, une masse, et ne peut être impondérable comme on le suppose ordinairement.

Cette nouvelle théorie est plus simple que celle des deux fluides. « Elle a pour elle cet avantage qu'elle ramène tous les phénomènes à une seule cause, ce qui est le but suprême de la science moderne. Dans cette hypothèse, il n'y a plus qu'un seul fluide, l'éther; la chaleur et la lumière seraient des effets de vibration, l'électricité un effet de masse. » (M. Bertin, *Revue des cours scientifiques* du 15 décembre 1866.)

Les savants qui rapportent aujourd'hui à l'éther l'origine de l'électricité se sont proposé en outre d'expliquer les attractions et les répulsions électriques par la condensation ou la tension de l'éther à la surface des corps. Nous ne pouvons les suivre ici dans les démonstrations qu'ils ont données à ce sujet. Il ne faut pas se dissimuler d'ailleurs que la théorie des attractions et des répulsions présente des difficultés peut-être insurmontables, comme on l'a vu pour l'attraction universelle (40). Toutefois, dans la théorie moderne, on n'explique plus les attractions et les répulsions par une cause occulte agissant à distance, comme dans l'hypothèse des deux fluides, mais par des pressions exercées sur l'éther ambiant par l'éther accumulé à la surface des corps, hypothèse probable et rentrant dans le domaine de la mécanique.

689. **Application à la théorie moderne du langage ancien.** —

Pour se conformer aux idées nouvelles, il est temps de renoncer aux expressions de *fluide positif* et de *fluide négatif* usitées jusqu'ici, et de les remplacer exclusivement par celles d'*électricité positive* ou en plus, et d'*électricité négative* ou en moins. Mais qu'il soit bien entendu, une fois pour toutes, qu'on n'entend pas dire par là qu'il y a deux espèces d'électricités. Il n'en existe qu'une, se présentant sous deux états opposés : en excès, ou en moins; ce que représentent assez bien les notations *électricité +* et *électricité -*, adoptées par quelques physiciens.

Les sciences physiques se trouvent à une époque de transition, où l'on est forcé d'exprimer en vieux langage des idées nouvelles. Tout en adoptant celles-ci, nous dirons donc qu'un corps *est à l'état neutre*, quand la distribution et la tension du fluide éthéré sur ce corps sont à l'état normal, c'est-à-dire en équilibre avec l'éther ambiant; qu'un corps est *électrisé*, quand l'équilibre est rompu entre l'éther qu'il possède et l'éther ambiant; que deux corps sont *chargés de la même électricité*, lorsque l'éther est condensé sur tous les deux, ou raréfié; enfin, qu'ils sont *chargés d'électricités contraires*, toutes les fois que le fluide éthéré, condensé sur l'un, est raréfié sur l'autre.

690. Actions mutuelles entre les corps électrisés. — Les effets d'attraction et de répulsion entre les corps électrisés se résument dans le principe suivant, qui sert de base à la théorie de tous les phénomènes de l'électricité statique : *Deux corps chargés de la même électricité se repoussent, et deux corps chargés d'électricités contraires s'attirent.* En effet, si l'on communique à la boule du pendule électrique (fig. 562) de l'électricité positive par exemple, en la touchant avec un corps électrisé positivement, la boule, aussitôt électrisée, est vivement repoussée; mais si, tandis qu'elle est chargée d'électricité positive, on lui présente un corps électrisé négativement, elle est fortement attirée.

691. Loi de l'électrisation par le frottement. — Lorsqu'on frotte ensemble deux corps de nature quelconque, l'électricité neutre de chacun est décomposée, et toujours *l'un des corps s'électrise positivement, l'autre négativement.*

Pour le démontrer, on communique au pendule électrique une électricité connue, et on lui présente séparément les deux corps frottés, qui doivent être isolés dans le cas où ils sont conducteurs : par exemple, deux disques, l'un de verre poli, l'autre de métal ou de bois recouvert d'une rondelle de drap (fig. 565). Tenant ces disques par deux manches de verre isolants auxquels ils sont fixés, on les frotte vivement l'un contre l'autre et on les sépare ensuite brusquement. Or l'un des deux attire la balle de sureau,

et l'autre la repousse; ce qui montre qu'ils sont chargés d'électricités contraires. De plus, ils le sont en quantité égale, car si on les présente au pendule tandis qu'ils sont en contact, il n'y a ni attraction ni répulsion; donc les deux électricités se font équilibre.

L'électricité développée sur un corps, par le frottement, varie avec la nature du corps frotté.

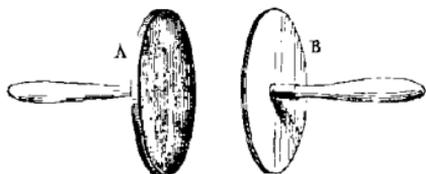


Fig. 565.

Le verre poli, frotté avec de la laine, s'électrise positivement; frotté de la même manière, le verre dépoli s'électrise négativement. L'espèce d'électricité développée dépend aussi de la nature du

frottoir. Les substances ci-après s'électrisent positivement lorsqu'elles sont frottées par celles qui les suivent, et négativement quand elles le sont par celles qui les précèdent: peau de chat, verre poli, laine, plume, bois, papier, soie, gomme laque, résine, verre dépoli.

L'électricité dégagée par le frottement dépend encore du degré de poli, du sens des frictions et de la température. En effet, si l'on frotte l'un contre l'autre deux plateaux de verre inégalement polis, c'est celui dont la surface est la plus polie qui prend l'électricité positive; l'autre s'électrise négativement. Si l'on frotte en croix, l'un sur l'autre, deux rubans de soie blanche pris dans la même pièce, celui qui est frotté transversalement s'électrise négativement, l'autre positivement. Quand on frotte l'un contre l'autre deux corps de même substance, dont la surface a le même degré de poli, mais dont la température est différente, c'est la substance la plus échauffée qui prend l'électricité négative. En général, c'est le corps dont les molécules peuvent se déplacer plus facilement qui s'électrise négativement.

692. **Diverses sources d'électricité.** — Outre le frottement, les causes qui peuvent développer de l'électricité sont la pression, le clivage, les actions chimiques et la chaleur.

Æpinus, le premier, constata le développement de l'électricité par la pression; Libes, depuis, montra qu'en pressant légèrement sur un disque de bois recouvert de taffetas gommé un disque de métal isolé à l'aide d'un manche de verre, ce dernier disque s'électrise négativement. Haüy fit voir ensuite que le spath d'Islande s'électrise positivement lorsqu'on le presse un instant entre les doigts, et que ce cristal conserve l'état électrique pendant plusieurs jours. Il reconnut la même propriété dans plusieurs espèces minérales. M. Becquerel a trouvé qu'elle appartient à tous les

corps, même à ceux qui sont conducteurs, pourvu qu'ils soient isolés. Le liège et le caoutchouc, pressés l'un contre l'autre, prennent, le premier l'électricité positive, le second l'électricité négative. Un disque de liège, pressé sur une orange, emporte avec lui une quantité considérable d'électricité positive, lorsqu'on interrompt vivement le contact; mais si l'on n'enlève que lentement le disque de liège, la quantité d'électricité est très-faible; ce qui provient de ce que les deux électricités séparées sur les deux corps par la pression se recomposent en partie au moment où elle cesse. C'est par cette raison que l'effet est nul quand les substances pressées sont toutes les deux conductrices de l'électricité.

M. Becquerel a encore observé que le *clivage*, c'est-à-dire la division naturelle des substances minérales cristallisées, peut être une source d'électricité. Si l'on clive rapidement une feuille de mica dans l'obscurité, on observe une lueur phosphorescente. Pour s'assurer que le phénomène a bien pour cause l'électricité, M. Becquerel a fixé, avant leur séparation, chaque lame à un manche de verre; les séparant ensuite rapidement et les présentant au pendule électrique ou à un électroscope à feuille d'or (707), il a trouvé qu'elles possèdent une électricité contraire.

Le talc feuilleté et toutes les substances cristallisées, peu conductrices, s'électrisent par le clivage. En général, toutes les fois qu'on sépare deux molécules, chacune d'elles prend une électricité différente, à moins que le corps auquel elles appartiennent ne soit bon conducteur, car alors la séparation ne peut être assez rapide pour s'opposer à la recomposition des deux électricités. C'est au phénomène que nous venons de décrire qu'il faut rapporter la lumière que répand le sucre quand on le casse dans l'obscurité.

Quant à l'électricité dégagée par les actions chimiques ou par la chaleur, elle sera étudiée plus tard (754 et 803).

CHAPITRE II

MESURE DES FORCES ÉLECTRIQUES

693. **Lois des attractions et des répulsions électriques.** — Les actions mutuelles qui s'exercent entre les corps électrisés sont soumises aux deux lois suivantes :

1^o *Les répulsions et les attractions entre deux corps électrisés sont en raison inverse du carré de la distance.*

2^o *A distance égale, ces mêmes forces sont en raison composée des quantités d'électricité que possèdent les deux corps;*

c'est-à-dire *proportionnelles au produit des quantités d'électricité sur les deux corps.*

Première loi. — Ces deux lois ont été démontrées par Coulomb au moyen de la balance de torsion, déjà employée pour la démonstration des lois des attractions et des répulsions magnétiques (678). Elle se compose d'une cage cylindrique de verre de 35 centimètres de diamètre (fig. 566). Sur son contour est collée une

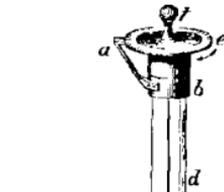


Fig. 566.

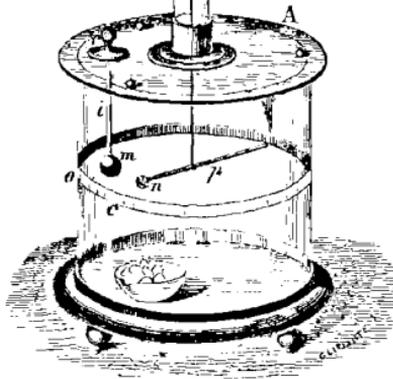


Fig. 567.

bande de papier qui porte une graduation en 360 degrés. La cage est fermée par un plateau de verre A, au centre duquel s'élève un tube *d* de même matière. Ce tube n'est point fixé invariablement au plateau, mais peut tourner librement sur lui-même. A sa partie supérieure est une garniture de laiton formée de deux pièces (fig. 567), l'une *b* fixée au tube, l'autre *k* s'engageant dans la première au moyen d'une douille, afin que par le bouton *t* on puisse la tourner à volonté. La pièce *k* porte un cadran *e* divisé en 360 degrés et tournant avec elle; et à la pièce *b* est adapté un indicateur *a*, qui, par un point de repère, marque de combien de degrés on fait tourner le cadran *e*. Au centre de celui-ci et en dessous est fixé un fil d'argent très-fin, auquel est suspendue une aiguille de gomme laque *p*, terminée à un bout par un disque de

clinquant n . Enfin le plateau de verre est percé d'un trou r par lequel on introduit dans la cage un tube de verre i , qui porte une boule de laiton m . Ajoutons que la distance entre cette boule et le clinquant n se mesure par l'arc gradué oc , compris de m à n , les angles d'écart que l'on considère étant assez petits pour que l'on puisse remplacer les cordes par leurs arcs.

Pour démontrer la première loi, on commence par dessécher l'air qui est dans l'appareil, afin de diminuer la déperdition de l'électricité, ce qu'on obtient en plaçant sous la cage, pendant plusieurs jours, une capsule remplie de chaux vive. Lorsque l'air est complètement desséché et que le zéro du disque e correspond au repère a , on tourne le tube d jusqu'à ce que l'aiguille p soit dirigée vers le zéro du cercle gradué c , position à laquelle correspond la boule m lorsqu'elle est dans la cage. Prenant alors cette boule, en ayant soin de la tenir par le tube isolant i , on l'électrise en la mettant en contact avec une source d'électricité, avec la machine électrique par exemple; puis on la porte dans la cage. Aussitôt le disque n , s'électrisant au contact de la boule, est repoussé, et, après quelques oscillations, s'arrête lorsque la torsion du fil fait équilibre à la force répulsive qui s'exerce entre le disque et la boule. Supposons que la torsion marquée alors par l'aiguille, sur le cadran c , soit de 20 degrés; la torsion du fil étant proportionnelle à la force de torsion (71, 2^o), ce nombre 20 peut être regardé comme représentant la répulsion électrique à la distance où est l'aiguille. Pour mesurer cette force à une distance moindre, on tourne le disque e , dans le sens de la flèche, jusqu'à ce que la distance du clinquant n à la boule m ne soit plus que de 10 degrés, c'est-à-dire deux fois moindre. Or pour amener l'aiguille à ce point, on trouve qu'il faut tourner de 70 degrés. Le fil d'argent est donc tordu, à son extrémité supérieure, de 70 degrés dans le sens de la flèche, et de 10 degrés en sens contraire, à sa partie inférieure. Par conséquent, les deux torsions s'ajoutent pour donner une torsion totale de 80 degrés, c'est-à-dire quadruple de celle qui correspond à une distance double; d'ailleurs, la force de torsion étant toujours égale et contraire à la répulsion, il faut que celle-ci soit elle-même devenue quatre fois plus grande pour une distance deux fois moindre. On vérifie de même que pour une distance trois fois moindre la répulsion est neuf fois plus grande; ce qui démontre la loi des répulsions.

La loi des attractions se démontre par la même méthode, en donnant à la boule et au clinquant des électricités contraires, et en faisant équilibre à leur attraction par une torsion opposée.

Deuxième loi. — Pour démontrer que les forces électriques sont

proportionnelles aux quantités d'électricité que possèdent les corps, on électrise encore la boule de cuivre m , puis, notant la répulsion imprimée à l'aiguille pn , on retire la boule m , et on la touche avec une seconde boule de cuivre de même diamètre, à l'état neutre, et isolée à l'aide d'un manche de verre. La boule m cède alors la moitié de son électricité à l'autre, puisque les surfaces des deux boules sont égales (698). Or, en rapportant la première dans la cage, on trouve que la répulsion n'est plus que la moitié de ce qu'elle était d'abord. Si l'on enlève de nouveau à la boule m la moitié de l'électricité qui lui reste, la répulsion n'est plus que le quart de la répulsion primitive, et ainsi de suite; ce qui démontre la loi. Comme on arrive à la même conséquence lorsqu'on diminue successivement la charge électrique du disque n , on en conclut qu'entre deux corps électrisés, la répulsion ou l'attraction est à la fois proportionnelle à la quantité d'électricité de chacun et par conséquent au produit des charges électriques.

D'après les lois de Coulomb, si l'on représente par f la force attractive ou répulsive, à l'unité de distance, pour une charge électrique égale à 1, et par e et e' les charges électriques de deux corps en présence, la répulsion ou l'attraction F entre ces deux corps, à la distance d , est donnée par la formule $F = \frac{fee'}{d^2}$.

* 694. **Expériences de Harris.** — Harris a fait, en Angleterre, en 1836, de nombreuses expériences pour vérifier les lois de Coulomb. Le savant anglais a fait usage d'un appareil ayant du rapport avec la balance de Coulomb, mais qui en diffère en ce que l'aiguille mobile, au lieu d'être suspendue à un seul fil, est soutenue, de même que l'avait déjà fait Gauss dans son *magnétomètre*, par deux fils de cocon parallèles, très-rapprochés l'un de l'autre, et à égale distance du centre de gravité de l'aiguille; d'où le nom de *balance bifilaire* donné à cet appareil. De ce mode de suspension il résulte que, dès qu'une des extrémités de l'aiguille mobile est repoussée ou attirée, les deux fils se tordent plus ou moins, selon l'intensité de la force qui agit sur l'aiguille, et que par suite celle-ci s'élève jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse entre la pesanteur qui tend à l'abaisser et la force électrique qui tend à la faire remonter par l'effet de la déviation des fils. Or Harris a constaté que les oscillations de l'aiguille sont alors isochrones, et que la force qui la maintient à une certaine distance angulaire de sa position d'équilibre est proportionnelle à cette distance.

Harris a aussi expérimenté avec une balance ordinaire, très-sensible, en faisant équilibre, au moyen de poids placés dans l'un des plateaux, aux attractions électriques qui s'exerçaient sur un disque fixé à l'autre plateau.

En expérimentant avec ces deux appareils, Harris a trouvé que la première loi de Coulomb, celle de l'inverse du carré de la distance, ne se vérifie plus quand les deux corps électrisés sont chargés de quantités inégales d'électricité, et la tension très-faible; et enfin quand la distance angulaire des deux corps est moindre que 9 à 10 degrés. Harris a aussi observé que, dans les mêmes circonstances, la seconde loi de Coulomb, celle relative aux quantités d'électricité, ne se vérifie pas non plus.

Dans l'ouvrage déjà cité plus haut, de la Rive fait observer que ces exceptions aux lois de Coulomb ne sont qu'apparentes; qu'elles tiennent à l'influence que les deux corps électrisés exercent l'un sur l'autre (701), influence qui tend à décomposer l'électricité neutre, mais qui cesse d'être appréciable quand les

deux corps sont assez éloignés; qu'enfin les lois de Coulomb ne sont rigoureusement applicables qu'à des points mathématiques, et que dès lors elles ne peuvent se vérifier que pour des corps de très-petites dimensions.

C'est ce que confirment les expériences de M. Marié-Davy, qui, ayant répété celles de Harris, a reconnu que la loi des distances se vérifie très-approximativement pour deux sphères égales, distantes de plus de 9 à 10 fois leur rayon.

695. Accumulation de l'électricité à la surface des corps, tension.

— Lorsqu'un corps conducteur et isolé est électrisé, soit positivement, soit négativement, l'électricité libre se porte à la surface, où l'on admet qu'elle forme une couche extrêmement mince. Cette accumulation à la surface se démontre par les expériences suivantes, dont les deux premières sont dues à Coulomb.

1^o On prend une sphère de cuivre creuse, isolée sur un pied de verre, et ouverte à sa partie supérieure (fig. 568). Après l'avoir électrisée en la mettant en contact avec une source électrique, on la touche successivement, à l'intérieur et à l'extérieur, avec un *plan d'épreuve*. On nomme ainsi un bâton de gomme laque à l'extrémité duquel est fixé un disque de clinquant qui sert à recueillir l'électricité. Ce disque doit

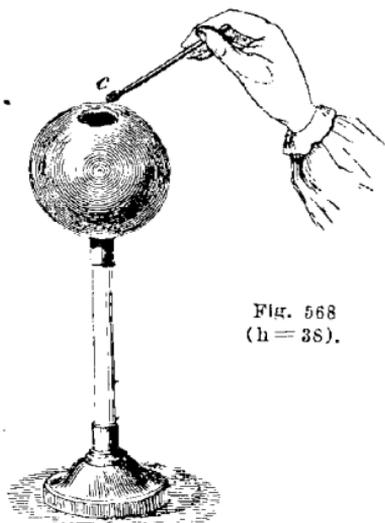


Fig. 568
(h = 38).

être appliqué à plat sur le corps électrisé; se substituant ainsi à la surface qu'il recouvre, il prend une quantité d'électricité sensiblement égale. Or, en touchant extérieurement la sphère électrisée avec le plan d'épreuve, on recueille de l'électricité; car ce plan étant présenté à l'aiguille *pn* de la balance de torsion (fig. 566), il y a attraction. Mais si l'on touche la surface interne, on n'observe aucune trace d'électrisation; donc il n'y a d'électricité libre qu'à la surface externe.

2^o On a une sphère de cuivre isolée sur un pied de verre; sur cette sphère s'appliquent deux hémisphères creux, aussi de cuivre, de même diamètre qu'elle, pouvant la recouvrir exactement et s'enlever à volonté à l'aide de manches de verre. Après avoir électrisé la sphère, on applique dessus les deux hémisphères qu'on tient par les manches de verre, puis on les retire brusquement et bien ensemble (fig. 569). On observe qu'ils sont alors électrisés tous les deux, mais que la sphère n'a conservé aucune

trace d'électricité. L'électricité communiquée à la sphère était donc tout entière à la surface, puisqu'elle a été complètement enlevée en même temps que les deux enveloppes.

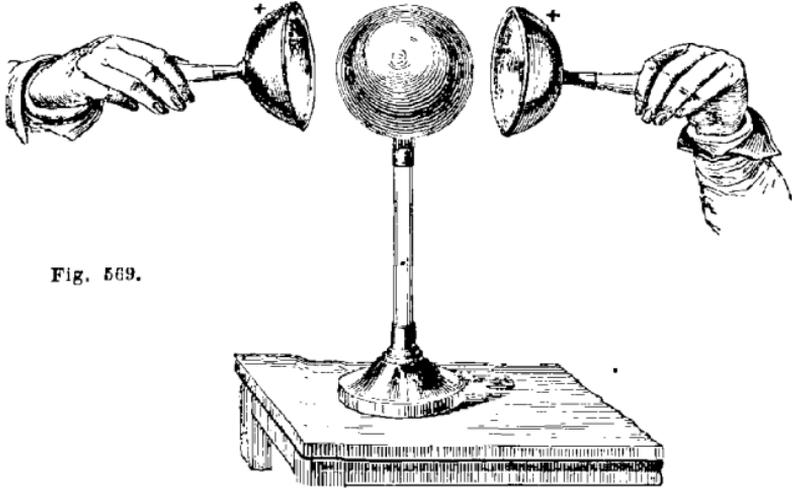
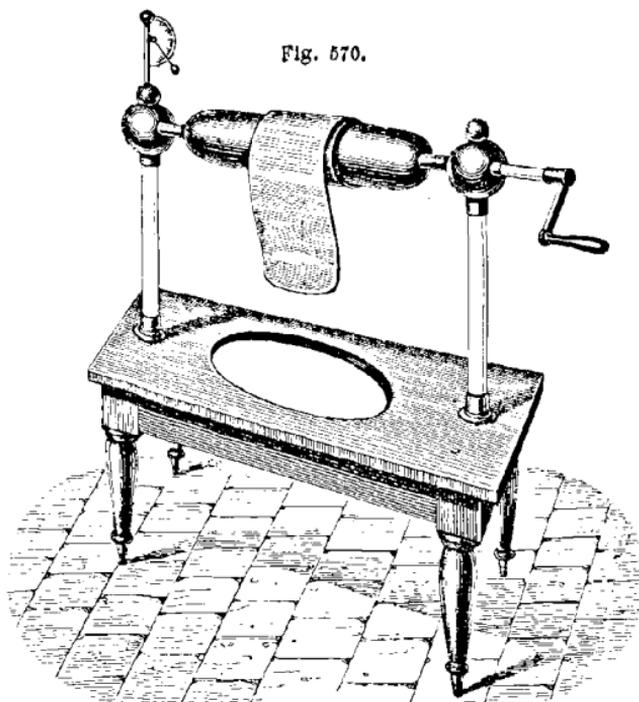


Fig. 569.

3° On peut encore constater que l'électricité se porte à la surface des corps, au moyen d'un cylindre de cuivre isolé sur lequel est fixée une feuille métallique flexible, qu'on enroule ou déroule à volonté, en faisant tourner le cylindre à l'aide d'une manivelle (fig. 570). Sur une boule de métal, en communication avec le cylindre, est fixé un électromètre, composé d'un cadran d'ivoire, au centre duquel tourne une tige légère terminée par une petite boule de sureau. Lorsqu'on communique de l'électricité au cylindre, la boule diverge en vertu d'une répulsion électrique. Si l'on tourne alors le cylindre de manière à dérouler lentement la feuille, la divergence diminue; en l'enroulant de nouveau, elle augmente. Donc, la quantité totale d'électricité possédée par un corps restant la même, la répulsion, en un point quelconque de la surface, est d'autant moindre, que celle-ci est plus grande; ce qui montre que l'électricité se porte à la surface.

4° Une quatrième expérience, due à Faraday, consiste à fixer sur un cerceau isolé une poche conique de mousseline, semblable à celle dont on se sert pour prendre des papillons (fig. 571). Au moyen de deux fils de soie attachés des deux côtés au sommet du cône, on peut le retourner à volonté. Cela posé, on électrise la mousseline en la touchant avec un corps électrisé, et l'on trouve, à l'aide du plan d'épreuve, que sa surface extérieure est

seule électrisée; puis, tirant le fil de soie intérieur, on retourne la poche, de manière que sa surface interne devienne externe, et réciproquement; or on reconnaît alors que c'est encore la surface externe qui est seule électrisée.



5^o Enfin, l'expérience montre qu'une sphère de métal massive ne prend pas plus d'électricité qu'une sphère de bois de même diamètre recouverte d'une feuille de métal très-mince.

Ces différentes expériences ont conduit les physiciens à considérer l'électricité libre comme accumulée, en couche extrêmement mince, à la surface des corps électrisés, dont elle tend sans cesse à s'échapper avec un effort plus ou moins grand ¹.

¹ « Selon Faraday, la tendance de l'électricité à se porter à la surface des corps conducteurs est plus apparente que réelle, et les expériences qui constatent qu'il n'y a d'électricité libre qu'à leur surface s'expliquent facilement d'une autre manière. D'après sa théorie, aucune charge électrique ne peut se manifester dans l'intérieur d'un corps à cause des directions opposées des électricités dans chacune des particules intérieures, d'où résulte un effet nul, tandis que l'induction (701) exercée par les corps extérieurs rend sensible l'électricité à la surface. D'après cette manière de voir, l'électricité doit se montrer seulement à la surface d'une enveloppe conductrice, quelle que soit la conductibilité ou la faculté iso-

L'effort avec lequel l'électricité tend ainsi à se dégager des corps se nomme *tension*; on va voir les causes qui la font varier.

696. **Influence de la forme des corps sur l'accumulation de l'électricité.** — Sur une sphère métallique, l'épaisseur de la couche électrique est la même en chaque point de la surface. Il est évident, en effet, qu'il doit en être ainsi d'après la forme symétrique du corps. On le vérifie au moyen du plan d'épreuve et de la balance de torsion (fig. 566). Pour cela, on électrise une sphère isolée pareille à celle de la figure 569, et la touchant successivement en différents points avec le plan d'épreuve, on présente chaque fois celui-ci à l'aiguille de la balance. Or on observe constamment la même torsion, ce qui fait voir que partout le plan d'épreuve a recueilli la même quantité d'électricité.

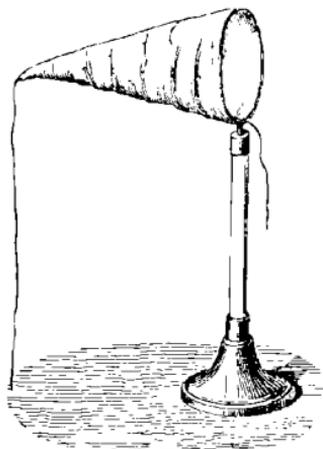


Fig. 571.

Si le corps électrisé est un ovoïde allongé (fig. 572), l'épaisseur de la couche électrique cesse d'être uniforme; l'électricité, obéissant toujours à sa propre répulsion, s'accumule vers les parties les plus aiguës, sur lesquelles elle acquiert un maximum d'épaisseur. Pour le démontrer, on touche l'ovoïde en différents points avec le plan d'épreuve, et portant celui-ci dans la balance de Coulomb, le maximum de torsion se produit lorsqu'on a touché l'extrémité *a*, et le minimum lorsqu'on a touché la région moyenne *e*.

Quelle que soit la forme d'un corps électrisé, l'analyse mathé-

lante de la substance placée intérieurement. C'est ce que Faraday a démontré en électrisant fortement de l'essence de térébenthine placée dans un vase de métal : il n'y avait d'électricité apparente qu'à la surface extérieure du vase. Il a même construit une chambre cubique d'un mètre de côté, dont les parois de bois étaient recouvertes extérieurement de feuilles de plomb; il l'a isolée, puis, après y avoir placé des électroscopes et autres objets, il a électrisé l'air intérieur avec une forte machine. Aucune trace d'électricité ne s'est manifestée au dedans, tandis que des étincelles considérables et des aigrettes lumineuses partaient dans tous les sens de la surface extérieure. Ces expériences, en complétant celles de Coulomb, dans lesquelles il ne s'agissait que de corps conducteurs, rendent peu probable l'explication qu'on en donnait, vu qu'elle était basée sur la libre propagation de l'électricité dans la masse conductrice, d'où résultait que cette électricité se portait toute à la surface. Une fois que le phénomène a lieu de la même manière avec des corps isolants placés intérieurement, cette explication n'est plus soutenable. » (De la Rive, *Traité d'électricité*, t. I, p. 143.)

matique fait voir qu'en chaque point de la surface, la tension (695) est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique; et que, dans le cas d'un ellipsoïde parfait, l'épaisseur de cette couche, aux extrémités des axes, est proportionnelle à leur lon-

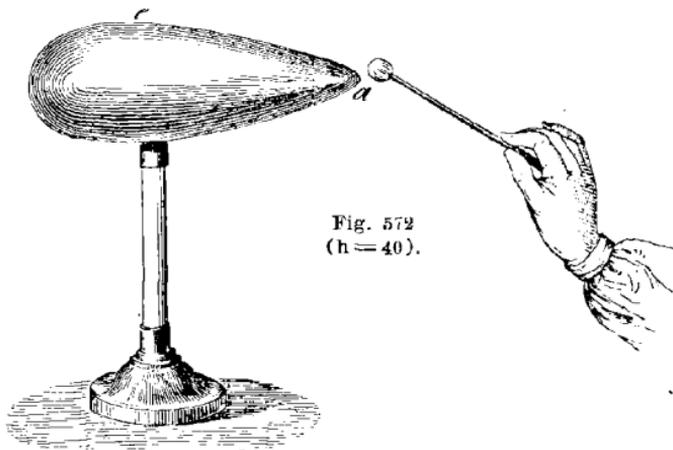


Fig. 572
(h = 40).

gueur. Dans le cas d'un disque de métal, c'est sur les bords que s'accumule l'électricité.

697. Pouvoir des pointes. — On nomme *pouvoir des pointes* sur les corps conducteurs la propriété qu'elles possèdent de laisser écouler l'électricité. Cette propriété, découverte par Franklin, s'explique par la distribution de l'électricité à la surface des corps. En effet, celle-ci s'accumulant vers les parties aiguës, la densité électrique croît vers les pointes, et la tension l'emporte bientôt sur la résistance de l'air; c'est alors que l'électricité se dégage dans l'atmosphère. Si l'on approche la main de la pointe, on ressent un souffle léger, dû à la répulsion de l'air, et si le dégagement d'électricité a lieu dans l'obscurité, on remarque sur la pointe une aigrette lumineuse.

698. Communication et distribution de l'électricité sur les corps en contact. — Lorsqu'on met en contact deux corps conducteurs, l'un électrisé, l'autre à l'état neutre, il y a partage de l'électricité entre les deux corps dans un rapport qui dépend de celui de leurs surfaces; et lorsqu'on les sépare, l'un a gagné, l'autre a perdu de l'électricité sur tous ses points. S'ils ne sont pas conducteurs, il n'y a perte ou gain que sur les points en contact.

A l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion, Coulomb a fait de nombreuses expériences sur la distribution de l'électricité à la surface des corps en contact. Avec des sphères métalliques isolées, mises en contact et électrisées dans cet état, il a trouvé

que l'électricité se distribue diversement sur leurs surfaces, suivant le rapport des diamètres. S'ils sont égaux, la tension électrique est nulle au point de contact, ne devient sensible qu'à 20 degrés de ce point, croît rapidement de 20 à 30 degrés, plus lentement de 60 à 90, et reste à peu près la même de 90 à 180.

Si les diamètres sont dans le rapport de 2 à 1, la tension, qui est encore nulle au point de contact, est d'abord plus considérable sur la grande sphère; mais elle augmente ensuite plus rapidement sur la petite, et à 180 degrés du point de contact, c'est sur elle qu'a lieu la plus forte tension.

699. **Déperdition de l'électricité dans l'air.** — Les corps électrisés, quoique isolés, perdent toujours plus ou moins rapidement leur électricité. Cette déperdition s'opère par l'air et les vapeurs qu'il contient, et aussi par les isolements qui servent de supports aux corps électrisés.

L'air sec est très-mauvais conducteur; cependant, en s'électrisant au contact des corps électrisés, il est pour eux une cause continue de déperdition: les molécules d'air électrisées étant repoussées, de nouvelles molécules viennent prendre leur place, s'électrisent à leur tour pour être repoussées aussitôt; et de là une déperdition d'autant plus sensible, que la tension est plus forte. D'après Coulomb, *dans un air calme et à un état hygrométrique constant, la déperdition, dans un temps très-court, est proportionnelle à la tension.* Cette loi, analogue à celle de Newton sur le refroidissement (422), ne se vérifie que pour les charges moyennes, et ne représente pas dans toute sa généralité le phénomène de la déperdition; ce qui tient à ce que celle-ci ne varie pas seulement avec la tension, mais avec le milieu ambiant, avec l'électricité positive ou négative dont les corps sont chargés, la pression, la température, et enfin avec l'état hygrométrique.

D'après Matteucci, à température et à pression égales, la perte est la même dans l'air, dans l'hydrogène et dans l'acide carbonique, quand ces gaz sont complètement desséchés; avec des corps fortement électrisés, la déperdition est plus grande quand ils sont électrisés négativement que lorsqu'ils le sont positivement; dans les gaz secs, à pression constante, la déperdition augmente avec la température; enfin, toujours dans les gaz secs, la perte est indépendante de la nature du corps électrisé, c'est-à-dire qu'elle est la même, que celui-ci soit conducteur ou isolant. Le même savant a constaté que la déperdition est d'autant plus rapide, que la pression est plus faible, jusqu'à une tension limite, au delà de laquelle la perte tend à devenir nulle (700). Enfin, la

déperdition augmente avec la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.

Quant à la perte par les supports, non-seulement ceux-ci n'isolent jamais complètement, mais Coulomb a trouvé qu'ils sont la source d'une abondante déperdition pour les corps fortement électrisés. Cette déperdition diminue graduellement et devient constante lorsque la tension est très-affaiblie. Elle peut même alors être négligée, si l'on donne aux isoloirs une longueur suffisante : longueur qui, d'après Coulomb, doit augmenter proportionnellement au carré de la tension sur le corps à isoler. La gomme laque et l'ébonite isolent alors à peu près complètement; mais le verre, qui est hygrométrique, doit être desséché avec soin.

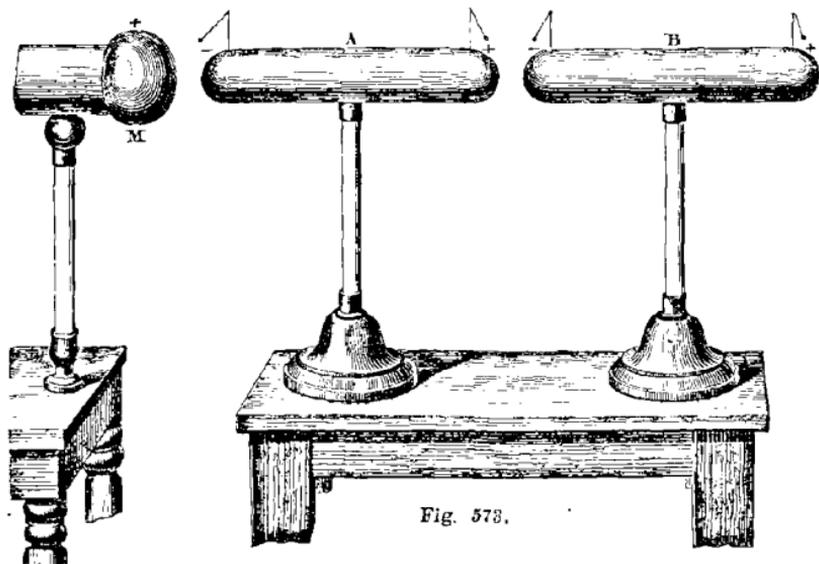
700. **Déperdition de l'électricité dans le vide.** — L'électricité étant retenue à la surface des corps par la mauvaise conductibilité de l'air, quand celui-ci se raréfie, la déperdition augmente, et dans le vide, où la résistance est nulle, il semble que toute électricité devrait se dissiper. C'est, en effet, ce qu'on a d'abord admis, et la conséquence à laquelle on était arrivé par le calcul. Cependant Hawksbee, Gray, Harris, M. Becquerel et M. Grove ont montré que, dans le vide, des tensions électriques faibles peuvent être maintenues. M. Becquerel a même observé que, dans le vide à un millimètre, un corps conservait encore de l'électricité après quinze jours; et ce savant admet que si un corps électrisé se trouvait dans un vide parfait, loin de toute matière qui pût exercer sur lui une action par influence (701), il conserverait indéfiniment une certaine tension électrique. Depuis, M. Gassiot a fait voir que dans le vide obtenu par des procédés chimiques (vide le plus parfait qu'on sache produire), la décharge électrique ne passe pas. Une expérience de Hittorf, que nous donnons plus loin, prouve le même fait. Aussi est-il généralement admis aujourd'hui que la présence d'un milieu pondérable est nécessaire à la propagation de l'électricité.

CHAPITRE III

INDUCTION, MACHINES ÉLECTRIQUES

701. **Électrisation par influence ou par induction.** — Un corps électrisé agit sur un corps à l'état neutre de la même manière qu'un aimant agit sur le fer doux (658); c'est-à-dire que, décomposant l'électricité neutre, il attire l'électricité de nom contraire

à celle qu'il possède et repousse celle de même nom. Pour exprimer cet effet, qui est une conséquence de l'action mutuelle des deux électricités, on dit que le corps qui était d'abord à l'état neutre, est maintenant *électrisé par influence* ou *par induction*; et l'on nomme *induisant* ou *inducteur* le corps qui agit par induction, et *induit* celui sur lequel il agit.



On démontre l'électrisation par influence au moyen d'un cylindre de laiton A, isolé sur un pied de verre, et portant à ses extrémités deux petits pendules électriques formés de balles de sureau suspendues par des fils de chanvre, qui sont conducteurs fig. 573¹. Lorsqu'on place ce cylindre à une certaine distance de l'un des conducteurs M de la machine électrique, celle-ci, ainsi qu'on le verra bientôt, est chargée d'électricité positive, agissant par influence sur l'électricité neutre du cylindre, la décompose, attire l'électricité négative et repousse la positive; en sorte que les électricités se distribuant comme l'indiquent les signes + et — sur la figure, chaque pendule est repoussé.

Pour reconnaître l'espèce d'électricité dont sont chargées les extrémités du cylindre, on frotte un bâton de cire d'Espagne, et le présentant au pendule le plus rapproché de la machine électrique, on observe une répulsion, ce qui montre que ce pendule est chargé de la même électricité que la résine, c'est-à-dire d'électricité négative. En présentant de même au second pendule un tube de verre frotté, il y a également répulsion; donc ce pendule est électrisé

positivement. Par conséquent, un corps électrisé par influence possède à la fois, sur deux régions opposées, les deux espèces d'électricités à l'état libre. Entre ces parties électrisées en sens contraires se trouve nécessairement une zone à l'état neutre. On le vérifie en disposant plusieurs petits pendules à balles de sureau le long du cylindre : leur divergence décroît rapidement en s'éloignant des extrémités, et devient nulle en un certain point, qui est le *point neutre*. Ce point n'est jamais au milieu du cylindre; sa position dépend de la charge électrique et de la distance du cylindre au corps induisant; mais il est toujours plus près de l'extrémité la plus rapprochée de ce corps.

Un corps électrisé par influence agit à son tour sur les corps voisins pour séparer les deux électricités; c'est ce que montre la disposition relative des signes + et - sur un second cylindre B placé à la suite du cylindre A.

Tout corps électrisé par influence présente les deux phénomènes suivants : 1° *Aussitôt que l'influence cesse, les deux électricités se recomposent, et le corps revient à l'état neutre.* Ce principe se vérifie avec le cylindre A ci-dessus; car les pendules retombent dès qu'on l'éloigne de la machine électrique, ou dès qu'on ramène celle-ci à l'état neutre en la touchant. 2° *Lorsqu'un corps conducteur est électrisé par influence, si on le touche en un quelconque de ses points avec une tige métallique, ou avec le doigt, c'est toujours l'électricité de même nom que celle de la source qui s'écoule dans le sol, l'électricité de nom contraire étant retenue par celle de la source.* Par exemple, dans le cylindre A, c'est l'électricité négative qui reste, soit qu'on touche l'extrémité positive, la négative, ou la partie médiane.

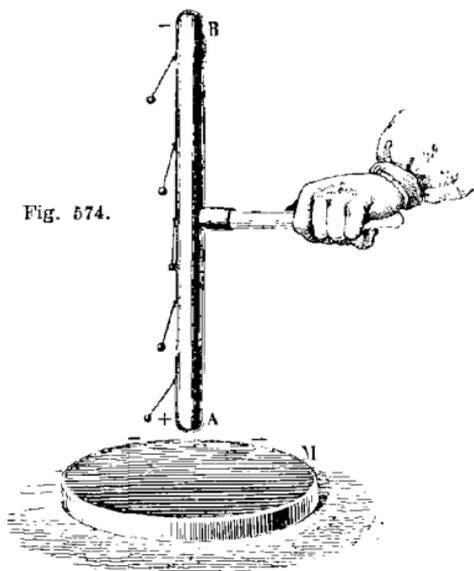
C'est par un effet d'électrisation par influence qu'une machine électrique ne peut se charger s'il se trouve, dans son voisinage, une pointe métallique en communication avec le sol; en effet, l'électricité positive de la machine agissant par influence sur la pointe, il s'écoule de celle-ci (697) un courant continu d'électricité négative qui neutralise l'électricité de la machine.

Les effets par influence qui viennent d'être étudiés ne s'appliquent qu'aux corps bons conducteurs. Sur les mauvais conducteurs, l'action par influence est nulle, ou du moins très-faible, et ne peut se produire que lentement, à une faible épaisseur, et en présence d'une source électrique assez puissante, vu la grande résistance que rencontre alors l'électricité à se mouvoir.

Par la même cause, lorsqu'un corps mauvais conducteur est une fois électrisé par influence, il l'est encore longtemps après que l'action induisante a été écartée.

702. **Appareil de Riess pour constater l'influence.** — Le cylindre horizontal de la figure 573, dû à Æpinus, a été longtemps le seul appareil en usage pour démontrer l'électrisation par influence. On a objecté à l'emploi de cet appareil qu'il ne démontre pas que

Fig. 574.



l'extrémité la plus rapprochée de la source soit électrisée, parce que la divergence du pendule correspondant peut s'expliquer par l'attraction de l'électricité du corps M. Pour éviter cette objection, Riess a adopté un cylindre de laiton, muni d'un manche de verre, et armé, dans toute sa longueur, de petits pendules de moelle de sureau (fig. 574). Tenant le manche à la main, on présente le cylindre verticalement à une source électrique, par exemple à un gâteau

de résine électrisé négativement. Les pendules divergent aussitôt; mais ici l'écart du pendule inférieur ne saurait être attribué à l'attraction de l'électricité du plateau de résine, car cette attraction tend évidemment à maintenir le pendule vertical. Donc l'extrémité A est bien électrisée. On vérifie, comme pour le cylindre horizontal, qu'elle l'est positivement, et B négativement.

703. **Limite à l'électrisation par influence.** — L'action par influence qu'exerce un corps électrisé sur un corps voisin pour décomposer son électricité neutre est limitée. Pour le démontrer, sur un cylindre isolé, soumis à l'influence de la machine électrique, soit en n un élément de surface aussi petit qu'on voudra (fig. 575). L'électricité positive de la source m , que nous supposons constante, agit d'abord seule pour décomposer l'électricité neutre en n , attirer en A l'électricité négative et repousser en B la positive; mais à mesure que l'extrémité A se charge d'électricité négative, et l'extrémité B d'électricité positive, il se développe en A et en B deux forces f et f' agissant sur n en sens contraire de la source. En effet, les forces f et f' , tant par attraction que par répulsion, concourent pour appeler en B l'élec-

tricité négative de n , et en A l'électricité positive. Or la force induisante F , qui s'exerce en m , étant limitée, tandis que les forces f et f' sont croissantes, il arrive un moment où l'équilibre s'établit entre la force F et les forces f et f' . Alors toute décomposition cesse, et l'action induisante a atteint sa limite.

Si l'on éloigne le cylindre de la source m , l'action par influence décroissant, une portion des électricités libres en A et en B se recombine pour former de l'électricité neutre. Au contraire, si on

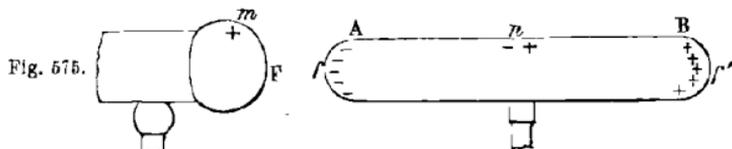


Fig. 575.

le rapproche, la force F l'emportant sur les forces f et f' , une nouvelle décomposition se produit, et de plus grandes quantités d'électricités positive et négative s'accablent en A et en B.

* 704. **Théorie de Faraday sur l'électrisation par influence, polarisation.** — La théorie de l'électrisation par influence, telle que nous venons de la faire connaître, est celle admise par tous les physiciens; mais les travaux de Faraday sur la polarité électrique tendent à la modifier. En effet, jusqu'à présent on n'avait pas tenu compte, dans les phénomènes que nous venons de considérer, du milieu qui sépare le corps électrisé de celui sur lequel il agit par influence. Or les nouvelles expériences de Faraday conduisent plutôt à admettre que c'est par l'intermédiaire même de ce milieu que s'opèrent tous les phénomènes par influence, et non par une action à distance, ou du moins à une distance qui excède pas l'intervalle entre deux molécules adjacentes. Faraday admet qu'il se produit alors dans le milieu intermédiaire, de molécule à molécule, une suite de décompositions d'électricité neutre telles, que chaque molécule prend deux pôles électriques contraires, et c'est cet état qu'il désigne sous le nom de *polarisation* de ce milieu. Ce serait donc, dans cette théorie, à la polarisation des molécules de l'air, ou d'un autre milieu, que serait due l'action qu'exercent les corps électrisés sur les corps à l'état neutre; tandis que, dans la théorie admise jusqu'ici, l'air ne joue qu'un rôle passif, et ne fait, par sa non-conductibilité, que s'opposer à la recombinaison des électricités contraires. En un mot, la théorie de Faraday tend à supprimer l'action à distance pour la remplacer par l'action continue et constante d'un milieu, d'une matière intermédiaire propre à transmettre l'action d'un corps à un autre. Remarquons que, dans la nouvelle théorie de l'électricité (688), le fluide éther qui remplit l'espace tient lieu du milieu intermédiaire que demandait Faraday.

En nommant *pouvoir inducteur* la propriété qu'ont les corps de transmettre au travers de leur masse l'influence électrique, Faraday trouve que tous les corps isolants n'ont pas le même pouvoir inducteur. Pour cela, il a fait usage de l'appareil représenté dans la figure 577, dont la figure 578 donne une coupe verticale. Il se compose d'une enveloppe sphérique PQ, formée de deux hémisphères de laiton, qui se séparent comme les hémisphères de Magdebourg (fig. 103, page 112), et comme eux s'appliquent bord à bord, de manière à fermer hermétiquement. Dans l'intérieur de cette enveloppe est une sphère de laiton C, d'un diamètre moindre que l'enveloppe et communiquant avec une boule extérieure B, au moyen d'une tige métallique qui est isolée de l'enveloppe PQ par une couche

épaisse de gomme laque A. Quant à l'intervalle mn , il est destiné à recevoir la substance dont on veut mesurer le pouvoir inducteur. Enfin, le pied de l'appareil porte un conduit à robinet, et peut se fixer sur la machine pneumatique lorsqu'on veut retirer l'air compris dans l'espace mn , ou le raréfier.

On a deux appareils semblables à celui que nous venons de décrire, identiques entre eux, et ne contenant d'abord tous les deux que de l'air dans l'intervalle mn ; puis, les enveloppes PQ communiquant avec le sol, on met la boule B de

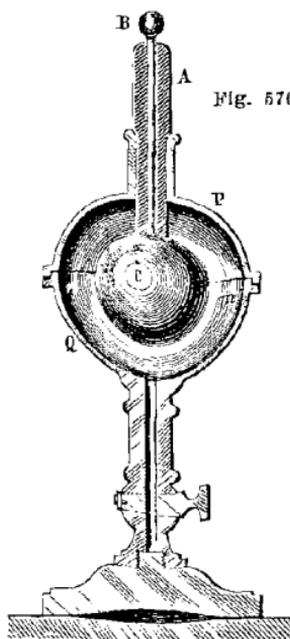


Fig. 576.

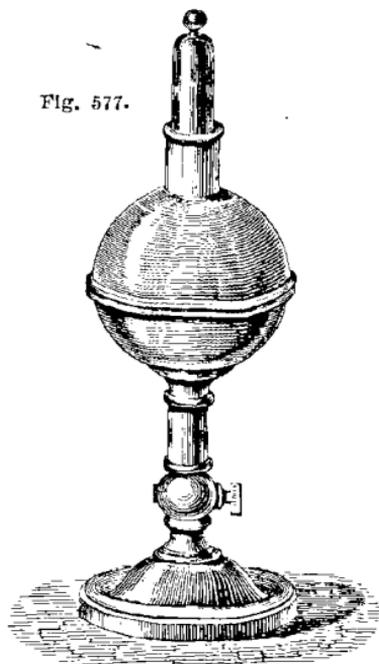


Fig. 577.

l'un des appareils en communication avec une source d'électricité. La sphère C se charge alors à la manière de l'armature intérieure de la bouteille de Leyde, la couche d'air mn représentant la lame isolante qui sépare les deux armatures. L'appareil une fois chargé, on mesure la tension de l'électricité restée libre sur la sphère C, en touchant la boule B avec un plan d'épreuve, et en portant celui-ci dans la balance de Coulomb. Faraday a obtenu ainsi une torsion de 250°, qui représentait la tension sur la sphère C. Mettant enfin la boule B de l'appareil ainsi chargé en communication avec la boule B du second appareil non encore chargé, on trouve, à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion, que la tension sur les deux sphères C est sensiblement 125, c'est-à-dire que l'électricité s'est distribuée également sur les deux appareils; ce qu'on pouvait prévoir d'avance, puisqu'ils sont identiques et contiennent tous les deux de l'air dans l'intervalle mn .

Cette première expérience faite, on la répète, mais en remplissant préalablement l'intervalle mn , dans le second appareil, de la substance dont on veut étudier le pouvoir inducteur, soit de gomme laque. Puis, ayant chargé l'autre appareil, celui dans lequel l'intervalle mn est toujours rempli d'air, on mesure la tension sur la boule C; supposons qu'elle soit 200, nombre trouvé par Faraday. Or, si actuellement on fait communiquer la boule B de l'appareil chargé avec la boule B de l'appareil où est la gomme laque, on ne trouve plus, comme ci-dessus,

que chaque appareil possède la moitié de 290, on 145. En effet, l'appareil à air accuse seulement une tension 114, et celui à gomme laque une tension 113. L'appareil à air qui avait 290, et n'a plus que 114, a donc perdu 176 : par conséquent, on devrait trouver sur l'appareil à gomme laque 176 au lieu de 113. Puisqu'on ne retrouve que 113, cela montre qu'une plus grande quantité d'électricité a été neutralisée au travers de la couche de gomme laque qu'au travers de la couche d'air de même épaisseur dans la première expérience, d'où l'on conclut que le pouvoir inducteur de la gomme laque est plus grand que celui de l'air¹.

En opérant comme ci-dessus, on trouve qu'en représentant par 1 le pouvoir inducteur de l'air, les pouvoirs inducteurs relatifs des substances suivantes sont :

Air	1,00	Cire jaune	1,86
Flint	1,76	Verre	1,90
Résine	1,77	Gomme laque	2,00
Poix	1,80	Soufre	2,24

Quant aux gaz, Faraday a trouvé qu'ils ont tous sensiblement le même pouvoir inducteur, et que ce pouvoir n'est modifié ni par la température ni par la pression du gaz.

D'après la capacité inductrice propre que possèdent les corps isolants, Faraday a donné à ces corps le nom de *diélectriques*, par opposition aux corps conducteurs qui ne jouissent pas de la même propriété. Le même physicien, qui a fait une étude approfondie du rôle joué par les diélectriques dans l'induction, est arrivé à ces deux résultats :

1° *Il n'y a point induction au travers des corps conducteurs lorsqu'ils sont en communication avec le sol.*

2° *L'induction d'un corps sur un autre peut s'exercer en ligne courbe quand entre les deux corps est interposé un diélectrique.*

Toutefois ces principes ne sont point acceptés par tous les physiciens, les expériences qui y ont conduit Faraday pouvant être interprétées autrement qu'elles ne l'ont été par ce savant.

Matteucci, qui a aussi étudié l'induction des corps électrisés sur les corps mauvais conducteurs, a été amené à admettre la polarisation électrique moléculaire; il a trouvé, en outre, que le pouvoir isolant d'une substance est d'autant plus grand, que sa polarisation moléculaire est plus faible.

Il résulte donc des travaux de Faraday et de ceux de Matteucci que les corps mauvais conducteurs peuvent transmettre lentement l'électricité non-seulement par leur surface, mais par leur masse. Par exemple, lorsqu'un bâton de résine est laissé quelque temps en contact avec une machine électrique chargée, on remarque qu'il est électrisé positivement sur une plus ou moins grande étendue. En le frottant alors avec de la laine, il s'électrise négativement, puis peu à peu il passe à l'état neutre, et enfin l'électricité positive reparait; ce qui résulte de ce que l'électricité de la machine ayant polarisé les molécules jusqu'à une certaine profondeur, ce sont celles-ci qui, réagissant ensuite sur la surface, la ramènent à l'état neutre, puis à l'état positif.

703. Communication de l'électricité à distance, décharge disruptive. — Dans l'expérience de la figure 573, les électricités contraires du conducteur M et du cylindre tendent à se réunir, et

1. « La théorie de Faraday, dit de la Rive, quoique ayant encore besoin d'être étudiée, mérite cependant déjà d'attirer l'attention sérieuse des physiciens. Elle semble reposer sur un principe juste, celui que les actions électriques ne se manifestent jamais que par l'intermédiaire des particules matérielles; elle tend à opérer un rapprochement remarquable entre les forces électriques et les autres forces de la nature. Enfin, des expériences de Faraday il résulte déjà un point important acquis à la science, savoir, le fait de la polarisation moléculaire dans les corps isolants, mode probable de propagation de l'électricité dans les corps conducteurs également. »

elles ne restent maintenues à la surface de ces deux corps que par la résistance de l'air; mais si la résistance diminue, ou si la tension augmente, la force attractive des deux électricités l'emporte sur l'obstacle qui les sépare, et elles se recomposent au travers de l'air, en donnant naissance à une étincelle plus ou moins vive, accompagnée d'un bruit sec. L'électricité négative du cylindre se trouvant ainsi neutralisée par l'électricité positive que lui a cédée la machine, il ne reste plus sur le premier que de l'électricité positive, qu'il conserve, quoique l'influence vienne à cesser.

Quant à la distance explosive, elle varie avec la tension, la forme des corps, leur pouvoir conducteur, et le plus ou moins de résistance des milieux ambiants.

La décharge qui se produit avec étincelle et avec bruit se désigne sous le nom de *décharge disruptive*, pour la distinguer de la décharge silencieuse qui s'opère entre un corps électrisé et le sol lorsqu'ils sont en communication par un conducteur.

706. **Mouvement des corps électrisés.** — La théorie de l'électrisation par influence donne l'explication des mouvements d'attraction et de répulsion que présentent entre eux les corps électrisés. En effet, étant donné un corps fixe M (fig. 578), que nous

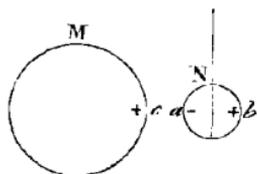


Fig. 578.

supposerons électrisé positivement, et un corps mobile N, placé à une petite distance du premier, on peut considérer trois cas :

1° *Le corps mobile est à l'état neutre et conducteur.* — Dans ce cas, le corps M, agissant par influence sur l'électricité neutre du corps N, attire l'électricité négative et repousse la positive, de sorte que le maximum de tension des deux électricités a lieu respectivement aux points *a* et *b*. Or, les actions électriques s'exerçant en raison inverse du carré de la distance, l'attraction entre les points *a* et *c* l'emporte sur la répulsion entre les points *b* et *c*, et le corps mobile s'approche du corps fixe par l'effet d'une résultante égale à l'excès de la force attractive sur la force répulsive.

2° *Le corps mobile est électrisé et conducteur.* — Si le corps mobile est chargé d'une électricité contraire à celle du corps M, il y a toujours attraction; s'il est chargé de la même électricité, il y a répulsion pour une certaine distance; mais plus près il peut y avoir attraction. En effet, outre l'électricité libre que contient déjà le corps mobile, il contient aussi de l'électricité neutre, et celle-ci étant décomposée par l'influence positive du corps M, l'hémisphère *b* reçoit une nouvelle quantité d'électricité positive, pendant que l'hémisphère *a* se charge d'électricité négative; il y a

done, comme dans le cas précédent, attraction et répulsion. La seconde force l'emporte d'abord sur la première, parce que la quantité d'électricité positive sur le corps N est plus grande que la quantité d'électricité négative; mais l'intervalle *ac* diminuant, la force attractive croît plus vite que la force répulsive, et peut finir par l'emporter sur elle.

3^o *Le corps mobile est mauvais conducteur.* — Si le corps mobile est mauvais conducteur et électrisé, il est repoussé ou attiré, selon qu'il est ou non chargé de la même électricité que le corps fixe. S'il est à l'état naturel, comme une source d'électricité puissante dont l'action se prolonge peut toujours, même dans les plus mauvais conducteurs, décomposer l'électricité neutre, celle-ci l'est, en effet, sous l'influence du corps M, si ce dernier est suffisamment électrisé, et alors il y a attraction.

707. **Électroscope à feuilles d'or.** — On a déjà vu (683) qu'on nomme *électrosopes* de petits appareils qui servent à reconnaître si un corps est électrisé et quelle est la nature de son électricité. Le pendule électrique déjà décrit est un électroscope. On a imaginé plusieurs sortes de ces appareils; nous ne décrirons, pour le moment, que l'électroscope à feuilles d'or; mais bientôt nous ferons connaître un autre appareil de ce genre, beaucoup plus sensible, l'*électromètre condensateur* de Volta (733).

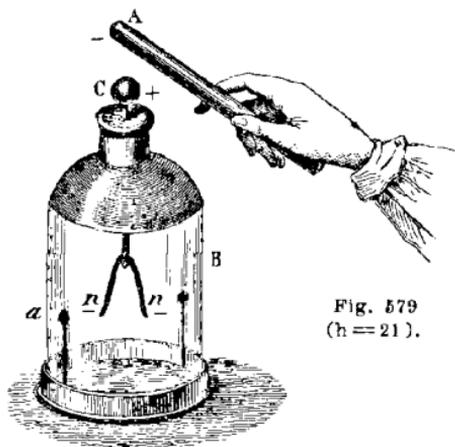


Fig. 579
(h = 21).

L'*électroscope à feuilles*

d'or consiste en un bocal de verre B (fig. 579), reposant sur un plateau de laiton, et dont le goulot est fermé par un bouchon recouvert d'un vernis isolant, ainsi que toute la partie supérieure du bocal. Dans le bouchon passe une tige de laiton terminée à l'extérieur par une boule C, de même métal, et à l'intérieur par deux feuilles d'or battu *n, n*, très-légères.

Lorsqu'on approche de cet appareil un corps chargé d'une électricité quelconque, négative par exemple, comme l'indique le dessin, cette électricité agissant par influence sur l'électricité neutre de la boule et de la tige, l'électricité positive est attirée dans la boule, et la négative repoussée vers les feuilles d'or. Celles-ci, se

trouvant ainsi chargées de la même électricité, se repoussent, et c'est là ce qui montre que le corps A est électrisé.

Si l'on ignore l'espèce d'électricité dont est chargé le corps qu'on a présenté à l'électroscope, il est facile de la reconnaître. Pour cela, tandis que l'instrument est sous l'influence du corps A, on touche la boule C avec le doigt. L'électricité de même nom que celle dont est chargé le corps A est alors repoussée dans le sol, et la boule reste chargée d'une électricité *contraire* à celle du corps (701). Les feuilles d'or retombent d'abord, toute l'électricité étant en C; mais retirant le doigt et ensuite le corps A, elles divergent de nouveau. Il reste à constater l'espèce d'électricité que conserve l'appareil. Pour cela, on approche lentement de la boule C un bâton de verre frotté avec de la laine. Si la divergence des feuilles d'or augmente, cela indique que l'électricité de l'électroscope est repoussée à la partie inférieure, d'où l'on conclut qu'elle est de même espèce que celle du verre, c'est-à-dire positive. Si la divergence diminue, c'est que l'électricité de l'appareil est attirée par celle du verre; elle est donc de nom contraire, c'est-à-dire négative.

Sur les parois intérieures du bocal sont collées deux bandes d'étain α opposées l'une à l'autre; elles ont pour but d'augmenter la sensibilité de l'électroscope, en se chargeant par influence d'électricité contraire à celle des feuilles d'or.

Dans des expériences récentes, Wheatstone a observé que les électromètres donnent souvent, surtout par un temps sec et froid, des indications contraires à celles qu'on en attend, et qui montrent que l'expérimentateur est lui-même électrisé. Ayant cherché la cause de ce phénomène, Wheatstone a constaté qu'en marchant, même lentement, dans un appartement dont l'air est bien sec, le frottement des semelles des chaussures suffit pour dégager une quantité notable d'électricité positive sur le parquet et d'électricité négative sur les chaussures. Se distribuant de celles-ci sur le corps de l'expérimentateur, c'est l'électricité négative qui vient troubler les indications des électroscopes; d'où résulte une cause d'erreur contre laquelle il importe de se mettre en garde.

MACHINES ÉLECTRIQUES

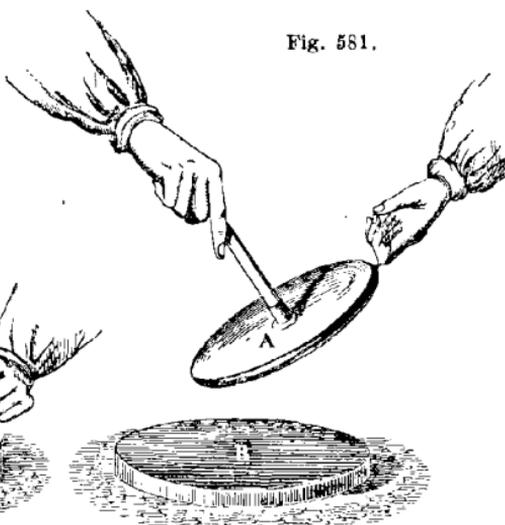
708. **Électrophore.** — Les *machines électriques* sont des appareils qui servent à obtenir un développement plus ou moins abondant d'électricité statique. La plus simple est l'*électrophore*, inventé par Volta. Il se compose d'un gâteau de résine B (fig. 581),

coulé sur un plateau de bois, et d'un disque de bois A, recouvert d'une feuille d'étain et muni d'un manche isolant de verre. Pour obtenir de l'électricité au moyen de cet appareil, on commence par sécher le gâteau de résine et le disque de bois en les chauffant doucement, puis on bat la résine avec une peau de chat, ce

Fig. 580.



Fig. 581.



qui l'électrise négativement. Posant alors le disque de bois recouvert d'étain sur la résine (fig. 580), celle-ci, qui est très-mauvais conducteur, conserve son électricité négative, et, par son influence sur le disque, attire l'électricité positive vers la face en contact avec elle, tandis qu'elle repousse sur l'autre la négative. Touchant donc la feuille d'étain avec le doigt, c'est l'électricité négative qu'on soustrait, et le disque de bois reste électrisé positivement. En effet, si on l'enlève d'une main par le manche de verre, et si on lui présente l'autre main (fig. 581), il jaillit une vive étincelle due à la recomposition de l'électricité positive du disque avec l'électricité négative de la main.

Dans un air sec, le gâteau de résine de l'électrophore, une fois électrisé, peut conserver son électricité pendant des mois entiers, et l'on peut obtenir, pendant tout ce temps, autant d'étincelles qu'on veut, sans battre de nouveau la résine avec la peau de chat, pourvu qu'on ait soin, à chaque fois, de toucher d'abord le disque recouvert d'étain, tandis qu'il est en contact avec la résine, puis une seconde fois, quand on le tient par le manche de verre.

M. Ducretet modifie l'électrophore en remplaçant le gâteau de résine par un disque d'ébonite de 4 millimètres d'épaisseur seu-

lement, et en plaçant sous celui-ci un disque de zinc mince de même diamètre. Ce zinc doit communiquer le plus intimement possible avec le sol par un fil de cuivre; quant au plateau de bois recouvert d'étain, il reste le même. Ainsi modifié, l'appareil donne des étincelles très-puissantes.

L'électrophore sert, en chimie, pour faire détoner, dans l'eudiomètre, des mélanges gazeux au moyen de l'étincelle électrique.

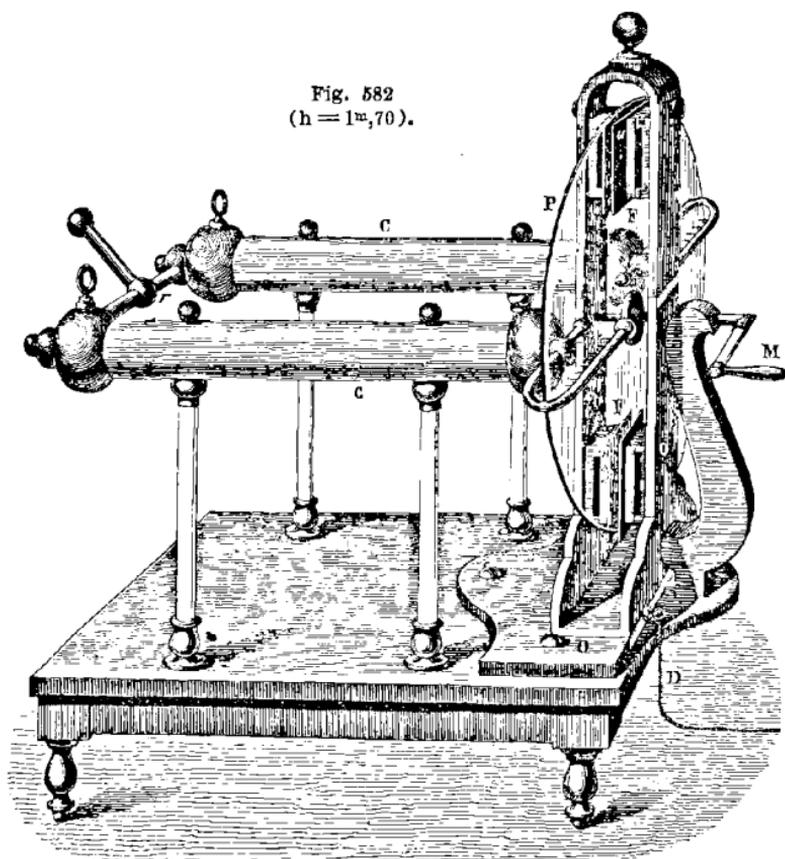
709. **Machine électrique de Ramsden.** — La première machine électrique est due à Otto de Guericke, le même qui a inventé la machine pneumatique. Elle consistait en une sphère de soufre fixée à un axe qu'on tournait d'une main, tandis que l'autre appuyait sur la sphère et servait de frottoir. Bientôt on substitua à la boule de soufre un cylindre de résine que Hawksbee remplaça par un cylindre de verre; mais la main servait toujours de frottoir. Vers 1740, Winkler fit usage, le premier, comme frottoir, d'un coussin de soie rembourré de crin. A la même époque, Bose recueillit, sur un disque de fer-blanc suspendu à deux cordons de soie, l'électricité dégagée par le frottement. Enfin, en 1766, Ramsden, à Londres, substitua au cylindre de verre un plateau circulaire de verre, frotté par quatre coussins. Dès lors la machine électrique prit la forme qu'on lui donne aujourd'hui.

Entre deux montants de bois (fig. 582) est un plateau circulaire P, de verre, fixé par son centre à un axe qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Ce plateau, suivant son diamètre vertical, est pressé entre quatre *frottoirs* ou *coussins* F, de cuir ou de soie. Suivant son diamètre horizontal, il passe entre deux tubes de laiton recourbés en fer à cheval, qu'on appelle *peignes* ou *mâchoires*, parce qu'ils sont armés de dents placées, des deux côtés, en regard du plateau. Ces peignes sont fixés à des tubes plus gros C, qu'on nomme les *conducteurs*. Ces derniers, isolés sur quatre pieds de verre, sont reliés entre eux par un tube *r* d'un plus petit diamètre. Enfin, des bandes d'étain O, collées des deux côtés des montants de bois qui portent les coussins, font communiquer ceux-ci avec une chaîne métallique D et avec le sol.

Ces détails connus, la théorie de la machine électrique est fondée sur l'électrisation par frottement et par influence : pendant son mouvement de rotation, le plateau, en frottant contre les coussins, se charge d'électricité positive, et ceux-ci d'électricité négative. Or cette dernière se perd dans le sol par les bandes d'étain O et la chaîne D, tandis que l'électricité du plateau, ne pouvant s'écouler, reste sur ses deux faces sans produire aucun effet pendant un quart de tour, c'est-à-dire depuis le coussin supérieur aF, par exemple, jusqu'à la mâchoire de droite. Là, l'électricité

positive du verre, agissant par influence sur le peigne et sur les conducteurs, en décompose l'électricité neutre, repousse la positive et soutire par les pointes la négative, qui vient se réunir à l'électricité positive du plateau. La portion de celui-ci qui vient d'agir

Fig. 582
(h = 1^m,70).



sur les conducteurs se trouve donc ramenée à l'état neutre jusqu'à ce qu'elle vienne passer entre les coussins inférieurs. Là elle s'électrise de nouveau, et agit ensuite sur le deuxième peigne comme sur le premier; et ainsi de suite. Le plateau ne cède donc rien aux conducteurs; il ne fait qu'en soutirer l'électricité négative, et c'est ainsi qu'ils restent chargés d'électricité positive.

La machine une fois chargée, si l'on en approche la main, on tire une forte étincelle, qui se renouvelle tout le temps qu'on tourne le plateau; car l'étincelle étant le résultat de la combi-

raison des électricités contraires de la main et de la machine, celle-ci tend, à chaque étincelle, à revenir à l'état neutre; mais au fur et à mesure l'influence du plateau l'électrise de nouveau.

710. Soins à donner aux machines électriques. — Pour donner à une machine électrique toute son activité, il importe de dessécher avec soin les supports, le plateau et les coussins. Pour cela, on les chauffe doucement, et on les essuie avec un linge chaud.

Les coussins méritent une attention toute particulière, tant pour leur disposition que pour leur bon état d'entretien. Ceux qui sont le plus en usage sont de cuir mince, rembourrés de crin et enduits d'*or mussif*, matière pulvérulente qui n'est autre chose que du deutio-sulfure d'étain, et qui augmente beaucoup le développement de l'électricité, probablement par une décomposition chimique, comme l'indique l'odeur sulfureuse que répandent les coussins pendant le frottement. Cependant, tout en reconnaissant que les substances oxydables, et qui dans les actions chimiques donnent les effets les plus énergiques, sont aussi celles qui dans le frottement dégagent le plus d'électricité, M. Ed. Becquerel admet que l'état moléculaire des corps frottés influe beaucoup sur les résultats obtenus. En effet, il a constaté par l'expérience que les corps en poudre et doux au toucher, comme l'*or mussif*, le talc, la plombagine, la farine, la fleur de soufre, le charbon de coke, développent beaucoup d'électricité par le frottement.

Afin d'éviter la déperdition de l'électricité du plateau par l'air, on fixe quelquefois aux montants de bois deux quarts de cercle de taffetas gommé, qui enveloppent le verre sur ses deux faces, l'un à droite du coussin *a*, et l'autre en bas, dans la partie opposée. Ces taffetas ne sont pas représentés dans le dessin. On a constaté que c'est la soie jaune, mince et huilée, qui donne les meilleurs effets; il importe que les taffetas ne soient gommés que d'un seul côté, celui qui n'est pas appliqué sur le verre; enfin il faut encore qu'il y ait contact parfait entre l'étoffe et le plateau de verre.

La machine de Ramsden, disposée comme le montre la figure 582, donne de l'électricité positive; mais on peut lui faire donner de l'électricité négative. Pour cela, on isole les quatre pieds de la table sur des supports épais de verre ou de résine, puis on fait communiquer les conducteurs *C* avec le sol. Tournant ensuite le plateau, l'électricité positive des conducteurs se perd dans le sol, tandis que l'électricité négative des coussins se répand dans les montants qui soutiennent le plateau. En effet, si l'on approche la main d'une boule métallique fixée au sommet des montants, ou des bandes d'étain *O*, on en tire des étincelles.

711. Tension maximum. — Même lorsqu'on observe toutes les

conditions que nous venons de faire connaître, la tension sur la machine a une limite qui ne peut être dépassée, quels que soient la vitesse de rotation du plateau et le temps pendant lequel on le tourne. Abstraction faite de toute déperdition, cette limite est atteinte lorsque la tension sur les conducteurs fait équilibre à l'action par influence du plateau. Mais pratiquement la charge de la machine ne s'élève jamais jusqu'à cette limite, à cause des déperditions qui se produisent : 1° par l'air et la vapeur d'eau qu'il contient; 2° par les supports; 3° par la recombinaison d'une portion des deux *électricités des coussins et du plateau*.

On a déjà examiné les deux premières causes de déperdition (699); pour nous rendre compte de la troisième, observons que la tension sur le plateau croissant avec la rotation, il vient un moment où elle l'emporte sur la résistance que présente le verre à l'écoulement de son *électricité*. A partir de cet instant, une portion des *électricités* contraires développées sur le plateau et les coussins se recompose pour former de l'*électricité* neutre. Pour éviter cette cause de déperdition, il importe de faire communiquer les coussins avec le sol le plus intimement possible, afin que leur *électricité*, s'écoulant dans la terre, ne vienne pas neutraliser celle du plateau. C'est dans ce but que sont collées le long des montants de bois de la machine les feuilles d'étain O (fig. 582), qui descendent des coussins jusqu'à la chaîne D. Enfin, celle-ci doit plonger dans l'eau d'un puits, ou communiquer avec un pied d'arbre, ou, s'il est possible, avec une des colonnes de fonte qui supportent les becs de gaz.

712. **Électromètre de Henley.** — La tension de l'*électricité* sur les machines électriques se mesure par l'*électromètre à cadran*, ou *électromètre de Henley*. On nomme ainsi un petit pendule électrique consistant en une tige de bois *d* à laquelle est fixé un cadran d'ivoire *c* (fig. 583). Au centre de ce dernier est un axe autour duquel tourne une aiguille de fanon de baleine terminée par une boule de moelle de sureau *a*. L'instrument étant vissé sur l'un des conducteurs, à mesure que la machine se charge, l'aiguille diverge et cesse de monter quand le maximum de tension est atteint. Si l'on cesse alors de tourner le plateau, l'aiguille retombe rapidement dans l'air humide; dans l'air sec elle ne retombe que lentement, ce qui indique que la déperdition est faible.

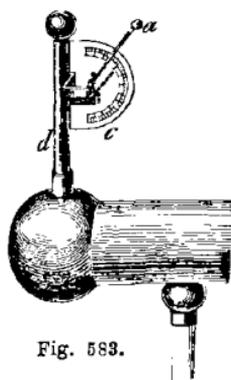


Fig. 583.

713. **Conducteurs secondaires.** — On nomme *conducteurs secondaires* de gros cylindres de cuivre, de fer-blanc ou de bois recouvert d'étain, qu'on isole à l'aide de pieds de verre ou en les suspendant à des cordons de soie, et qu'on met ensuite en communication avec les conducteurs de la machine électrique. La surface sur laquelle s'accumule l'électricité se trouvant ainsi augmentée, la tension ne croît pas; mais la quantité d'électricité recueillie augmente, à tension égale, proportionnellement à la surface. En effet, lorsqu'on décharge alors la machine en la faisant communiquer avec le sol, on en tire des étincelles beaucoup plus intenses et produisant un vif éclat dans l'air.

714. **Machines de Nairne et de Van Marum.** — Nairne, en Angleterre, a imaginé, dans le but d'électriser les malades, une

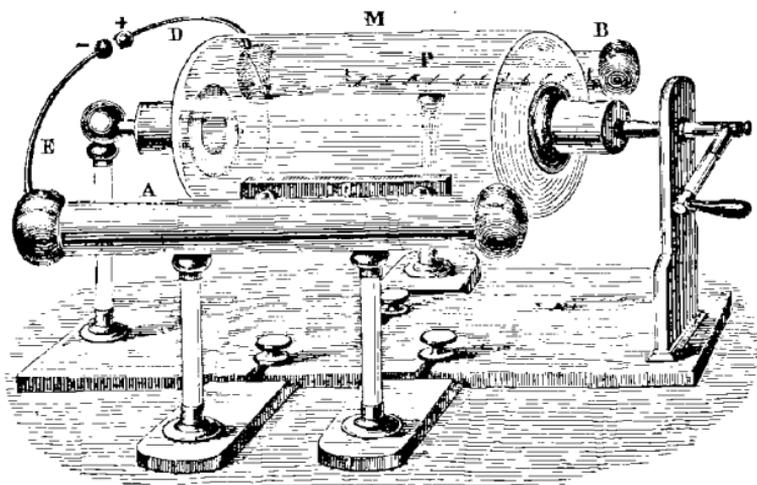


Fig. 584 (h = 70).

machine électrique au moyen de laquelle on recueille séparément les deux électricités. Elle se compose de deux conducteurs isolés, ne communiquant pas entre eux (fig. 584). L'un porte un frottoir de cuir C, et l'autre un peigne P. Entre les conducteurs est un manchon de verre M, qu'on tourne avec une manivelle, et qui d'un côté touche le frottoir, et de l'autre passe très-près du peigne.

Lorsqu'on tourne le manchon, le frottoir C et le conducteur A s'électrisent négativement, et le verre positivement. Or celui-ci, en rasant les pointes du peigne, décompose son électricité neutre et soutire l'électricité négative, d'où il résulte que le conducteur B reste électrisé positivement. Deux tiges D et E se terminent par

deux boules de cuivre assez rapprochées pour qu'il en parte constamment une série d'étincelles provenant de la recombinaison des électricités des conducteurs.

La *machine de Van Marum* est une machine à l'aide de laquelle on obtient à volonté l'une ou l'autre électricité. Elle se compose d'un plateau *P* (fig. 585) tournant entre quatre coussins *c* isolés sur pieds de verre. En avant et en arrière du plateau sont deux arcs de cuivre *a* et *d*, pouvant être disposés à volonté horizontalement ou verticalement, et terminés à leurs extrémités par des godets de cuivre au centre desquels est une pointe servant de peigne. Les arcs *a* et *d* sont toujours en croix, de façon que les peignes de l'un correspondant au plateau, ceux de l'autre correspondent aux coussins. Si ce sont les peignes de l'arc *d* qui correspondent aux coussins (fig. 585), une boule de cuivre *A*

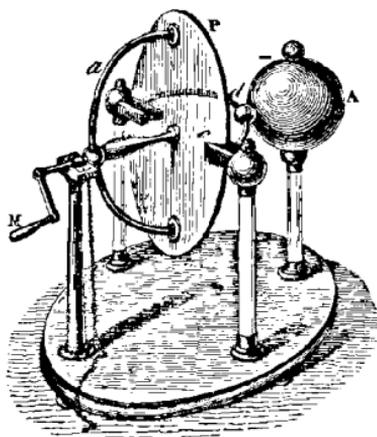


Fig. 585.

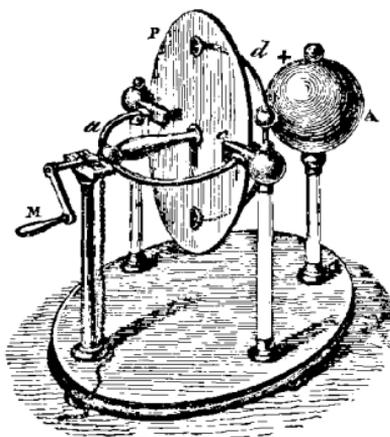


Fig. 586.

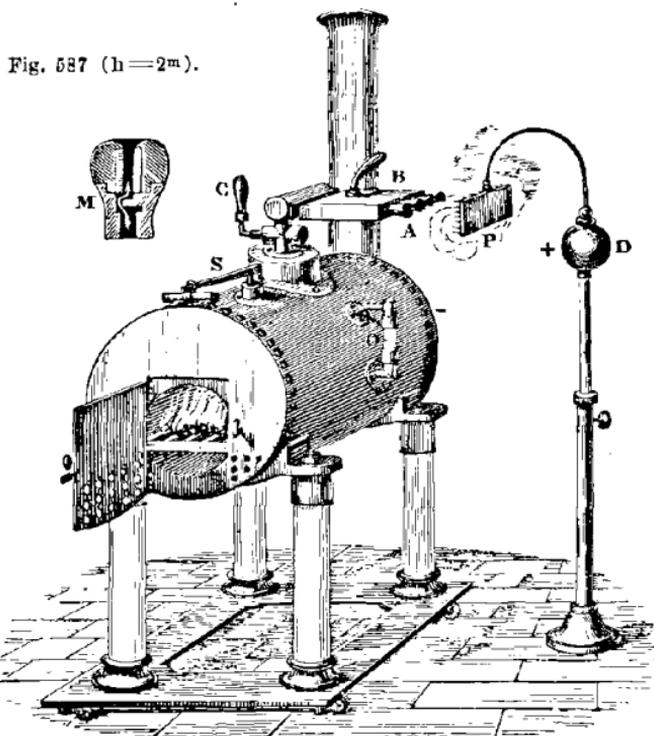
isolée, qui porte l'arc *d*, s'électrise négativement; si ce sont les peignes de l'arc *a* (fig. 586), la même boule *A* s'électrise positivement.

Les machines de Nairne et de Van Marum sont sans usage aujourd'hui, et ne mériteraient plus d'être données dans les cours.

715. Machine hydro-électrique d'Armstrong. — Dans cette machine, la production de l'électricité est due au dégagement de la vapeur d'eau par de petits orifices. Cette machine a été inventée par M. Armstrong, physicien anglais, après la découverte d'un fait nouveau qui fut observé, en 1840, près de Newcastle, sur une chaudière de machine à vapeur. Une fuite s'étant déclarée à la soupape de sûreté, le chauffeur se trouvait avoir une main près du jet de vapeur, et allongeait l'autre pour saisir le levier

de la soupape, lorsqu'il reçut, au même moment, une forte commotion, et aperçut une vive étincelle entre le levier et sa main.

Informé de ce phénomène, M. Armstrong le reproduisit sur d'autres chaudières, et reconnut que la vapeur dégagée était



chargée d'électricité positive. En expérimentant sur une locomotive qu'il avait isolée, il observa qu'elle s'électrisait négativement lorsqu'on soustrait par des pointes métalliques, à la vapeur d'eau qui s'échappait dans l'atmosphère, son électricité positive, et il obtint ainsi de très-fortes étincelles. C'est alors qu'il fit construire la machine représentée ci-dessus (fig. 587).

C'est une chaudière de tôle, à foyer intérieur, isolée sur quatre pieds de verre. Sa longueur est de près de 1^m,50, et son diamètre de 0^m,60. Un tube de cristal O, placé sur la droite de la chaudière et communiquant avec elle par les deux bouts, indique le niveau de l'eau à l'intérieur. Un manomètre à air comprimé, qui n'est pas représenté dans le dessin, marque la pression. Sur la chaudière est un robinet C, qu'on ouvre quand la vapeur a acquis une tension suffisante. Au-dessus de ce robinet est une boîte B dans la-

quelle circulent les tubes par lesquels se dégage la vapeur. Ces tubes sont terminés par des ajutages A représentés, à gauche du dessin, sur une plus grande échelle, par la coupe M. L'intérieur de ces ajutages est de bois dur et contourné, comme le montre la flèche, ce qui augmente le frottement. Enfin, la boîte B est remplie d'eau pour refroidir les tubes d'échappement. La vapeur, avant d'atteindre les ajutages de sortie, éprouve ainsi un commencement de condensation, et sort mélangée de vésicules d'eau, condition nécessaire; car, d'après les expériences de Faraday, il ne se dégage pas d'électricité par le passage de la vapeur *sèche*.

On avait d'abord attribué le développement de l'électricité, dans la machine hydro-électrique, à la condensation de la vapeur; mais d'après Faraday, qui a fait de nombreuses expériences sur cette machine, le développement de l'électricité est uniquement dû au frottement des globules d'eau contre la paroi des ajutages de sortie. En effet, les autres conditions restant les mêmes, si l'on change les cylindres de bois qui garnissent l'intérieur des tubes A, l'espèce d'électricité que prend la chaudière n'est plus la même; une garniture d'ivoire ne donne aucune trace d'électricité. La même chose a lieu si l'on introduit une matière grasse dans la chaudière, et les garnitures employées dans ce cas sont mises hors de service. Il n'y a dégagement d'électricité que lorsque l'eau est pure, et alors la chaudière est électrisée négativement et la vapeur positivement. Si l'on ajoute de l'essence de térébenthine, l'effet est inverse, c'est-à-dire que la vapeur s'électrise négativement et la chaudière positivement. L'introduction d'une dissolution saline ou d'un acide fait cesser tout dégagement d'électricité.

Faraday a encore obtenu de l'électricité avec un courant d'air humide; mais avec l'air sec il n'y a aucun effet.

716. Machine électrique de Holtz. — Dans les machines décrites ci-dessus, c'est au frottement qu'est due la production de l'électricité, frottement dû lui-même au mouvement engendré par le travail mécanique d'un moteur; ce qui montre que le mouvement, qu'on a déjà vu se transformer en chaleur (408), peut aussi se transformer en électricité.

Cette transformation est surtout apparente dans les machines électriques sans frottement que l'on construit depuis quelques années, machines dans lesquelles l'électricité est développée par l'induction qu'exerce un corps électrisé fixe sur un corps en mouvement. Des machines de ce genre ont été construites, en 1865, par Tœpler, et, à la même époque, par Holtz; mais, dès la fin du siècle dernier, des machines électriques fondées sur le même principe avaient été construites en Angleterre.

La machine de Holtz se compose de deux plateaux de verre mince, distants l'un de l'autre de 3 millimètres, et de diamètres inégaux (fig. 588). Le plus grand, AA, qui a 60 centimètres de diamètre, est fixe, maintenu par quatre galets de bois *a* portés par des axes et des pieds de verre. En avant du plateau A est le second, BB, d'un diamètre de 55 centimètres seulement, et tournant

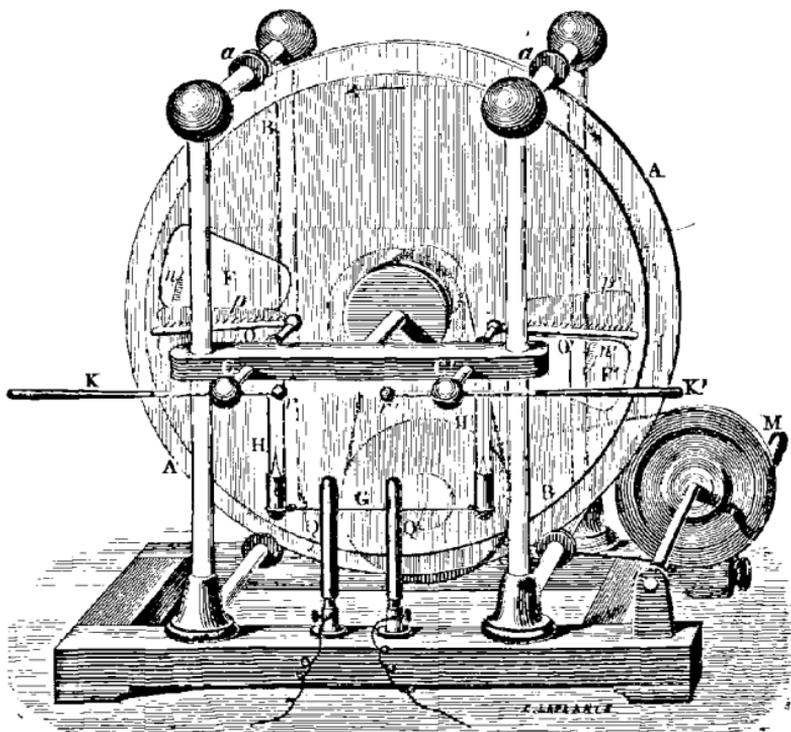


Fig. 588 (h = 0^m,70).

avec un axe horizontal de verre, qui traverse librement une ouverture centrale pratiquée dans le grand plateau. Le plateau B est plein dans toute son étendue, tandis que le plateau A est percé, suivant un même diamètre, de deux grandes ouvertures, ou *fenêtres*, F, F'. Le long du bord inférieur de la fenêtre F, sur la face postérieure du plateau, est collée une bande de papier *p*, et sur la face antérieure une languette *n* de carton mince, réunie à la bande *p* par une bandelette de papier, qui passe par-dessus le bord de la fenêtre. Sur la fenêtre F', le bord supérieur est armé de la même manière d'une bande de papier *p'* et d'une languette *n'*. Les bandes de papier *p*, *p'* sont les *armures*. Les deux plateaux, les armures

et leurs languettes sont recouverts avec soin d'une couche de vernis à la gomme laque, surtout les bords des languettes.

En avant du plateau B, à la hauteur des armures, sont deux *peignes* de cuivre O, O', supportés par deux conducteurs de même métal C, C'. A leurs extrémités antérieures, ceux-ci se terminent par deux boules assez grosses, que traversent deux tiges de cuivre terminées par deux boules plus petites *r*, *r'*, et munies de poignées de bois K, K'. Ces tiges peuvent non-seulement glisser à frottement doux dans les grosses boules, mais tourner avec elles, de manière à être plus ou moins rapprochées et inclinées. La rotation du plateau B s'obtient à l'aide d'une manivelle M et d'une suite de poulies et de courroies sans fin; sa vitesse est de 12 à 15 tours par seconde, et la rotation doit avoir lieu dans le sens des flèches, c'est-à-dire vers les pointes des languettes *n*, *n'*.

Pour que la machine fonctionne, il ne suffit pas de faire tourner le plateau B, il faut commencer par *amorcer* les armures *p*, *p'*, c'est-à-dire par les électriser, l'une positivement, l'autre négativement. Pour cela on fait usage d'une plaque d'ébonite qu'on électrise en la frottant avec une peau de chat, ou avec la main; puis, ayant mis en contact les boules *r*, *r'*, on approche la plaque électrisée derrière une des armures, *p* par exemple, et on fait marcher le plateau B. La plaque d'ébonite chargée d'électricité négative, agissant par influence sur l'armure *p*, en soutire par la languette *n* l'électricité positive et la charge négativement. Puis, l'électricité négative de *p* induisant à travers le plateau B, à mesure qu'il tourne, le conducteur OC, soutire par les pointes du peigne O l'électricité positive, qui se dépose sur la face antérieure de B, tandis que l'électricité négative est repoussée dans la boule C. Or, la rotation du plateau B continuant, la portion positive de sa surface arrive devant la fenêtre F', où elle charge positivement l'armure *p'* en lui enlevant, par la languette *n'*, son électricité négative, qui vient neutraliser la positive de B.

Les deux armures sont alors amorcées, et la deuxième, induisant le conducteur O'C', en soutire par le peigne O' l'électricité négative, qui se rend sur la moitié supérieure du plateau B, tandis que la boule C' se charge d'électricité positive. Supprimant actuellement la plaque induisante d'ébonite, écartant les boules *r*, *r'* comme le montre la figure, et continuant à tourner, un torrent d'étincelles jaillit sans interruption d'une boule à l'autre.

A plateaux égaux, la machine de Holtz est beaucoup plus puissante que la machine ordinaire (fig. 582). On augmente encore sa puissance en suspendant aux conducteurs C, C', deux *condensateurs* H, H', qui consistent en deux éprouvettes de verre

épais, dont les parois intérieures et extérieures sont recouvertes d'une feuille d'étain jusqu'à un cinquième de leur hauteur. Chaque éprouvette est fermée par un bouchon dans lequel passe une tige de cuivre à crochet, communiquant d'un bout à la feuille d'étain intérieure, et suspendue de l'autre à un des conducteurs. A l'extérieur, les deux feuilles d'étain sont en communication par un conducteur G. En réalité, ces éprouvettes ne sont autre chose que deux petites bouteilles de Leyde (730), se chargeant, l'une H, d'électricité négative à l'intérieur et positive à l'extérieur, l'autre H', d'électricité positive à l'intérieur et négative à l'extérieur. Se chargeant par l'intermédiaire de la machine, et se déchargeant au fur et à mesure par les boules r, r' , elles renforcent l'étincelle, qui atteint alors jusqu'à 17 centimètres.

Pour utiliser le courant de la machine de Holtz, on dispose en avant du bâti deux bornes de laiton Q, Q', desquelles partent deux fils de cuivre; puis, au moyen des poignées K, K', on incline les tiges qui portent les boules r, r' , de manière à mettre celles-ci en contact avec les bornes. Dirigeant alors le courant par les fils, on charge en quelques secondes une batterie de six becaux (732), on décompose l'eau, et l'on fait marcher le galvanomètre et les tubes de Geissler (895), comme avec la pile voltaïque.

La machine de Holtz est d'un petit volume, et demande, pour être mise en mouvement, moins de force que les machines à frottoirs. Toutefois, quand on fait tourner le plateau avant d'avoir électrisé les armures, puis lorsqu'elles le sont, on éprouve, dans le second cas, une résistance plus grande : c'est le travail mécanique déployé par l'opérateur qui est transformé en électricité.

Les machines de Holtz construites aujourd'hui par Ruhmkorff sont toutes à quatre plateaux, les deux intérieurs fixes et à frotteurs, les deux extérieurs mobiles et pleins, et les deux condensateurs plus grands. Ces machines ne sont pas seulement plus puissantes, mais conservent leur électricité beaucoup plus longtemps que les machines à deux plateaux. Elles donnent des étincelles de 20 centimètres, très-nourries et très-bruyantes.

717. Machine diélectrique de Carré. Cette machine, due à M. F. Carré, à Paris, est une combinaison de la machine de Holtz et de l'ancienne machine à frottement; ce qui fait qu'elle s'amorce elle-même.

Elle se compose de deux plateaux tournant en sens contraires, dont le plus grand, B, est d'ébonite, et le plus petit, A, de verre (fig. 589). Ils se recouvrent mutuellement des $\frac{2}{5}$ aux $\frac{3}{4}$ de leurs rayons; et le plateau A tourne lentement au moyen d'une manivelle M, tandis que le plateau B reçoit un mouvement de

rotation rapide d'une courroie sans fin qui va d'une grande à une petite poulie.

Le plateau A, après s'être électrisé positivement entre deux frottoirs F, F', agit par induction, à travers le plateau B, sur

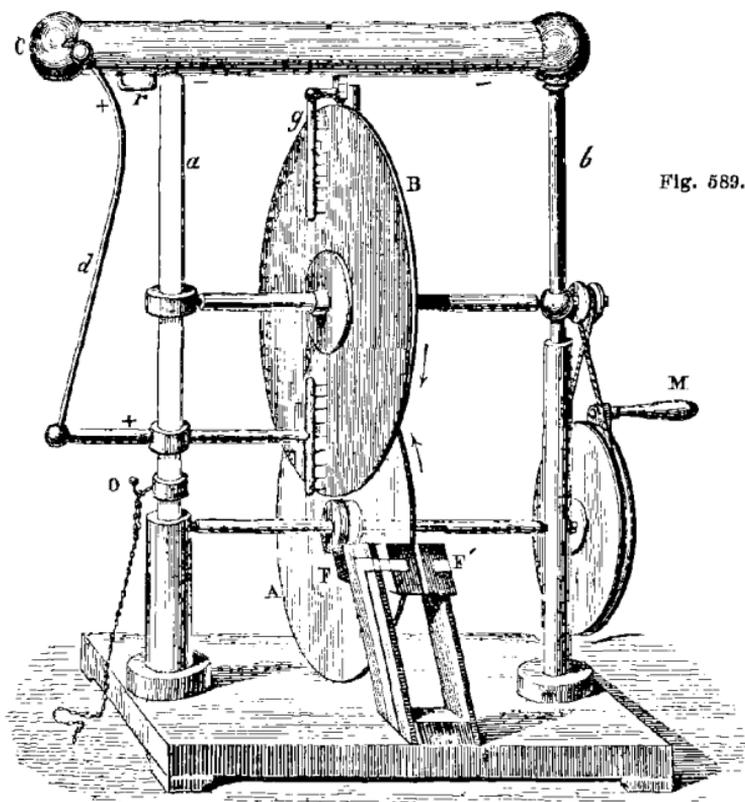


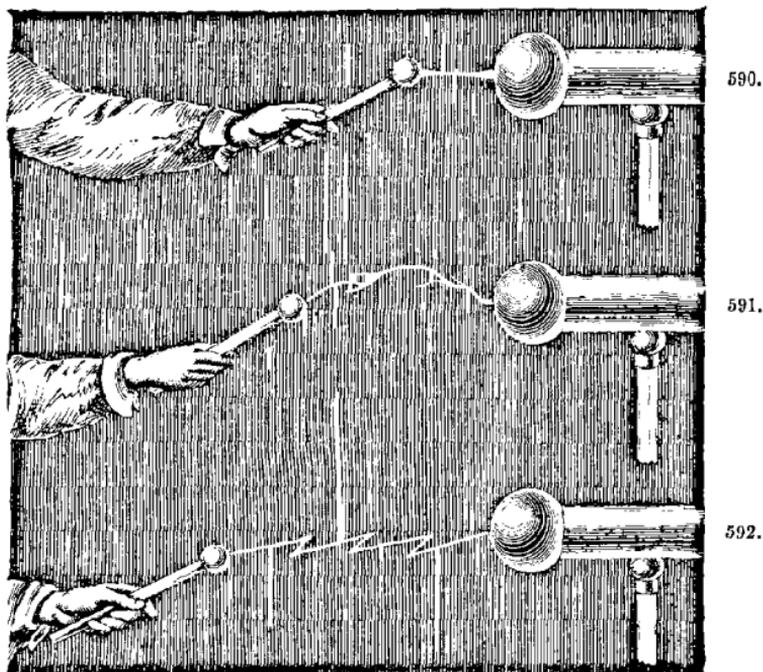
Fig. 589.

un peigne *i*, et en soutirant l'électricité négative, qui se dépose sur le plateau B, le conducteur *d* fixé au peigne s'électrise positivement. Puis le plateau B tournant rapidement, son électricité négative va induire un second peigne *g* et en soutirer l'électricité positive. Le plateau B revient donc à l'état neutre, tandis qu'un fort conducteur C lié au peigne *g* se charge d'électricité négative.

Des étincelles éclatent alors d'une manière continue de la boule *e* au conducteur C. Avec des plateaux dont les dimensions respectives sont de 38 et 49 centimètres de diamètre, les étincelles atteignent 15 centimètres, et plus lorsqu'on ajoute un condensateur comme dans la machine de Holtz.

EXPÉRIENCES AVEC LES MACHINES ÉLECTRIQUES

718. **Étincelle électrique.** — Un des premiers phénomènes qu'on observe lorsqu'on expérimente avec une machine électrique, est la vive étincelle qu'on tire des conducteurs en approchant la



main. On a déjà vu que la cause de ce phénomène est l'action par influence qu'exerce l'électricité positive de la machine sur l'électricité neutre de la main. Cette électricité étant décomposée, l'attraction entre les électricités contraires de la machine et de la main finit par l'emporter sur la résistance de l'air ; à ce moment, les deux électricités se recomposent avec bruit et lumière, l'étincelle apparaît vive, instantanée, et accompagnée d'une piqûre plus ou moins forte, selon la puissance de la machine.

La forme de l'étincelle est variable. Si elle éclate à une faible distance, elle est rectiligne (fig. 590). Au delà de 6 à 7 centimètres de longueur, l'étincelle devient irrégulière et présente la forme d'une courbe sinueuse, accompagnée de ramifications très-déliées (fig. 591). Enfin, si la décharge est très-forte, l'étincelle prend

la forme en zigzag (fig. 592). Ce sont les deux dernières formes que présentent les éclairs dans les nuées orageuses.

719. **Durée de l'étincelle électrique.** — Wheatstone, en Angleterre, avait déjà cherché à rendre appréciable la durée de l'étincelle électrique par la méthode du miroir tournant employée par Foucault à la recherche de la vitesse de la lumière (485), et il avait trouvé qu'avec une vitesse de rotation suffisante, les étincelles donnaient des images allongées dans le sens de la rotation, ce qui rendait la durée de l'étincelle appréciable.

Plus tard, Arago, en France, pour rendre sensible la durée des éclairs, fit usage d'un disque métallique tournant autour d'un axe perpendiculaire à son plan. Ce disque était divisé, dans le sens des rayons et à des intervalles égaux, par des ouvertures longitudinales très-étroites qui laissaient passer la lumière. En regardant les éclairs à travers ce disque animé d'une vitesse de rotation connue, les traits paraissaient d'autant plus larges, que la durée de l'éclair était plus grande.

En 1870, MM. Lucas et Cazin ont adopté une méthode plus précise, celle du chronoscope à étincelles électriques, qui permet de mesurer la durée de l'étincelle en millièmes de seconde. Cet instrument est une application du vernier. Un disque de mica, de 0^m,15 de diamètre, est noirci sur une de ses faces, et sur son contour sont tracées 180 divisions égales, en traits transparents très-fins. Le disque est monté sur un axe horizontal, qui reçoit d'une machine à gaz, à l'aide d'un système d'engrenages, une vitesse de rotation de 100 à 300 tours par seconde (fig. 594).

Un second disque, de verre argenté, de même rayon et centré sur le même axe que le premier, en est fixé très-près. Sur son bord supérieur sont tracés six traits transparents équidistants, faisant vernier avec les traits du disque de mica. Pour

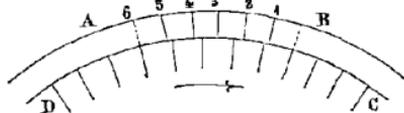


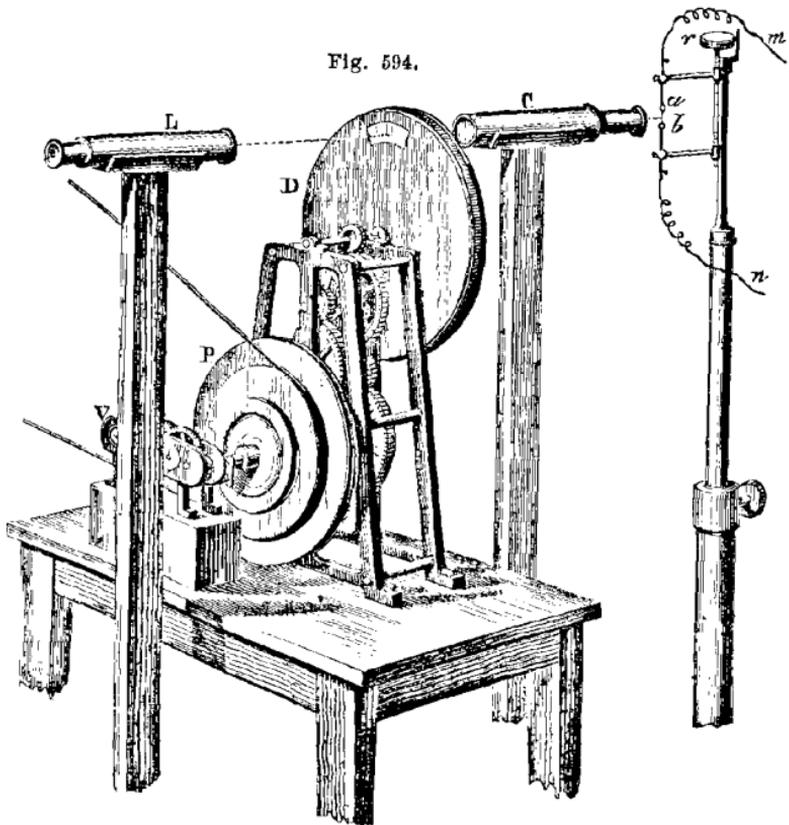
Fig. 593.

cela, l'intervalle de deux traits consécutifs sur les deux disques est tel, qu'à 5 divisions du disque de mica DC correspondent 6 divisions du disque de verre AB, comme le montre la figure 593; d'où le vernier donne les sixièmes de division du disque de mica (12). Dans l'appareil, les traits AB ne sont pas au-dessus des traits CD, mais à la même distance de l'axe, de manière que les derniers viennent successivement coïncider avec les premiers.

Le disque de mica est renfermé dans une caisse de laiton D (fig. 594), dont la face postérieure, qui est fixe, porte le vernier.

La face antérieure est percée d'une fenêtre *O*, fermée par une glace de verre, à travers laquelle on observe les coïncidences des traits du vernier et du disque avec une lunette grossissante *L*.

Le mouvement est transmis aux engrenages et au disque par



une courroie sans fin qu'on fait passer à volonté sur l'une des trois poulies *P*, d'inégal diamètre, afin de faire varier la vitesse. A l'extrémité de l'axe des poulies est fixée une tige coudée qui fait marcher un compteur *V*, marquant, sur trois cadrans, les nombres de tours du disque en unités, dizaines et centaines.

La source électrique est une batterie de 1 à 9 jarres (732), ayant chacune 1243 centimètres carrés de surface extérieure, et chargées d'une manière continue par une machine de Holtz. Les étincelles éclatent entre deux boules de métal *a* et *b*, de 11 millimètres de diamètre. On fait varier la distance de ces boules par une vis de rappel dont le bouton *r* est gradué de manière à faire

micromètre. Les deux électricités contraires arrivent aux boules par les fils *m* et *n*, et les étincelles éclatent au foyer principal d'une lentille convergente placée dans le tube C, laquelle rend parallèle le faisceau qui tombe sur le vernier.

Ces détails connus, soit la vitesse du disque de 400 tours par seconde. Il passe devant l'œil de l'observateur, par seconde, 400×180 , ou 72 000 traits; il s'écoule donc entre le passage de deux traits consécutifs $\frac{1}{72\,000}$ de seconde. Or, l'étincelle n'étant visible que lorsqu'il y a coïncidence entre un trait du disque et l'un des six traits du vernier, et celui-ci donnant les sixièmes de division du disque mobile, lorsque ce dernier a tourné de $\frac{1}{6}$ de division, une deuxième coïncidence se produit; d'où l'intervalle entre deux coïncidences est $\frac{1}{72\,000 \times 6} = 0,000\,0023$ de seconde.

Cela posé, soit la durée de l'étincelle comprise entre 23 et 46 dix millionnièmes de seconde, si elle éclate à l'instant d'une coïncidence, elle durera encore à la coïncidence suivante, et à cause de la persistance de l'impression sur la rétine (607) l'observateur verra deux traits lumineux. Mais si l'étincelle éclate entre deux coïncidences, et a cessé quand se produit la troisième, on ne voit qu'un trait brillant. Donc, lorsqu'avec la vitesse ci-dessus on voit tantôt 1, tantôt 2 traits brillants, la durée de l'étincelle est comprise entre 23 et 46 dix millionnièmes de seconde.

C'est en expérimentant ainsi, avec une distance explosive de 5 millimètres entre les boules *a* et *b*, et en faisant varier le nombre des jarres, que MM. Lucas et Cazin ont obtenu les nombres suivants :

Nombre des jarres.	Durée en millionnièmes de seconde.
2	26
4	41
6	47
8	55

D'où l'on voit que la durée de l'étincelle croît avec le nombre des jarres. Elle augmente aussi avec la distance explosive; mais elle est indépendante du diamètre des boules entre lesquelles l'étincelle éclate.

Quant à l'étincelle des machines électriques, la durée en est tellement petite, qu'on ne peut l'apprécier avec le chronoscope.

720. **Tabouret électrique.** — L'étincelle électrique se présente sous un aspect remarquable, lorsque c'est du corps humain qu'on la fait jaillir. Pour cela on place la personne qu'il s'agit d'électriser sur un tabouret à pieds de verre, nommé *tabouret électrique*; puis cette personne ainsi isolée pose une main sur l'un des conducteurs de la machine. Le corps humain conduisant bien l'électri-

cité, à mesure que la machine se charge, l'électricité se distribue sur le corps de la personne en même temps que sur les conducteurs; en sorte que, si on la touche sur les mains, sur la figure ou sur les vêtements, on tire de cette personne des étincelles comme de la machine même. Tant qu'on n'approche pas la main de la personne isolée, elle n'éprouve aucune commotion, quoique fortement électrisée; mais ses cheveux se hérissent et se dirigent vers les corps qu'on leur présente, et elle ressent, sur les mains et sur la figure, un souffle léger, qui est un effet de la répulsion de l'air, à mesure qu'il s'électrise par contact.

On peut encore électriser une personne isolée sur le tabouret à pieds de verre en la battant avec une peau de chat; elle attire alors le pendule électrique et donne des étincelles à l'approche de la main. Si la personne qui tient la peau de chat monte elle-même sur un second tabouret isolant, les deux expérimentateurs sont électrisés, l'un positivement, l'autre négativement (691).

C'est Dufay, physicien français, qui, le premier, en 1734, tira une étincelle du corps humain.

721. Carillon électrique, appareil pour la grêle. — Le *carillon électrique* est un petit appareil composé de trois timbres métal-

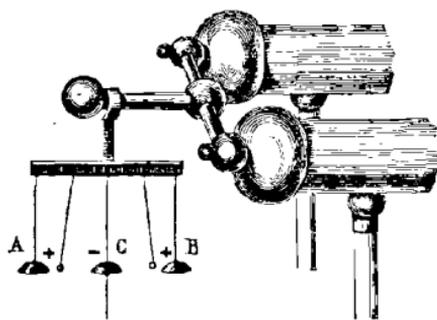


Fig. 595.

liques suspendus à une tringle horizontale en communication avec la machine électrique (fig. 595). Les timbres A et B pendent par des chaînes métalliques qui établissent la communication avec la tringle, tandis que le timbre du milieu pend par un fil de soie qui l'isole de la machine; mais il communique avec le sol au moyen d'une chaîne. Enfin, entre le timbre du milieu et les deux autres, sont deux petites boules de cuivre suspendues à des fils de soie. Lorsqu'on charge la machine, les timbres A et B, s'électrisant positivement, attirent les boules et les repoussent dès qu'il y a eu contact. Or celles-ci, se trouvant alors électrisées positivement, se portent vers le timbre C, qui, quoique en communication avec le sol, est chargé d'électricité négative par l'influence des deux autres. Aussitôt après le contact, les boules sont donc repoussées vers les timbres A et B, et exécutent un mouvement de va-et-vient rapide et des chocs successifs qui font résonner les trois timbres tout le temps que la machine est chargée.

Pour expliquer comment les grêlons peuvent souvent atteindre un volume considérable avant de tomber, Volta a imaginé un appareil fondé, comme le précédent, sur les attractions et les répulsions électriques. Cet appareil consiste en une cloche de verre placée sur un plateau de cuivre dans lequel on met de petites balles de moelle de sureau (fig. 596). Dans le goulot de la cloche passe, à frottement doux, une tige de cuivre terminée à la partie inférieure par une boule de même métal, et communiquant par son extrémité supérieure avec la machine électrique. Aussitôt que celle-ci se charge, la boule qui est dans l'appareil s'électrise, attire les balles de sureau et les repousse ensuite, en sorte qu'elles s'agitent avec une grande vitesse, allant du plateau à la boule et de la boule au plateau, et cédant à ce dernier l'électricité qu'elles ont prise à la boule. Se fondant sur cette expérience, Volta admettait que, lorsque les grêlons se trouvent placés entre deux nuages chargés d'électricités contraires, ils vont ainsi successivement de l'un à l'autre, et condensent à leur surface la vapeur d'eau ambiante, qui, en se congelant, leur fait acquérir le volume qu'on observe

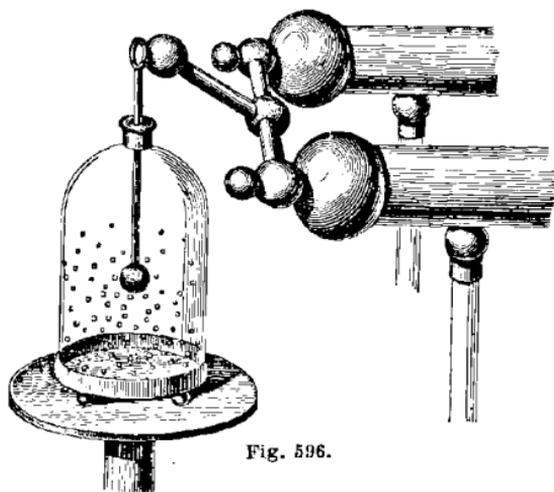


Fig. 596.

quelquefois. Cette théorie, insuffisante pour rendre compte de la grosseur des grêlons, n'est point admise aujourd'hui.

722. **Tourniquet électrique, insufflation.** — On nomme *tourniquet électrique* un petit appareil composé de cinq ou six rayons métalliques recourbés tous dans le même sens, terminés en pointe et fixés à une chape commune, mobile sur un pivot (fig. 597). Cet appareil étant posé sur la machine électrique, aussitôt que celle-ci se charge, les rayons et la chape prennent

un mouvement de rotation rapide dans la direction opposée aux pointes. Ce mouvement n'est point un effet de réaction comparable à celui du tourniquet hydraulique (86), comme l'ont admis plusieurs physiciens : c'est un effet de répulsion entre l'électricité

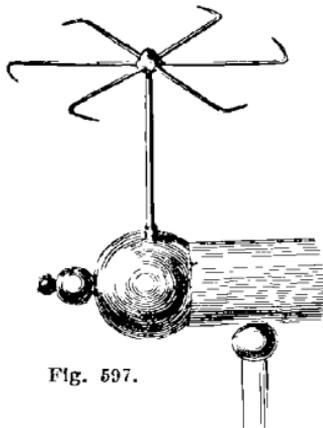


Fig. 597.

des pointes et celle qu'elles communiquent à l'air. L'électricité, s'accumulant vers les pointes, s'écoule dans l'air, et comme celui-ci se trouve chargé de la même électricité que les pointes, il les repousse en même temps qu'il en est repoussé lui-même. On reconnaît, en effet, que le tourniquet n'entre point en mouvement dans le vide, et si l'on approche la main tandis qu'il tourne dans l'air, on ressent un souffle léger, dû au déplacement de l'air électrisé.

Quand l'électricité s'écoule ainsi par une pointe, l'air électrisé est assez fortement repoussé pour donner naissance à un courant qui non-seulement est sensible à la main, mais souffle et peut même éteindre la flamme d'une bougie, du moins avec une puissante machine électrique. La figure 598 montre comment se dispose cette

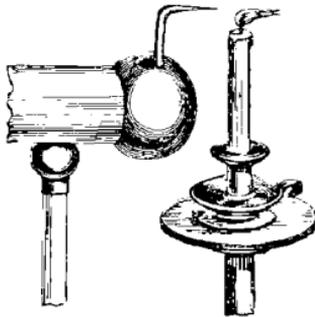


Fig. 598.

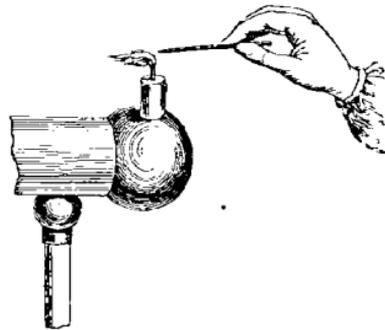
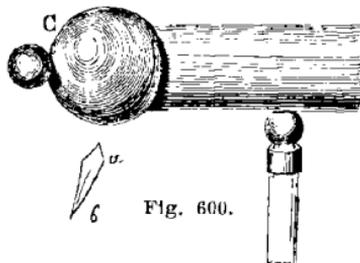


Fig. 599.

expérience. On obtient le même effet en posant la bougie sur l'un des conducteurs et en lui présentant une pointe métallique qu'on tient à la main (fig. 599). Le courant provient, dans ce dernier cas, de l'électricité contraire qui se dégage de la pointe par l'influence de la machine.

723. **Poisson volant de Franklin.** — Le *poisson volant*, ou *tombeau de Mahomet*, est une expérience faite pour la première fois

par Franklin, laquelle consiste à faire tenir un corps léger en équilibre au milieu de l'atmosphère, sous l'influence des attraction et répulsion combinées d'un corps électrisé. Pour faire cette expérience, on découpe une feuille de papier argenté, ou simplement de papier à lettre, sous la forme *ab* (fig. 600); puis, tenant le papier par la pointe effilée, on le présente au conducteur d'une machine électrique en activité. Abandonnant alors le poisson à lui-même, il reste suspendu au-dessous du conducteur dans une immobilité presque complète. Si le conducteur est, par exemple, électrisé positivement, son électricité, décomposant sans cesse l'électricité neutre du poisson, attire en *a* l'électricité négative, et repousse en *b* l'électricité positive, lesquelles s'écoulent par les pointes. De là une attraction et une répulsion dont la différence doit évidemment égaler le poids du papier pour qu'il y ait équilibre.



Pour expliquer comment cet équilibre est stable, M. Gaugain, en expérimentant sur de grands poissons métalliques, a constaté que, lorsque le poisson est déplacé par une cause quelconque, non-seulement le flux électrique, aux deux extrémités, varie d'intensité, mais que la distribution et la grandeur relative des charges se modifient également : quand le poisson se rapproche du conducteur, la charge négative se resserre de plus en plus, tandis que la charge positive s'étend ; en sorte qu'à une certaine distance, la charge négative l'emporte sur la charge positive, à une distance moindre les deux charges sont égales, et enfin, la distance décroissant encore, c'est la charge positive qui prédomine. Par suite, la répulsion augmentant quand le poisson s'approche, il tend aussitôt à s'éloigner ; puis, la force attractive croissant lorsque la distance augmente, le poisson tend de nouveau à s'approcher. De là un état d'équilibre qui, dans de certaines limites, est stable.

Riess explique simplement le phénomène du poisson volant en donnant pour cause le vent électrique (722) qui, s'échappant des deux pointes, produit deux répulsions opposées qui se font équilibre entre elles et au poids du corps.

CHAPITRE IV

CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ

724. Condensateurs, leur théorie. — On donne le nom général de *condensateurs* à des appareils qui servent à accumuler, sur des surfaces relativement petites, des quantités considérables d'électricité. On en a construit de diverses sortes, tous fondés sur le principe de l'électrisation par influence (701) et se composant

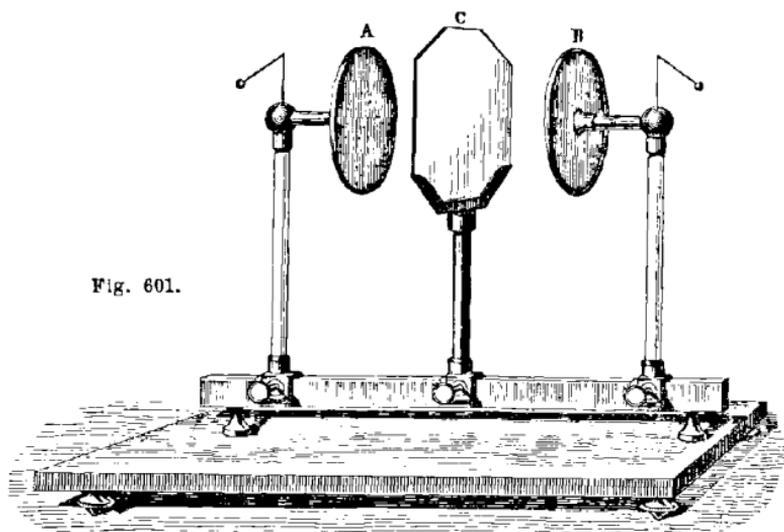


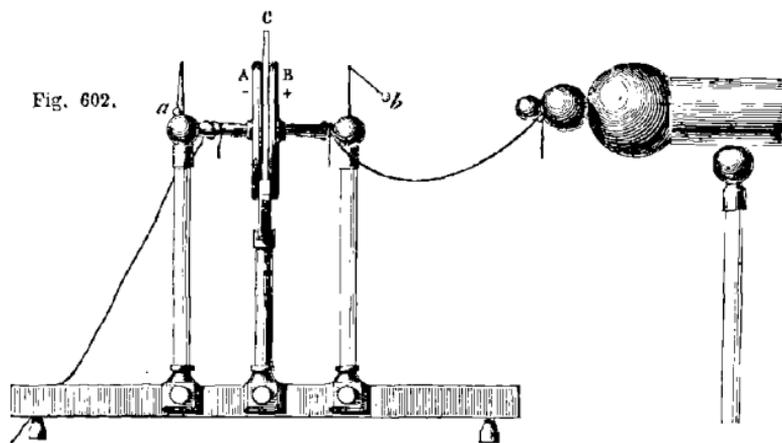
Fig. 601.

essentiellement de deux corps conducteurs séparés par un corps non conducteur. Nous décrirons d'abord le *condensateur d'Æpinus*.

Cet appareil se compose de deux plateaux circulaires de cuivre A et B (fig. 601), et d'une lame de verre C qui les sépare. Ces plateaux, munis chacun d'un petit pendule électrique, sont isolés sur deux colonnes de verre, et les pieds de celles-ci peuvent être déplacés le long d'une règle qui leur sert de support, de manière à écarter ou à rapprocher à volonté les deux plateaux. Lorsqu'on veut accumuler les deux électricités sur les plateaux, on les met en contact avec la lame de verre (fig. 602); puis, au moyen de cordons métalliques, on fait communiquer l'un d'eux, B par exemple, avec la machine électrique, et l'autre avec le sol.

Pour nous rendre compte comment l'électricité s'accumule dans

cet appareil, appelons, sur les deux plateaux, faces *antérieures* celles qui regardent la lame de verre, et faces *postérieures* celles qui lui sont opposées. De plus, supposons d'abord le plateau A assez éloigné du plateau *collecteur* B pour n'en recevoir aucune influence. Dans ce cas, le plateau B, mis en communication avec la machine électrique, prend une tension maximum égale à celle de la machine, laquelle se distribue également sur ses deux faces, et le pendule *b* diverge fortement. Si l'on supprime alors la communication avec la machine, rien n'est changé; mais qu'on approche lentement le plateau A, son électricité neutre étant décomposée par l'influence de B, l'électricité négative se porte sur la face antérieure *n* (fig. 603), et la positive s'écoule dans le sol. Or, l'électricité négative du plateau A réagissant à son tour sur



l'électricité positive du plateau B, l'électricité de celui-ci cesse d'être également distribuée sur ses deux faces et se rend en partie sur la face antérieure *m*. L'électricité du plateau B et de son support s'étant ainsi portée en *m*, le pendule *b* s'abaisse, ce qui fait voir que la tension a diminué sur la face *p*. Par suite, si l'on conçoit la communication avec la machine rétablie, la tension sur celle-ci l'emporte sur la tension en *p*, et une nouvelle quantité d'électricité passe sur le plateau B, où, agissant comme ci-dessus, elle décompose par influence une deuxième quantité d'électricité neutre sur le plateau A. De là, nouvelle accumulation d'électricité négative sur la face *n*, et, par suite, d'électricité positive sur la face *m*. Or chaque fois que la machine cède de l'électricité au plateau collecteur, une partie seulement de cette électricité passant sur la face *m*, et l'autre restant sur la face *p*,

la tension sur celle-ci va toujours croissant, jusqu'à ce qu'elle égale de nouveau celle de la machine. A partir de là, l'équilibre s'établit, et l'on est arrivé à une limite qui ne peut être dépassée. L'électricité accumulée sur les deux faces *m* et *n* est maintenant très-considérable, cependant le pendule *b* diverge juste autant que lorsque le plateau A était éloigné; c'est qu'en effet la tension en *p* est précisément la même qu'elle était alors : celle de la machine. Quant au pendule *a*, sa divergence est nulle.

Lorsque le condensateur est chargé, c'est-à-dire lorsque les électricités contraires sont accumulées sur les faces antérieures, on rompt les communications avec la machine et avec le sol, en en-

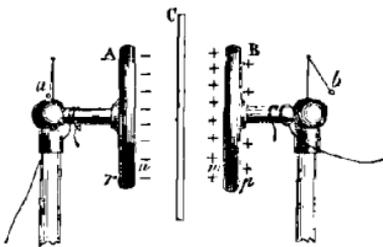


Fig. 603.

levant les deux chaînes métalliques. D'après ce qui a été dit ci-dessus, le plateau A est chargé d'électricité négative sur sa face antérieure *n* seulement (fig. 603), et l'autre face est à l'état neutre. Au contraire, le plateau B est électrisé positivement sur ses deux faces, mais inégalement : l'accumulation

ayant lieu sur la face antérieure, tandis que sur la postérieure *p* la tension égale seulement celle de la machine au moment où l'on a rompu les communications. L'excès d'électricité qui recouvre alors la face *p*, n'étant pas retenue par celle du plateau A, est prête à se dégager aussitôt qu'on lui présente un conducteur, ce qu'on exprime en disant qu'elle est *libre*. En effet, pendant que le pendule *a* reste vertical, le pendule *b* diverge. Mais si l'on écarte les deux plateaux, on voit les deux pendules diverger (fig. 601); ce qui résulte de ce que les électricités contraires, n'agissant plus d'un plateau à l'autre, se distribuent également, l'une sur le plateau A, l'autre sur le plateau B, et sur leurs supports.

725. **Décharge lente du condensateur.** — Les plateaux étant en contact avec la lame isolante (fig. 602), et les chaînes enlevées, on peut décharger le condensateur par une décharge lente, ou instantanée. Pour le décharger lentement, on touche avec le doigt d'abord le plateau B, c'est-à-dire celui qui contient un excès d'électricité; on en tire alors une étincelle, et, l'électricité libre de la face *p* s'étant écoulée dans le sol, le pendule *b* retombe, mais *a* diverge. En effet, le plateau B, ayant perdu une partie de son électricité, ne conserve sur la face *m* que celle retenue par l'électricité négative du plateau A. Or, à cause de la distance, la quantité d'électricité retenue en B est moindre que celle de A; ce

qui explique pourquoi le pendule *a* se met à diverger, et pourquoi, si l'on touche actuellement le plateau A, on en tire une étincelle, qui fait retomber le pendule *a* et diverger *b*; et ainsi de suite, en continuant à toucher alternativement les deux plateaux. La décharge ne s'opère ainsi que très-lentement, et, si l'air est sec, elle exige plusieurs heures. Théoriquement, dans un air parfaitement sec, et abstraction faite de toute déperdition, il faudrait un nombre de contacts infini. Si l'on touchait d'abord le plateau A, qui est le moins électrisé, on ne lui enlèverait point d'électricité, puisque toute celle qu'il possède est retenue par l'électricité de B.

726. **Décharge instantanée et décharge secondaire.** — Lorsqu'on veut décharger instantanément le condensateur, on met en communication les deux plateaux au moyen d'un *excitateur*. On nomme ainsi un système de deux arcs de laiton, terminés par des boules de même métal et réunis par une charnière. Quand les arcs sont munis de manches isolants de verre (fig. 604), l'appareil prend le nom d'*excitateur à manches de verre*; s'ils n'ont pas de manches (fig. 607), on lui donne le nom d'*excitateur simple*. Pour faire usage de l'excitateur, on applique une de ses boules sur un des plateaux du condensateur, et on approche l'autre du second plateau; il jaillit alors une forte étincelle qui provient de la recombinaison des électricités contraires accumulées sur les deux faces du condensateur; c'est la décharge *instantanée*.

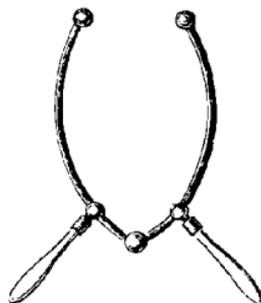


Fig. 604.

Toutefois, après cette étincelle, le condensateur n'est jamais complètement déchargé; car on peut encore, surtout si on laisse écouler un court intervalle, en tirer de la même manière une deuxième, une troisième étincelle, et même davantage, mais de plus en plus faibles. Ces décharges successives se désignent sous le nom de *décharges secondaires*.

Elles ont pour cause une électrisation par influence qui s'est développée lentement et à une faible profondeur sur les deux faces du verre (704); puis, lorsque les plateaux ont été déchargés, c'est l'électricité du verre qui les électrise de nouveau.

Si, au lieu de faire communiquer les plateaux du condensateur au moyen de l'excitateur, on touche d'une main un des plateaux, et de l'autre main le second plateau, la recombinaison s'opère par les bras et par le corps, et l'on ressent alors une com-

motion d'autant plus vive, que la surface du condensateur est plus grande et la charge électrique plus forte.

727. Limite de charge des condensateurs. — La quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur chaque face du condensateur est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la tension de la source et à la surface des plateaux; mais elle décroît quand l'épaisseur de la lame isolante augmente. Dans tous les cas, deux causes limitent la quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur les faces du condensateur. La première, c'est que l'électricité libre sur le plateau collecteur croissant graduellement, la tension sur ce plateau finit par égaler la tension sur la machine, et, à partir de ce moment, celle-ci ne peut rien céder au condensateur (724).

La deuxième cause est la résistance limitée que présente à la recombinaison des deux électricités la lame isolante placée entre les deux plateaux; en effet, lorsque la tension des électricités pour se recombinaison l'emporte sur la résistance de cette lame, elle est trouée, et les électricités contraires se réunissent.

728. Force condensante. — On nomme *force condensante* le rapport entre la charge totale que prend le plateau collecteur quand il est influencé par le second plateau, à celle qu'il recevrait s'il était seul; ou, ce qui revient au même, le rapport entre la quantité totale d'électricité du plateau collecteur à celle qui s'y trouve libre; car on a vu que l'électricité qui reste libre sur le plateau collecteur est précisément celle qu'il prend étant seul (724).

Pour calculer la force condensante, soient P la quantité totale d'électricité positive sur le plateau collecteur, N la quantité totale d'électricité négative sur le second plateau, et a l'électricité libre sur le premier, on a $N = mP$ [1], m étant une fraction dont la valeur est d'autant plus voisine de l'unité, que la lame isolante entre les deux plateaux est plus mince. Or, si l'on touche le plateau collecteur, on lui enlève son électricité libre a . Les rôles sont donc changés, c'est le second plateau dont la charge est actuellement la plus grande, mais dans un rapport encore égal à m , la lame isolante étant la même; c'est-à-dire qu'on a

$$P - a = mN \text{ [2]}, \text{ ou } P - a = m^2P \text{ [3]},$$

en remplaçant N par sa valeur donnée par l'égalité [1]. De l'égalité [3] on tire

$$\frac{P}{a} = \frac{1}{1 - m^2},$$

rapport qui n'est autre chose que la force condensante cherchée. Quant à la valeur de m , elle se détermine par l'expérience, à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion. D'après la formule ci-dessus, la force condensante est d'autant plus grande, que la valeur de m approche davantage de l'unité.

729. Carreau fulminant. — Le *carreau fulminant* est un condensateur plus simple que celui d'Æpinus, et plus propre à donner de vives étincelles et de fortes commotions. Il est formé d'un carreau de verre ordinaire entouré d'un cadre de bois. Sur les faces de ce carreau sont collées deux feuilles d'étain en regard l'une de l'autre, et laissant entre leurs bords et le cadre un intervalle de 6 centimètres environ. Ces feuilles ne communiquent pas entre

elles; mais l'une d'elles communique avec le cadre par un petit ruban d'étain qui se replie (fig. 605) de manière à être en contact avec un anneau auquel est suspendue une chaîne. Pour charger le carreau fulminant, on présente à la machine électrique la feuille d'étain isolée, c'est-à-dire celle qui ne communique pas au cadre. Comme l'autre est mise, par la chaîne, en communication avec le

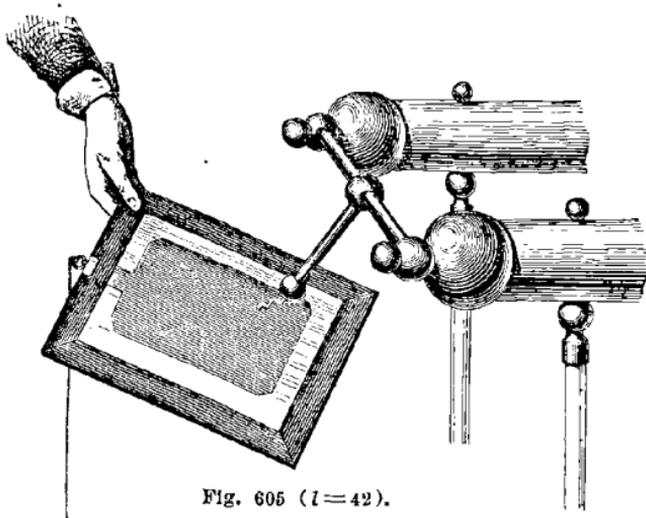


Fig. 605 (l=42).

sol, les deux feuilles se comportent comme les plateaux du condensateur d'Æpinus, et il s'accumule sur l'une et sur l'autre une grande quantité d'électricités contraires.

Le carreau fulminant se décharge, comme le condensateur d'Æpinus, avec l'excitateur simple. Tenant le carreau à la main, on applique une des boules de l'excitateur sur l'extrémité de la petite bande d'étain qui appartient à la feuille inférieure; puis on approche l'autre boule de la feuille supérieure. Il jaillit alors une vive et bruyante étincelle, mais sans que l'expérimentateur ressente la moindre commotion, car la recomposition s'opère tout entière par l'arc métallique. Si, au contraire, tenant toujours l'appareil de la même manière, on touche en même temps les deux feuilles d'étain avec les mains, on reçoit une forte commotion, car la recomposition électrique s'opère par les bras et par le corps.

730. **Bouteille de Leyde.** — La *bouteille de Leyde*, ainsi appelée du nom de la ville où elle fut inventée, est due au Hollandais Musschenbroek (les uns disent à Cuneus, son élève), qui la découvrit par hasard, en 1746. Ayant fixé une tige métallique dans le bouchon d'une bouteille remplie d'eau, il la présenta à la ma-

chine électrique dans l'intention d'électriser le liquide. Or la main qui tenait la bouteille faisant l'office de l'un des plateaux du condensateur, tandis que l'eau qui était dans l'intérieur représentait l'autre, il s'accumula, sur la paroi intérieure, de l'électricité positive, et, sur la portion de la paroi extérieure en contact avec

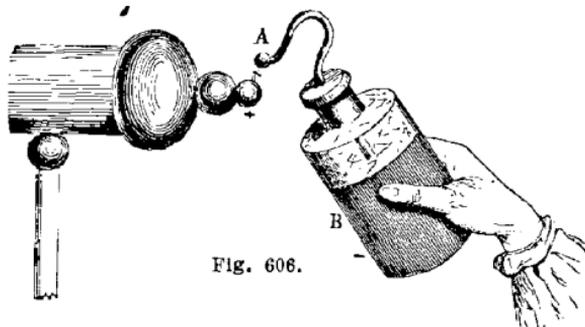


Fig. 606.

la main, de l'électricité négative. En effet, ayant approché une main de la tige métallique, tandis que de l'autre il tenait toujours la bouteille, Musschenbroek reçut, dans les bras et dans la poitrine, une commotion tellement forte, qu'il écrivait à Réaumur qu'il ne recommencerait pas pour le royaume de France.

Pendant, cette expérience une fois connue, on s'empessa de toutes parts de la répéter. L'abbé Nollet, professeur à Paris, remplaça, le premier, l'eau qui était dans la bouteille par des feuilles chiffonnées d'étain, de cuivre ou d'or. Déjà un physicien anglais avait reconnu qu'en recouvrant l'extérieur de la bouteille d'une feuille d'étain, les commotions étaient beaucoup plus vives. La bouteille de Leyde prit donc peu à peu la forme qu'on lui donne aujourd'hui, mais on en ignorait la théorie; c'est Franklin qui la fit connaître, en faisant voir que la bouteille de Leyde est, ainsi que le carreau fulminant, un véritable condensateur.

La bouteille de Leyde se compose d'un flacon de verre mince dont la grandeur varie suivant la quantité d'électricité qu'on veut accumuler. L'intérieur est rempli de feuilles d'or battu. Sur la paroi extérieure est collée une feuille d'étain B qui recouvre aussi le fond, mais qui doit laisser le verre à nu jusqu'à une assez grande distance du goulot (fig. 606). On adapte au col un bouchon de liège dans lequel passe, à frottement dur, une tige de cuivre recourbée en forme de crochet, et terminée par un bouton A; à l'intérieur, cette tige communique avec les feuilles d'or qui remplissent la bouteille. Ces feuilles constituent l'*armature intérieure*, et la feuille d'étain B l'*armature extérieure*.

La bouteille de Leyde se charge, comme le condensateur d'Æpinus et le carreau fulminant, en faisant communiquer l'une des armatures avec le sol, et l'autre avec une source électrique. Pour cela, on la tient à la main par l'armature extérieure, et l'on présente l'armature intérieure à la machine électrique: l'électricité positive s'accumule alors sur les feuilles d'or, et l'électricité négative sur l'étain. C'est le contraire qui aurait lieu si, tenant la bouteille par le crochet, on présentait l'armature extérieure à la machine. Du reste, la théorie de la bouteille de

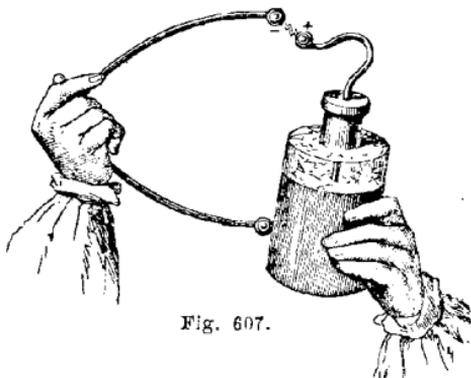


Fig. 607.

Leyde est identiquement celle qui a été donnée pour le condensateur, et tout ce qui a été dit de celui-ci (724) s'applique à la bouteille, en substituant ses deux armatures aux plateaux A et B de la figure 602.

Comme le condensateur, elle se décharge lentement ou instantanément. Pour la décharger instantanément, on la tient à la main, et l'on met en communication les deux armatures à l'aide de l'excitateur simple, en ayant soin de toucher *d'abord* l'armature qu'on tient à la main, sinon on reçoit la commotion (fig. 607). Pour la décharger lentement, on l'isole sur un gâteau de résine, et l'on touche alternativement, avec la main ou avec une tige de métal, l'armature intérieure, puis l'armature extérieure, et ainsi de suite, tirant à chaque contact une étincelle faible.

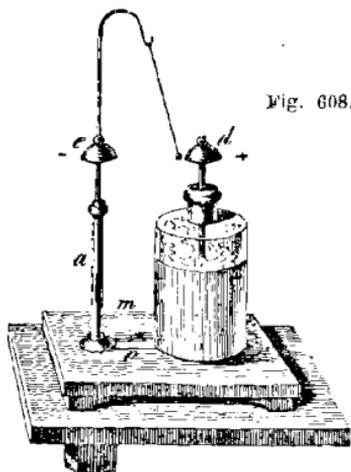
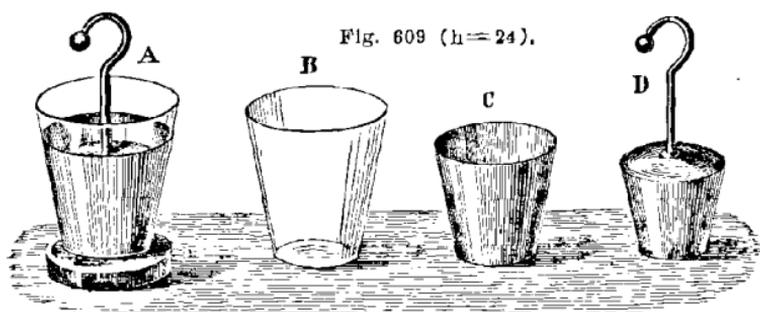


Fig. 608.

Pour rendre plus sensible la décharge lente, on dispose la bouteille de Leyde comme le représente la figure 608. La tige est droite et munie d'un timbre *d*; près de la bouteille est une tige métallique portant un timbre *e* semblable au premier, et un pendule électrique formé d'une boule de cuivre suspendue à un fil

de soie. La bouteille n'étant point fixée à la planchette *m*, on la prend à la main par l'armature extérieure, et on la charge en la présentant à la machine électrique; puis on la remet sur la planchette. L'armature intérieure contenant alors un excès d'électricité positive non neutralisée, le pendule est attiré et vient heurter le timbre de la bouteille; repoussé aussitôt, il va choquer le timbre *e* et lui cède son électricité; mais, revenu à l'état neutre, il est attiré de nouveau par le timbre *d*, et ainsi de suite pendant plusieurs heures, si l'air est sec et la bouteille un peu grande.

731. **Bouteille à armatures mobiles.** — La *bouteille à armatures mobiles* sert à démontrer que dans la bouteille de Leyde, comme



dans tous les condensateurs, ce ne sont pas seulement les deux armatures qui sont électrisées, mais aussi les faces du verre qui les sépare. Cette bouteille, dont les différentes pièces peuvent se séparer, se compose d'un vase conique de verre B (fig. 609), d'une armature extérieure de fer-blanc C, et d'une armature intérieure de même matière D. Ces pièces, placées les unes dans les autres (fig. A), constituent une bouteille de Leyde complète. Après l'avoir électrisée comme la bouteille ordinaire et isolée sur un gâteau de résine, on enlève l'armature intérieure, ensuite le vase de verre, puis l'armature extérieure, et l'on dispose ces pièces les unes à côté des autres. Or les deux armatures sont évidemment ramenées ainsi à l'état neutre. Cependant, si, remettant l'armature C sur le gâteau de résine, on place dedans le vase de verre, et dans celui-ci l'armature D, on reconstitue une bouteille de Leyde qui donne une étincelle presque aussi forte que si l'on n'avait pas déchargé les deux armatures.

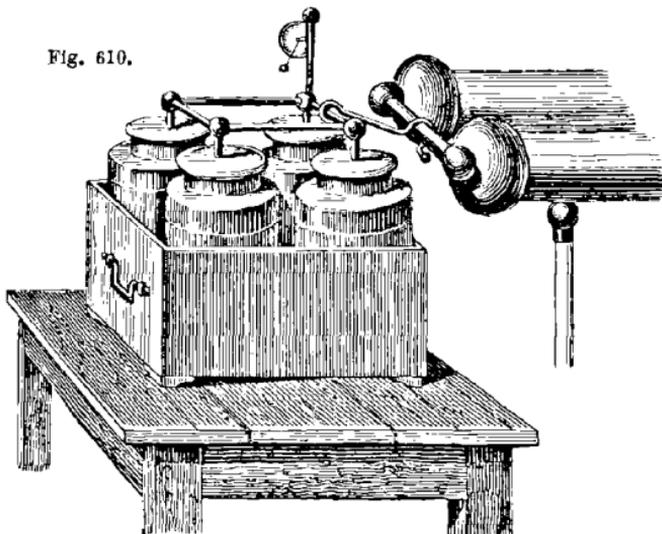
Cette seconde étincelle est une décharge secondaire, comme on a déjà vu en parlant du condensateur d'Épinus, et elle s'explique idéalement de la même manière (726).

732. **Jarres et batteries électriques.** — Une *jarre* est une grande bouteille de Leyde à goulot assez large pour qu'on puisse coller

sur sa paroi interne une feuille d'étain qui sert d'armature intérieure. La tige qui traverse le bouchon est droite et terminée, à la partie inférieure, par une chaîne métallique qui la met en communication avec la feuille d'étain formant l'armature intérieure.

Une *batterie* est une réunion de plusieurs jarres placées dans une caisse de bois (fig. 610), et communiquant ensemble, à l'intérieur, au moyen de tiges de métal, et extérieurement par une feuille d'étain qui revêt le fond de la caisse et se trouve en contact

Fig. 610.



avec les armatures extérieures des jarres. Cette feuille se prolonge latéralement jusqu'à la rencontre de deux poignées métalliques fixées sur les parois de la caisse. La batterie se charge en faisant communiquer les armatures intérieures avec la machine électrique, et les armatures extérieures avec le sol par le bois même de la caisse et de la table sur laquelle elle est placée, ou mieux par une chaîne fixée à l'une des poignées de la caisse. Un électromètre à cadran, placé sur l'une des jarres, indique la charge. Malgré la grande quantité d'électricité accumulée dans l'appareil, l'électromètre ne diverge que lentement et d'un petit nombre de degrés, ce qui ne doit pas étonner, car la divergence n'a lieu qu'en vertu de la différence de tension entre les armatures. Le nombre des jarres est, en général, de quatre, six ou neuf. Plus elles sont grandes et nombreuses, plus il faut de temps pour charger la batterie, mais plus ses effets sont puissants.

Pour décharger une batterie, on fait communiquer entre elles les deux armatures au moyen de l'excitateur, en ayant soin de tou-

cher d'abord l'armature extérieure. On doit faire usage ici de l'excitateur à manches de verre, et prendre toutes les précautions pour éviter la commotion ; car, avec une forte batterie, elle peut entraîner des accidents graves, et même la mort.

Quand on veut foudroyer un animal, un objet quelconque, on

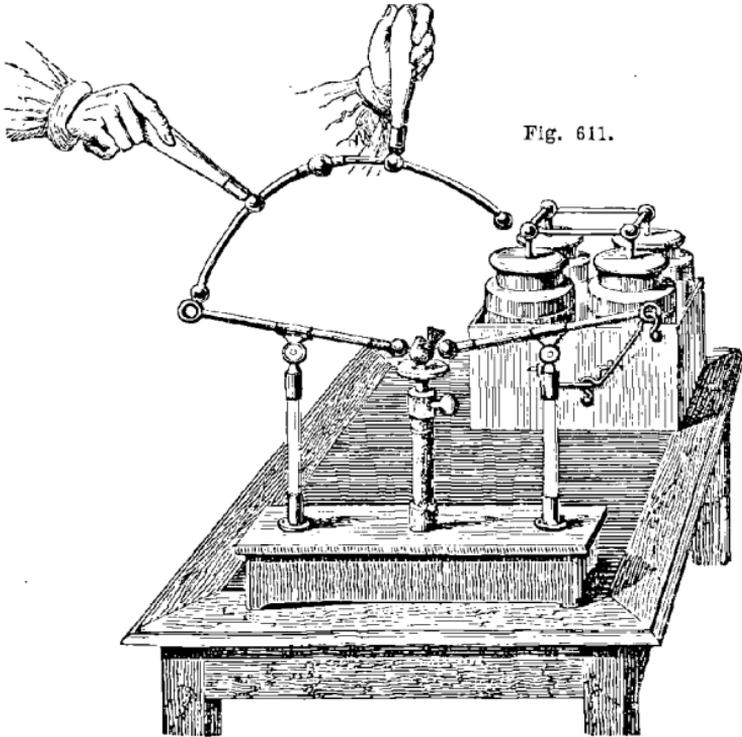


Fig. 611.

fait usage de l'*excitateur universel* dessiné sur le premier plan de la figure 611. C'est une petite caisse de bois portant deux colonnes de verre sur lesquelles sont fixées à charnière des tiges de cuivre. Entre ces colonnes est un pied de bois qui porte un petit plateau où se place l'objet ou l'animal sur lequel on veut expérimenter. Les deux tiges de cuivre étant dirigées vers cet objet, on fait communiquer l'une d'elles avec l'armature extérieure de la batterie, et l'autre avec une des boules de l'excitateur à manches de verre. Approchant alors la seconde boule de celui-ci vers l'armature intérieure, une étincelle part entre cette boule et l'armature, et une autre entre les branches de l'excitateur universel : c'est cette dernière qui foudroie l'objet placé sur le plateau.

733. *Électromètre condensateur de Volta.* — L'*électromètre*

condensateur, imaginé par Volta, n'est autre chose que l'électromètre à feuilles d'or déjà décrit (707), rendu beaucoup plus sensible par l'addition de deux disques condensateurs. La tige de cuivre qui porte les petites feuilles d'or, au lieu d'être terminée, à la partie supérieure, par une boule de laiton, l'est par un disque

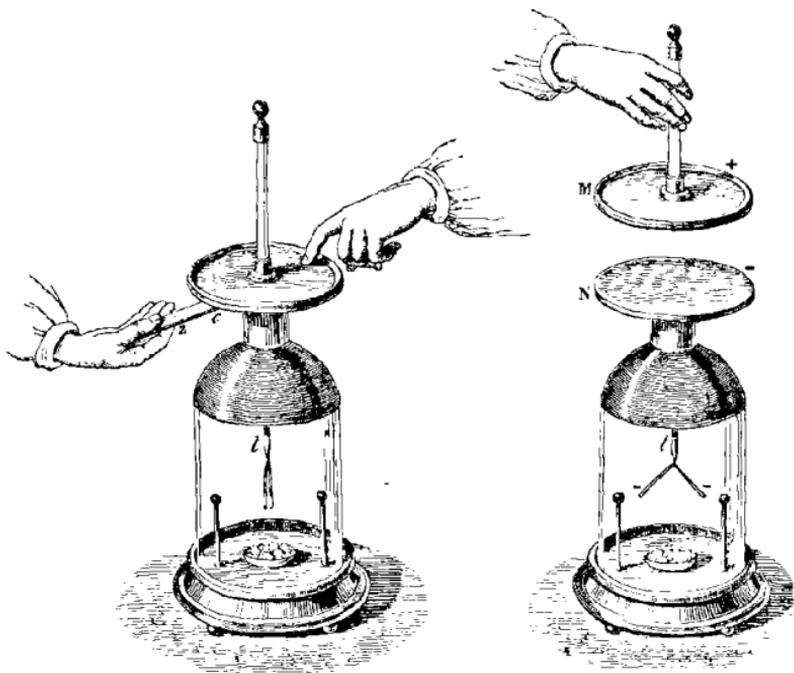


Fig. 612.

Fig. 613.

de même métal, sur lequel s'applique un second disque semblable, mais à manche de verre. Les deux disques sont recouverts d'un vernis à la gomme laque, qui les isole.

Pour rendre sensibles, au moyen de cet électromètre, des quantités d'électricité même très-faibles, on fait communiquer le corps sur lequel on veut reconnaître la présence de l'électricité avec le plateau inférieur, qui prend alors le nom de *plateau collecteur*, et l'on met le plateau supérieur en communication avec le sol, en le touchant avec le doigt mouillé (fig. 612). L'électricité du corps soumis à l'expérience, se répandant alors sur le plateau collecteur, agit par influence, au travers du vernis, sur le second plateau et sur la main, pour repousser dans le sol l'électricité de même nom et attirer celle de nom contraire. Les deux électricités s'accablent donc sur les plateaux, absolument comme dans le

condensateur d'Æpinus, mais sans qu'il y ait divergence des feuilles d'or, parce que toute l'électricité est condensée dans les plateaux. L'appareil ainsi chargé, on retire le doigt d'abord, puis la source d'électricité, sans qu'on observe encore aucune divergence; mais si l'on enlève le plateau supérieur (fig. 613), l'électricité du second plateau se distribuant sur la tige et sur les feuilles d'or, celles-ci divergent très-fortement. On augmente la divergence en adaptant au pied de l'appareil deux tiges de cuivre terminées par des boules de même métal : ces boules, en s'électrisant par l'influence des feuilles d'or, réagissent sur elles.

EFFETS DIVERS DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE

734. Effets physiologiques. — Les effets de l'électricité statique se divisent en *effets physiologiques, lumineux, calorifiques, mécaniques et chimiques.*

Les *effets physiologiques* sont ceux que l'électricité produit sur les êtres vivants ou même récemment privés de la vie. Ils consistent, chez les premiers, en une excitation violente qu'exerce l'électricité sur la sensibilité et la contractilité des tissus organiques qu'elle traverse, et, chez les derniers, en contractions musculaires brusques qui simulent le retour à la vie. Il ne sera question, pour le moment, que des actions physiologiques exercées par l'électricité statique à forte tension; plus tard, nous décrirons les effets physiologiques de l'électricité dynamique.

On connaît déjà la commotion que donne l'étincelle de la machine électrique (718). Cette commotion acquiert une bien plus grande intensité et un caractère particulier, quand c'est de la bouteille de Leyde qu'on tire l'étincelle, en touchant d'une main son armature extérieure et de l'autre son armature intérieure. Avec une petite bouteille, la commotion se fait sentir jusque dans le coude; avec une bouteille d'un litre, on la ressent jusque dans l'épaule, et jusque dans la poitrine avec des bouteilles plus grandes.

La bouteille de Leyde peut donner simultanément la commotion électrique à un très-grand nombre de personnes. Pour cela, celles-ci doivent *former la chaîne*, c'est-à-dire se donner la main d'une manière continue; puis, la première touchant l'armature extérieure d'une bouteille chargée, et la dernière touchant en même temps le bouton de l'armature intérieure, toutes reçoivent simultanément la commotion, qu'on gradue à volonté en chargeant plus ou moins la bouteille. L'abbé Nollet donna ainsi la commotion à 300 hommes, qui la ressentirent en même temps, d'une manière violente, dans les bras et la poitrine. Dans cette expérience, à

cause de la déperdition dans le sol, les hommes qui sont au milieu de la chaîne éprouvent une commotion moins vive que ceux qui sont rapprochés de la bouteille.

Avec les grandes bouteilles de Leyde et les batteries, la commotion ne peut plus se recevoir impunément. Priestley a tué des rats avec des batteries dont chaque armature avait une surface totale de 63 décimètres carrés, et des chats avec des armatures dont la surface était de 3 mètres carrés et demi.

735. Effets lumineux, œuf électrique. — La recomposition des deux électricités à forte tension s'opère toujours avec un dégagement de lumière plus ou moins intense : c'est ce qui arrive quand on tire des étincelles de la machine électrique, de la bouteille de Leyde et des batteries. L'éclat de la lumière est d'autant plus vif, que les corps entre lesquels a lieu l'explosion sont meilleurs conducteurs, et sa couleur varie non-seulement avec la nature de ces corps, mais avec l'atmosphère ambiante et la pression.

L'étincelle qui éclate entre deux baguettes de charbon est jaune; entre deux boules de cuivre argentées, elle est verte; avec des boules de bois ou d'ivoire, elle est cramoisie. Dans l'air, à la pression ordinaire, la lumière électrique est blanche et brillante; dans un air raréfié, elle est rougeâtre; dans le vide, elle est violacée, ce qui provient de ce que plus la résistance qui s'oppose à la recomposition des deux électricités est faible, moins l'électricité acquiert de tension. Dans l'oxygène, l'étincelle est blanche de même que dans l'air; dans l'hydrogène, elle est rougeâtre, et verte dans la vapeur de mercure; dans l'acide carbonique, elle est verte; dans l'azote, elle est bleue ou pourpre, et accompagnée d'un bruit particulier. En général, l'étincelle a d'autant plus d'éclat, que la tension est plus grande. Fusinieri ayant fait voir que, dans l'explosion de l'étincelle électrique, il y a toujours transport de particules matérielles à un état de ténuité extrême, on doit en conclure que les modifications que présente la lumière électrique sont dues à la matière pondérable transportée.

On étudie les effets de la pression plus ou moins forte de l'air sur l'éclat de la lumière électrique, au moyen de l'*œuf électrique*. On nomme ainsi un globe de verre porté sur un pied de cuivre, dans lequel sont deux tiges de laiton terminées en boule (fig. 614). La tige inférieure est fixe, et la tige supérieure glisse à frottement dans une boîte à cuir, de manière à pouvoir être rapprochée ou écartée à volonté. Le vide étant fait dans le globe, à 1 ou 2 millimètres (180), au moyen de la machine pneumatique, sur laquelle il peut se visser, on fait communiquer la tige supérieure avec une forte machine électrique, et le pied avec le sol. Si l'on charge alors

la machine, on observe, d'une boule à l'autre, une lumière violacée, peu intense et continue, qui est due à la recombinaison des électricités contraires. Si on laisse rentrer l'air peu à peu, la tension augmente avec la résistance, et la lumière, qui redevient

Fig. 614 (h = 60).

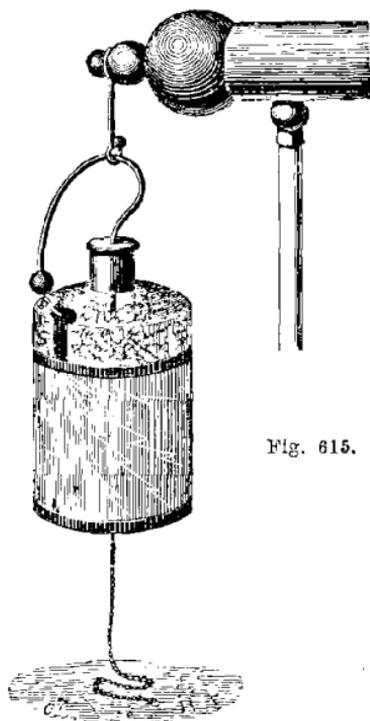
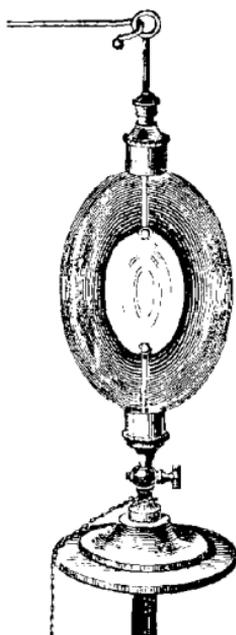


Fig. 615.

blanche et brillante, n'apparaît plus que sous la forme d'étincelle. Cette expérience doit être faite dans l'obscurité.

736. Bouteille, tube et carreau étincelants. — On a imaginé de nombreux appareils pour montrer les effets lumineux de l'électricité; tels sont la *bouteille étincelante*, le *tube étincelant*, le *carreau magique*.

La *bouteille étincelante* est une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure est formée d'une couche de vernis sur laquelle on a répandu de la limaille de cuivre. Une bande d'étain, collée au bord inférieur de la bouteille, est en communication avec le sol au moyen d'une chaîne de métal (fig. 615); une seconde bande placée plus haut porte un appendice arrivant à 2 centimètres environ du crochet, qui est très-recourbé. Cette bouteille étant suspendue à la machine électrique, à mesure qu'elle se charge, l'é-

tincelle part entre le crochet et l'armature, et de longues et brillantes étincelles éclatent sur la limaille.

Le *tube étincelant* est formé d'un tube de verre d'un mètre de longueur environ, dans lequel on a collé une série de petites

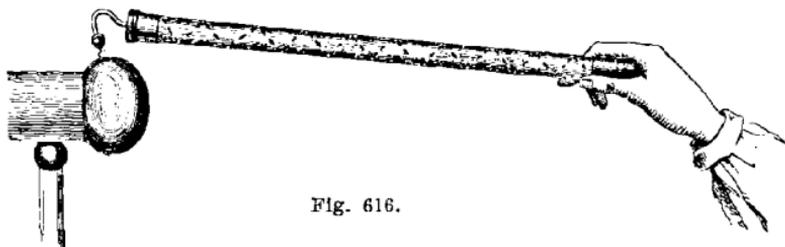


Fig. 616.

feuilles d'étain taillées en forme de losanges et disposées en hélice tout le long du tube, de manière à ne laisser entre elles que des solutions de continuité fort petites. Aux extrémités sont deux viroles de cuivre avec crochet, communiquant avec les deux bouts de l'hélice. Si, tenant le tube par un bout, on présente l'autre à la machine électrique (fig. 616), des étincelles jaillissent simultanément à chaque solution de continuité, et produisent une brillante traînée lumineuse, surtout dans l'obscurité.

Le *carreau magique*, fondé sur le même principe que le tube étincelant, se compose d'un carreau de verre ordinaire sur lequel est collée une bande d'étain très-étroite, se repliant un grand nombre de fois parallèlement à elle-même, comme le montre le trait noir dans la figure 617.

Sur cette bande d'étain, on pratique, avec un instrument tranchant, des solutions de continuité très-petites, disposées de manière à représenter un objet déterminé : par exemple, un portique, une fleur, etc., puis, fixant le carreau entre deux colonnes de verre, on met l'extrémité supérieure de la bande d'étain presque

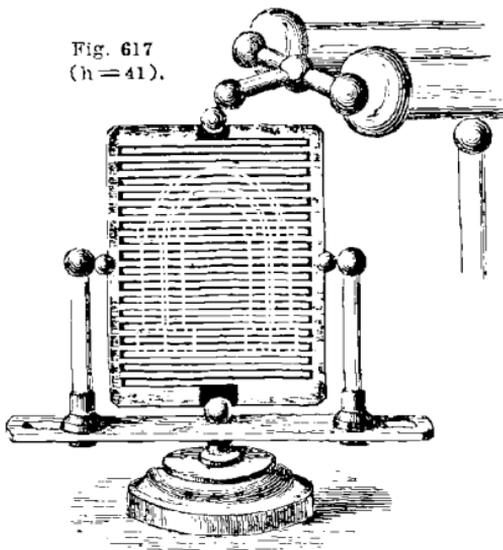
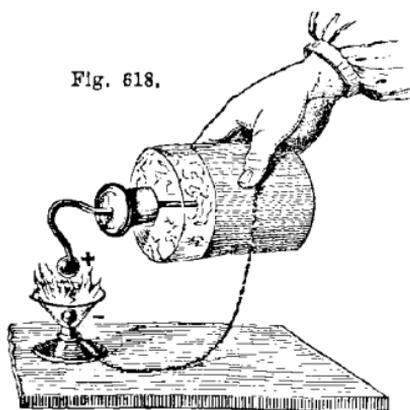


Fig. 617
(h = 41).

en contact avec la machine électrique, et l'on fait communiquer l'autre extrémité avec le sol. Faisant alors marcher la machine, l'étincelle jaillit à chaque solution de continuité, et reproduit en traits de feu l'objet qu'on a figuré sur le verre.

737. **Effets calorifiques, portraits électriques.** — L'étincelle électrique n'est pas seulement lumineuse, elle est aussi une source

Fig. 618.



de chaleur très-intense. En traversant les liquides combustibles, comme l'alcool, l'éther, elle les enflamme; elle agit de même sur la poudre à canon, la résine pulvérisée, et fond même les métaux; mais alors il faut une batterie puissante. Une bouteille de Leyde ordinaire suffit pour enflammer l'alcool et l'éther. Pour cela, on prend un petit vase de verre dont le fond est traversé par une tige de cuivre

à bouton, fixée à un pied de même métal (fig. 618). Ayant versé le liquide dans le vase de manière que le bouton soit entièrement recouvert, on présente à celui-ci le crochet d'une bouteille de Leyde chargée, en ayant soin de faire communiquer le pied de cuivre avec l'armature extérieure au moyen d'un fil métallique. Ce fil et le pied du vase remplissant l'office d'excitateur, l'étincelle jaillit au travers du liquide et l'enflamme. Avec l'éther, l'expérience réussit très-bien; pour réussir facilement avec l'alcool, il faut d'avance chauffer un peu le liquide.

Lorsqu'on fait passer la décharge d'une batterie dans un fil de fer, il devient rouge blanc, et brûle avec une lumière éblouissante. Les fils de platine, d'or, d'argent, sont fondus et volatilisés. Van Marum, avec une forte machine à deux plateaux et une puissante batterie, a fondu un fil de fer de 16 mètres de longueur.

Si l'on soumet à la décharge d'une batterie une feuille d'or isolée entre deux lames de verre ou entre deux rubans de soie, l'or est volatilisé, et l'on a pour résidu une poudre violette qui n'est autre chose que de l'or très-divisé. C'est ainsi qu'on obtient les *portraits électriques*.

La figure 619 montre comment se fait cette expérience. Une feuille de carton mince étant disposée comme on le voit en *abm*, on découpe à jour, en son milieu, le portrait qu'on veut reproduire; puis on colle sur ses extrémités deux bandes d'étain *a*

et *b*. Sur la découpeure on pose une de ces feuilles d'or extrêmement minces que préparent les batteurs d'or, en ayant soin qu'elle déborde sur les deux feuilles d'étain; puis, après avoir rabattu la portion *m* du carton sur la feuille d'or, on place le tout sur une étoffe de soie blanche dans une presse de bois P. Il suffit alors de faire passer de *a* en *b* la décharge d'une batterie peu puissante

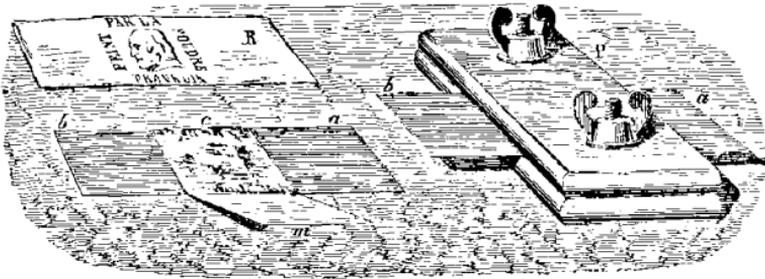
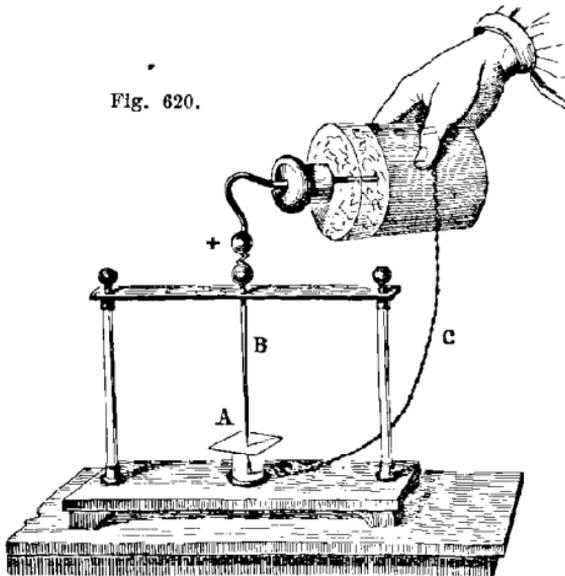


Fig. 619.

pour que l'or volatilisé aille former sur la soie, à travers la découpeure, un dépôt brun qui en reproduit les détails.

738. **Effets mécaniques.** — Les effets mécaniques sont des dé-

Fig. 620.



chirements, des ruptures, des expansions violentes, qui résultent, dans les corps peu conducteurs, du passage d'une forte décharge

électrique. Le verre est percé; le bois, les pierres, sont brisés; les gaz et les liquides sont fortement ébranlés. Les effets mécaniques de l'étincelle électrique se démontrent au moyen de différents appareils, qui sont le *perce-verre*, le *perce-carte*, le *thermomètre de Kinnersley* et l'*excitateur universel*.

Le perce-verre se compose de deux colonnes de verre qui supportent, au moyen d'une traverse horizontale, un conducteur B, terminé en pointe (fig. 620). La lame de verre A, qu'il s'agit de percer, repose sur un cylindre de verre, dans lequel est un second conducteur, aussi terminé en pointe. Celui-ci étant mis en

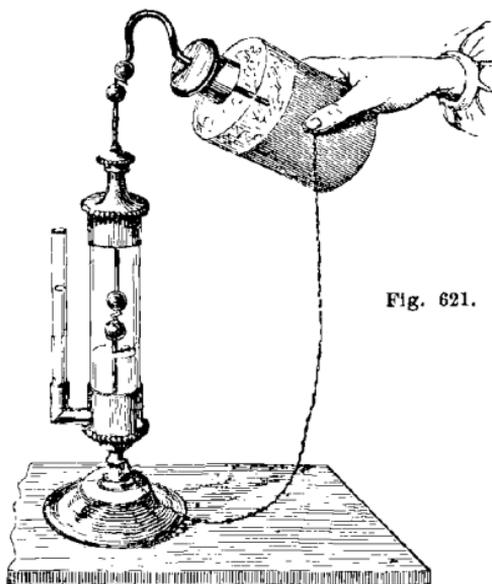


Fig. 621.

communication, par un fil métallique, avec l'armature extérieure d'une forte bouteille de Leyde, on approche le crochet de la bouteille du bouton qui termine le conducteur B. L'étincelle éclate alors entre les deux conducteurs, et le verre est percé. Toutefois cette expérience ne réussit avec une bouteille de Leyde un peu forte qu'autant que la lame de verre est mince; autrement il faut faire usage d'une batterie. Le même appareil sert très-bien de perce-carte.

L'ébranlement et l'expansion subite que l'étincelle fait naître dans les gaz se démontre avec le thermomètre de Kinnersley. Il se compose d'un fort tube de verre mastiqué, à ses deux bouts, dans des garnitures de cuivre qui ferment hermétiquement et supportent deux conducteurs terminés en boule, l'un fixe, l'autre glissant dans une boîte à cuir (fig. 621). Latéralement est un second

tube ouvert à sa partie supérieure. Ayant dévissé la boîte à cuir, on verse de l'eau dans le gros tube jusqu'à ce que le niveau se trouve un peu au-dessous de la boule inférieure; serrant alors la boîte à cuir, on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre les deux boules, en s'y prenant comme le montre le dessin. L'eau, instantanément refoulée hors du gros tube, s'élève de 2 centimètres environ dans le petit; mais le niveau se rétablit aussitôt, ce qui montre que le phénomène n'est point dû à une élévation de température, et que la dénomination de thermomètre donnée à l'appareil est fautive.

L'excitateur universel, déjà décrit en parlant des batteries, et représenté dans la figure 611, sert aussi à obtenir des effets mécaniques. Veut-on, par exemple, faire éclater un morceau de bois, on le place sur le petit plateau où l'on a figuré un oiseau, en lui faisant toucher les deux boules des conducteurs. Faisant alors passer la décharge, le morceau de bois vole en éclats.

739. Effets chimiques. — Les effets chimiques de l'électricité sont des combinaisons et des décompositions que détermine l'étincelle électrique lorsqu'elle traverse les corps. Par exemple, quand deux gaz sont mélangés à peu près dans le rapport suivant lequel se fait leur combinaison, une seule étincelle suffit pour la déterminer; mais si le mélange est loin de ce rapport, la combinaison exige une longue série d'étincelles. Priestley reconnut le premier que, lorsqu'on fait passer pendant longtemps des étincelles électriques au travers d'une quantité déterminée d'air atmosphérique, le volume d'air diminue, et de la teinture de tournesol, introduite dans le vase qui le contient, rougit. Cavendish, ayant répété cette expérience avec soin, trouva qu'il se formait, en présence de l'eau ou des bases, de l'acide azotique résultant de la combinaison de l'oxygène et de l'azote de l'air.

Un grand nombre de gaz sont décomposés par l'action prolongée de l'étincelle électrique. L'hydrogène carboné, l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, le sont complètement; l'acide carbonique ne l'est qu'en partie, en oxygène et en oxyde de carbone. L'étincelle des machines décompose même les oxydes, l'eau et les sels; mais l'électricité statique est loin de présenter des effets chimiques aussi énergiques et aussi variés que l'électricité dynamique.

740. Pistolet de Volta. — Le *pistolet de Volta* est un appareil qui sert à démontrer les effets chimiques de l'étincelle électrique. Il se compose d'un petit vase de fer-blanc (fig. 622), dans lequel on introduit un mélange détonant formé de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène, puis on le ferme hermétiquement avec un bouchon de liège. Sur la paroi latérale est une tu-

bulure dans laquelle passe une tige métallique terminée par deux petites boules A et B, et mastiquée dans un tube de verre, qui l'isole du reste de l'appareil. Tenant celui-ci à la main, on l'approche de la machine électrique (fig. 623). Le bouton A s'électrisant alors négativement par influence, et le bouton B positivement, l'étincelle part entre le bouton A et la machine, et, dans le

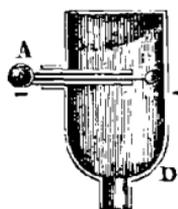


Fig. 622.

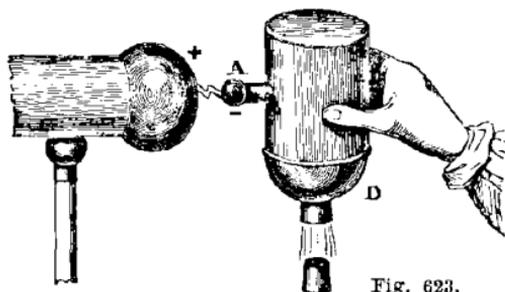


Fig. 623.

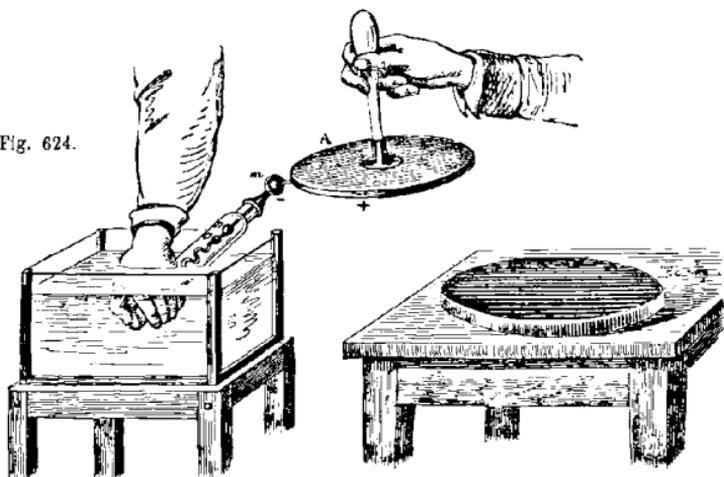
même instant, une deuxième étincelle jaillit entre le bouton B et la paroi du vase qui communique avec le sol par la main. C'est cette dernière étincelle qui détermine la combinaison des deux gaz. Cette combinaison étant accompagnée d'un vif dégagement de chaleur (454), la vapeur d'eau qui prend naissance acquiert une force expansive telle, que le bouchon est projeté avec une détonation égale à celle d'un coup de pistolet.

741. **Eudiomètre.** — L'eudiomètre, dont on se sert en chimie pour faire l'analyse des gaz, est encore un appareil fondé sur les effets chimiques de l'électricité. On l'a modifié de plusieurs manières. La figure 624 représente l'eudiomètre le plus simple. Il se compose d'une éprouvette de cristal, à paroi très-épaisse. L'extrémité fermée de l'éprouvette est traversée par une tige de fer ou de laiton terminée par deux boules *m* et *n*, l'une extérieure, l'autre intérieure. Près de la boule intérieure *n* en est une seconde *a*, à laquelle est fixé un fil de fer ou de laiton, contourné en hélice, et se prolongeant jusqu'à la partie ouverte de l'eudiomètre.

Pour faire avec cet instrument l'analyse d'un mélange gazeux, de l'air, par exemple, on le remplit d'abord d'eau, puis on le renverse sur une cuve à eau, et l'on y fait passer, à l'aide d'un entonnoir renversé, 100 parties d'air et 100 d'hydrogène, qu'on a mesurées avec un tube gradué. On ferme ensuite l'eudiomètre avec le pouce, en ayant soin de mettre celui-ci en contact avec le fil en hélice. Si un aide approche alors le plateau d'un électrophore (708) de la boule *m*, une étincelle part entre celle-ci et le plateau A, et en même temps une seconde entre les deux boules

n et *a*. C'est cette dernière qui détermine, avec une vive lumière, la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène pour former de l'eau. Si l'on mesure alors, en le faisant passer dans un tube gradué, le gaz qui reste dans l'instrument, on trouve que son volume

Fig. 624.



est 137; il a donc disparu 63 parties des gaz mélangés. Or, comme on sait que l'eau est formée de 2 volumes d'hydrogène pour 1 d'oxygène, il s'ensuit que le tiers de 63, ou 21, est le volume d'oxygène contenu dans 100 parties d'air.

Dans les effets chimiques de l'électricité, qui viennent d'être décrits, c'est par l'étincelle que ces effets sont obtenus; or les phénomènes sont alors compliqués d'effets calorifiques et d'effets mécaniques, qui les dénaturent. Nous ferons connaître plus tard, sous le nom d'*effluve électrique* (892), un nouveau mode d'expérimentation, dû à M. du Moncel, par lequel on obtient des résultats beaucoup plus remarquables et plus féconds.

LIVRE X

ÉLECTRICITÉ A L'ÉTAT DYNAMIQUE

CHAPITRE PREMIER

PILE VOLTAÏQUE; SES MODIFICATIONS

742. **Expérience et théorie de Galvani.** — C'est à Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, qu'est due l'expérience fondamentale qui a fait découvrir l'électricité dynamique (681), ou le *galvanisme*, cette branche nouvelle de la physique, si remarquable par les nombreuses applications qu'elle a reçues.

Galvani étudiait depuis plusieurs années l'influence de l'électricité sur l'irritabilité nerveuse des animaux, et particulièrement de la grenouille, lorsqu'en 1786 il eut occasion d'observer que les nerfs lombaires d'une grenouille morte s'étant trouvés en communication, par un circuit métallique, avec les muscles cruraux, ceux-ci se contractèrent vivement.

Pour répéter l'expérience de Galvani, on écorche une grenouille encore vivante, et on la coupe au-dessous des membres antérieurs (fig. 625); puis, après avoir mis à nu les nerfs lombaires, situés des deux côtés de la colonne vertébrale sous la forme de filets blancs, on prend un conducteur métallique formé de deux arcs, zinc et cuivre, et, introduisant l'un d'eux entre les nerfs et la colonne vertébrale, on fait toucher l'autre aux muscles de l'une des cuisses ou des jambes. A chaque contact, les muscles se replient et s'agitent. et cette moitié de grenouille semble reprendre vie pour sauter.

Galvani, qui déjà avait reconnu, dès 1780, que l'électricité des machines électriques produisait des commotions analogues sur les grenouilles mortes, attribua le phénomène que nous venons de décrire à l'existence d'une électricité inhérente à l'animal; il admit que cette électricité, qu'il désigna sous le nom de *fluide vital*, passait des nerfs aux muscles par l'arc métallique, et était alors la cause de la contraction.

Sous le nom d'*électricité animale*, ou de *fluide galvanique*, un grand nombre de savants, et les physiologistes surtout, adoptèrent la théorie de Galvani. Celle-ci rencontra cependant des con-

traducteurs, dont le plus ardent fut Volta, professeur de physique à Pavie, déjà connu par l'invention de l'électrophore, de l'électromètre condensateur et de l'eudiomètre.

743. **Expériences de Volta.** — L'attention de Galvani s'était portée exclusivement sur les nerfs et les muscles de la grenouille;

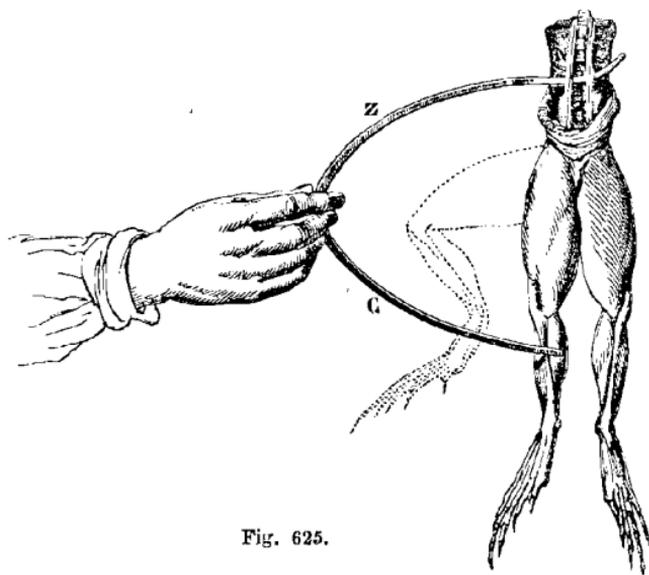


Fig. 625.

celle de Volta se porta sur les métaux qui servent à établir la communication. Se fondant sur l'observation, qui n'avait point échappé à Galvani, que la contraction musculaire est beaucoup plus énergique lorsque l'arc est composé de deux métaux que lorsqu'il l'est d'un seul, Volta attribua aux métaux le rôle actif dans le phénomène de la contraction. Il admit que c'était par l'effet même de leur contact qu'il y avait dégagement d'électricité, et que les parties animales ne jouaient là que le rôle de conducteur, et, en même temps, d'électroscope très-sensible.

A l'aide de l'électromètre condensateur qu'il venait d'inventer, Volta parut, en effet, démontrer, par de nombreuses expériences, le développement de l'électricité au contact des métaux. Nous citerons les suivantes, faciles à répéter.

1^o Ayant soudé ensemble, par leurs bouts, deux lames étroites, l'une de cuivre, l'autre de zinc, on pose un doigt sur le plateau supérieur de l'électromètre (fig. 612, page 675); puis, de l'autre main, tenant la lame de zinc entre les doigts à l'état naturel, ou légèrement mouillés d'eau acidulée, on touche le plateau infé-

rieur avec la lame de cuivre; rompant ensuite les communications et enlevant le plateau supérieur, les feuilles d'or divergent (fig. 613), et l'on constate qu'elles sont électrisées négativement.

2^o On recommence la même expérience en tenant à la main l'extrémité cuivre des deux lames soudées, et en touchant le plateau de l'électromètre, qui est de cuivre, avec l'extrémité zinc; on n'observe alors aucune trace d'électricité.

3^o On répète cette dernière expérience en interposant, entre le plateau et la lame de zinc, une rondelle de drap mouillée d'eau acidulée: dans ce cas, le plateau se charge positivement.

Volta expliqua le résultat de la première expérience par une *action de contact* entre le zinc et le cuivre, action en vertu de laquelle le zinc se chargeait, selon lui, d'électricité positive et le cuivre d'électricité négative. Quant à la seconde expérience, elle était la confirmation de la première: la lame zinc se trouvant en contact, à ses deux bouts, avec du cuivre, il se produit deux actions opposées dont l'effet est nul. Enfin, dans la troisième, un seul contact se produisant entre cuivre et zinc, ce dernier métal s'électrise positivement, comme dans la première expérience, et le cuivre négativement; puis la rondelle acidulée, toujours suivant Volta, n'agissant que comme conducteur, transmet au plateau l'électricité du zinc. Toutefois, comme la première et la troisième expérience ne réussissent bien qu'autant que la main qui tient le zinc, ou la rondelle qui la touche, est mouillée d'eau acidulée, on prévoit que l'action de l'acide sur le zinc n'est pas étrangère au dégagement d'électricité, ce qui sera bientôt démontré.

Des expériences de Volta et de Galvani naquit entre eux une lutte mémorable. Le dernier trouva que la présence de deux métaux n'était pas indispensable à la production du phénomène, et qu'on obtient des contractions en posant sur un bain de mercure pur une grenouille morte et fraîchement préparée. Enfin, il fit voir qu'en mettant en contact les nerfs lombaires de la grenouille avec ses muscles cruraux, il se produit une vive contraction. Dans cette dernière expérience, les métaux ne jouaient plus aucun rôle, et la théorie de Galvani paraissait victorieuse; mais Volta la combattit alors en donnant plus d'extension à sa théorie du contact, et en posant ce principe général, que *deux substances hétérogènes quelconques, mises en contact, se constituent toujours, l'une à l'état positif, l'autre à l'état négatif.*

Cependant Galvani fit une dernière expérience dans laquelle il était impossible d'admettre un effet de contact, puisqu'il ne faisait toucher que des substances homogènes. Il plaça sur un disque de verre une cuisse de grenouille munie de son nerf lombaire, et à

côté une seconde cuisse disposée de la même manière ; ayant posé le nerf de la seconde sur celui de la première, en sorte qu'au point de contact il n'y eût que de la substance nerveuse, il fit toucher les deux cuisses, et obtint une forte contraction. Galvani était donc parvenu à démontrer l'existence de l'électricité animale, mise en évidence de nos jours par Matteucci, sous le nom de *courant propre* de la grenouille.

744. **Théorie du contact de Volta.** — Volta, physicien avant tout, rejeta la théorie de l'électricité animale, et se fondant sur les expériences qui précèdent, il admit exclusivement la *théorie du contact*, qu'il formula par les deux principes suivants :

1^o Le contact de deux corps hétérogènes donne toujours naissance à une force que Volta a désignée sous le nom de *force électromotrice*, laquelle a pour caractère non-seulement de décomposer une partie de leur électricité naturelle, mais de s'opposer à la recombinaison des électricités contraires rendues libres sur les deux corps, en sorte que, malgré le contact, l'un reste électrisé positivement, l'autre négativement.

2^o Lorsque deux substances hétérogènes sont en contact, la différence algébrique de leurs états électriques est constante pour les mêmes corps, *quelle que soit la charge d'électricité sur chacun d'eux*, et égale à la force électromotrice. C'est-à-dire que, deux disques zinc et cuivre étant mis en contact et isolés tous les deux, si l'on représente par $+e$ la quantité d'électricité positive sur le zinc, et par $-e$ la quantité d'électricité négative sur le cuivre, la différence algébrique est $2e$; mais qu'on communique au système zinc et cuivre, ou qu'on en soustraie une quantité d'électricité q , la charge électrique sur le zinc est $e \pm q$, et sur le cuivre $-e \pm q$, quantités dont la différence est encore $2e$.

Cette quantité $2e$, indépendante de la quantité d'électricité communiquée ou soustraite au système des deux disques zinc et cuivre, représente la force électromotrice qui se développe à leur contact.

Volta, ayant reconnu que cette force varie avec les substances en contact, a divisé les corps en *bons électromoteurs* et en *faibles électromoteurs*. Dans la première classe sont les métaux et le charbon bien calciné; dans la seconde, les liquides et les corps non métalliques. Les métaux eux-mêmes ne sont pas également bons électromoteurs; le zinc et le cuivre soudés ensemble sont deux des meilleurs électromoteurs. Enfin, l'espèce d'électricité développée change avec la nature des substances en contact.

C'est en se basant sur la théorie du contact que Volta fut conduit à inventer le merveilleux appareil qui a immortalisé son nom. Cette théorie cependant ne tarda pas, elle aussi, comme celle de

Galvani, à rencontrer de nombreux contradicteurs, et on verra plus loin que le dégagement d'électricité que Volta attribuait uniquement au contact est attribué aujourd'hui à l'action chimique seule entre le zinc et l'eau acidulée (757); en sorte que celle-ci, qui, selon Volta, n'agissait que comme corps conducteur, est au contraire la cause principale du phénomène.

Tout en abandonnant la théorie de Volta, il est à remarquer que son second principe est exact, car il se vérifie par l'expérience (746); quant au premier, il ne diffère en réalité de la théorie chimique qu'en ce que, suivant Volta, le contact était la condition *suffisante* pour que le dégagement d'électricité eût lieu, tandis qu'on verra bientôt que le contact est la condition *nécessaire* pour que l'action chimique persiste et pour qu'il y ait courant (757).

745. Pile de Volta. — On donne le nom général de *pile* à tous les appareils qui servent à développer de l'électricité dynamique. Le premier appareil de ce genre, inventé par Volta en 1800, se compose d'une suite de disques empilés les uns sur les autres dans l'ordre suivant : un disque de cuivre, un disque de zinc, une rondelle de drap mouillée d'eau acidulée; puis encore un disque de cuivre, un disque de zinc, une rondelle de drap, et ainsi de suite, toujours dans le même ordre, comme le montre la figure 626, en ayant soin de maintenir les disques à l'aide de trois tubes isolants de verre. C'est cette disposition qui a fait donner à l'appareil le nom de *pile*, nom qui est resté, quoiqu'on ait adopté depuis des formes très-variées. La pile qu'on vient de décrire est connue sous le nom de *pile à colonne*, ou *pile de Volta*.

Pour empêcher l'oxydation et mieux établir les contacts, on soude deux par deux les zincs et les cuivres, de manière à former des *couples* séparés par des rondelles, en entendant ici, par couple, la réunion d'un zinc et d'un cuivre *en contact*; dans la théorie chimique, ce mot a une autre acception (757).

Soient les couples disposés comme dans les figures 626 et 627, c'est-à-dire les zincs au-dessus des cuivres. Dans la théorie du contact, l'extrémité supérieure, qui est un zinc, est positive, et l'extrémité inférieure, qui est un cuivre, est négative. Or il est à remarquer qu'il en est encore de même dans la théorie chimique, dans laquelle (755), au contact du zinc et de la rondelle acidulée, celle-ci s'électrise positivement et le zinc négativement. Par suite, la rondelle r (fig. 627) est positive, et cédant par conductibilité son électricité au cuivre C et celui-ci au zinc Z, ce dernier est positif. De même, le zinc Z_4 s'électrisant négativement par l'action de la rondelle acidulée r_4 , le cuivre C_4 se charge par conductibilité d'électricité négative.

Il résulte de là que le zinc Z et le cuivre C_4 peuvent être supprimés, comme le montre la figure 628, sans rien changer à l'espèce d'électricité que possède respectivement chaque extrémité de la pile. En effet, le cuivre C emprunte encore la même charge d'électricité positive à la rondelle r , et le zinc Z_4 prend aussi la même charge d'électricité négative par l'action de la rondelle r_4 .

Puisque la distribution de l'électricité est la même dans les deux figures 627 et 628, on ne peut déterminer l'espèce d'électricité accumulée à chaque extrémité de la pile par les métaux qui la terminent, mais déjà on peut dire que *l'extrémité positive est celle vers laquelle*

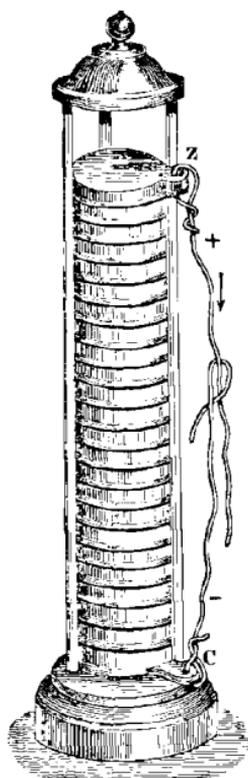


Fig. 626.

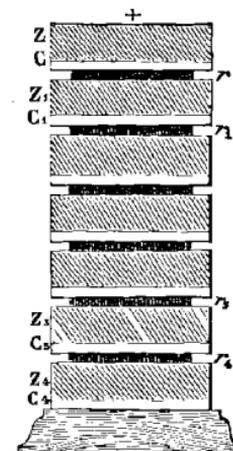


Fig. 627.

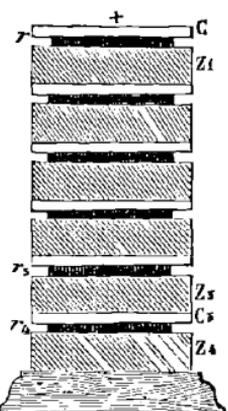


Fig. 628.

sont tournés les zincs de chaque couple, et l'extrémité négative celle vers laquelle sont tournés les cuivres. On verra plus loin un caractère chimique qui conduit à la même détermination (757).

746. Distribution de l'électricité dans la pile de Volta. — La distribution de l'électricité n'est pas la même dans la pile de Volta, suivant qu'elle est isolée, ou qu'elle communique avec le sol par une de ses extrémités.

1^o *Pile non isolée.* — Soit d'abord l'extrémité cuivre en communication avec le sol (fig. 627). La charge ou densité électrique sur le cuivre C_4 est alors zéro ; mais la différence des densités électriques sur le cuivre et le zinc d'un même couple étant constante et égale à $2e$ (744), le zinc Z_4 prend la densité $2e$; puis, celle-ci se communiquant par la rondelle r_4 au cuivre C_3 , le couple $C_3 Z_3$ passe à la densité $2e$, et comme la force électromotrice qui lui est propre lui communique la même densité $2e$, sa charge électrique finale est $4e$. Par la même rai-

son, les couples suivants prennent successivement les densités électriques $6e$, $8e$,... , et le dernier couple la densité $2ne$, n étant le nombre total des couples.

La charge électrique croît donc proportionnellement au nombre des couples ; et la pile étant tout entière chargée d'électricité positive, les densités extrêmes sont 0 et $2ne$. Si c'est par l'extrémité zinc que la communication avec le sol est établie, la pile est tout entière chargée d'électricité négative, et les densités extrêmes sont 0 et $-2ne$.

2° Pile isolée. — Si la pile est isolée, ce qui est le cas général, le cuivre C₄ (fig. 627) conserve son électricité négative, et les deux extrémités sont respectivement électrisées, l'une positivement, l'autre négativement. Or, les densités positive et négative étant nécessairement égales, et leur transition d'un état à l'autre ne pouvant s'effectuer qu'en passant par zéro, il faut que la partie médiane de la pile soit à l'état neutre.

Il est donc permis de regarder la pile isolée comme composée de deux parties rentrant dans le cas de la pile non isolée : c'est-à-dire, *une moitié tout entière chargée d'électricité positive, et ayant pour densités électriques extrêmes zéro et $+\frac{1}{2}n \times 2e$, en représentant par n le nombre total des couples ; l'autre moitié tout entière chargée d'électricité négative, et ayant pour densités extrêmes zéro et $-\frac{1}{2}n \times 2e$.* La différence des densités aux deux extrémités de la pile est donc encore $2ne$, comme ci-dessus. Cette théorie, due à Volta, a été vérifiée par Blot.

Tout ce qui précède sur la distribution de l'électricité dans la pile de Volta s'applique exactement, dans la théorie chimique, à toutes les piles qui seront décrites ci-après.

747. Tension de la pile. — La *tension* d'une pile est la tendance de l'électricité accumulée aux extrémités à se dégager et à vaincre les résistances qui s'opposent à son déplacement. On ne doit pas confondre la tension d'une pile avec la *quantité* d'électricité qu'elle peut dégager. La tension dépend du nombre des couples, tandis que la quantité d'électricité, toutes choses égales d'ailleurs, dépend de leur surface. Plus cette surface est grande, plus, à tension égale, la quantité d'électricité qui circule dans la pile est considérable. Cette quantité croît aussi avec la conductibilité du liquide interposé entre les couples. La tension, au contraire, est indépendante de la nature de ce liquide.

A moins d'un nombre de couples considérable, la tension, aux extrémités de la pile, est toujours beaucoup plus faible que dans les machines électriques. En effet, non-seulement chaque extrémité, considérée seule, ne donne pas d'étincelle, mais elle n'attire pas les corps légers, et ce n'est qu'à l'aide de l'électromètre condensateur (733) qu'on parvient à rendre la tension sensible. Pour cela, on fait communiquer l'un des plateaux de l'électromètre avec l'une des extrémités de la pile, et l'autre plateau avec la seconde. L'appareil se charge alors instantanément, et rompant les communications, on voit les feuilles d'or diverger. On peut de même charger une bouteille de Leyde en faisant communiquer chaque armature avec une extrémité de la pile.

748. **Pôles, électrodes, courant.** -- Dans une pile, on nomme *pôle positif* l'extrémité où se rend l'électricité positive, et *pôle négatif* celle où se rend la négative. On a vu, dans la pile à colonne (745), que le pôle positif est celui vers lequel sont tournés les zincs de chaque couple, et le pôle négatif celui vers lequel sont tournés les cuivres. Ajoutons que, dans toute pile, les couples étant composés d'une substance inattaquable par les acides, comme le platine, le charbon, ou peu attaquable, comme le cuivre, et d'un métal très-attaquable, le zinc, c'est toujours au métal inattaquable que correspond le pôle positif, et le pôle négatif au métal attaquable, ce qui sera constaté dans la théorie chimique.

On appelle *électrodes*, ou *réophores*, deux fils métalliques fixés aux pôles de la pile (fig. 626), et destinés à les faire communiquer entre eux.

On nomme *courant* la transmission électrique d'un pôle à l'autre de la pile, lorsqu'ils communiquent entre eux au moyen d'électrodes ou d'un corps conducteur quelconque. Ce n'est qu'au moment où cette communication est établie que le courant prend naissance, ce qu'on exprime en disant que le courant est *fermé*.

On admet deux courants, l'un *positif* allant du pôle positif au pôle négatif dans les électrodes, l'autre *négatif* marchant en sens contraire. Toutefois, dans tous les phénomènes que présentent les courants, on ne considère toujours que le courant positif, c'est-à-dire celui qui va du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur de la pile, et du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur.

Dans la théorie nouvelle de l'électricité, où l'on admet que celle-ci a pour cause l'éther agissant par sa masse et par son déplacement (688), le courant n'a lieu que dans un seul sens du pôle positif au pôle négatif; c'est un *flux* de l'éther, de la partie condensée vers la partie raréfiée, sous la forme d'ondes successives qui ne se confondent en aucune façon avec les ondes lumineuses.

DIVERSES MODIFICATIONS DE LA PILE

749. **Pile à auges.** — La pile de Volta a reçu diverses dispositions. La pile à colonne (fig. 626) présente l'inconvénient que les rondelles de drap, comprimées par le poids des disques, laissent écouler le liquide dont elles sont imbibées. C'est pour cette raison qu'on adopta promptement la *pile à auges*, due à Cruikshank, laquelle n'est, pour ainsi dire, qu'une pile à colonne horizontale. Elle se compose d'une boîte rectangulaire de bois, enduite intérieurement d'un mastic isolant (fig. 629). Les plaques zinc et cuivre, soudées entre elles deux par deux, forment des couples

qui ont une grandeur égale à la section intérieure de la boîte, et qui sont fixés dans le mastic, de manière qu'il y ait, d'un couple à l'autre, des intervalles peu considérables formant autant de compartiments ou *auges*. Dans celles-ci on verse un mélange d'eau et d'acide sulfurique, qui produit le même effet que les rondelles dans la pile à colonne; les deux pôles communiquent

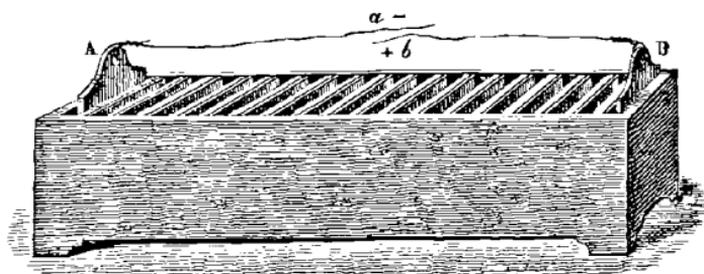


Fig. 629.

entre eux au moyen de fils métalliques fixés à deux plaques de cuivre A et B, qui plongent dans les auges extrêmes.

750. **Pile de Wollaston.** — La *pile de Wollaston*, ou *pile à bocal*, est encore une modification de la pile de Volta, mais une modification importante, parce qu'elle est disposée de manière qu'on peut facilement ne mettre la pile en activité que juste le temps pendant lequel on veut utiliser le courant.

La figure 630 montre une coupe verticale de deux couples de la pile de Wollaston; la figure 631 représente séparément le zinc et le cuivre destinés à plonger dans un même bocal. Les zincs Z sont taillés en plaques rectangulaires d'une épaisseur de 4 à 5 millimètres, sur environ une hauteur de 20 centimètres et une largeur de 15. Les cuivres sont en feuilles minces C de même largeur que les zincs, et recourbées de manière à les envelopper sur leurs deux faces, mais sans les toucher, étant maintenues à distance par de petits morceaux de liège ou de bois. De chaque feuille de cuivre part une lame étroite *o* qui se prolonge, et, se recourbant deux fois à angle droit, va se souder au zinc du couple suivant. La figure 631 fait voir comment la première lame étroite *o* est soudeée au premier zinc Z; puis comment autour de celui-ci s'enroule la première feuille de cuivre C, de même largeur que le zinc, laquelle se termine par une lame étroite *o'*, qui va se souder au deuxième zinc Z; et ainsi de suite, de manière à réunir autant de couples que l'on veut. Enfin, ces lames zinc et cuivre plongent deux à deux dans des bocalx étroits remplis d'eau acidulée.

La figure 632 représente une pile de 16 couples réunis parallèlement en deux séries de 8. Le premier cuivre C, étant soudé à un zinc, représente le pôle négatif. Quant au pôle positif, il corres-

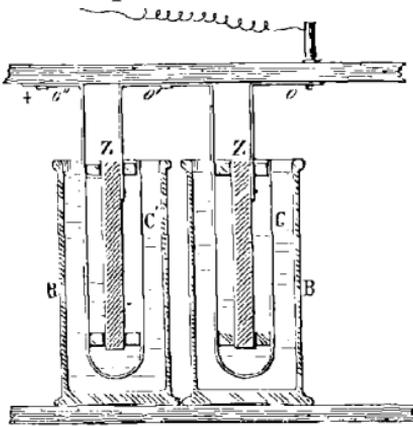


Fig. 630.

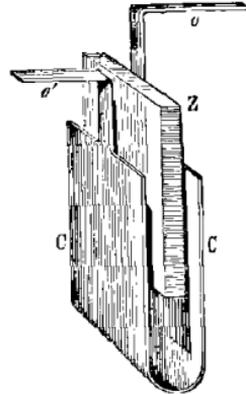


Fig. 631.

pond au dernier cuivre *m*, qui, n'étant en contact avec aucun zinc, ne fait qu'enlever au liquide l'électricité positive qui lui est

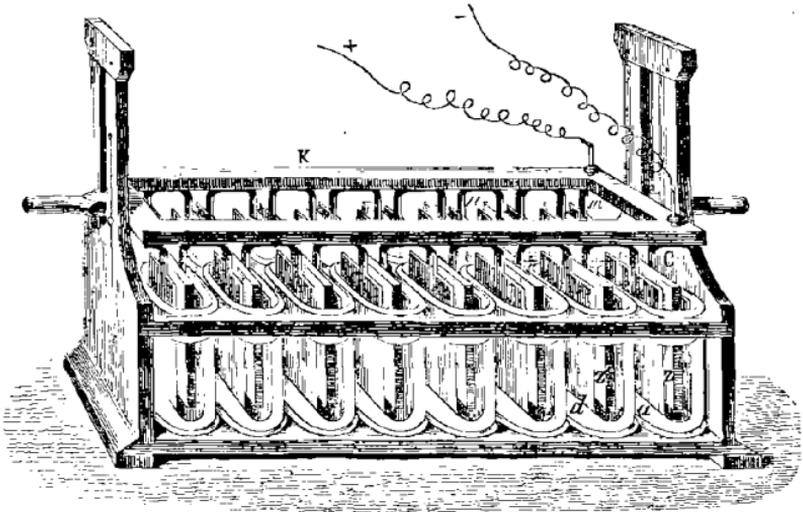


Fig. 632.

fournie par le dernier couple. Tous les couples étant fixés à un cadre de bois K, qui peut s'élever ou s'abaisser à volonté entre quatre montants, on soulève le cadre aussitôt qu'on ne veut plus

faire fonctionner la pile. Ordinairement l'eau des bœaux est chargée de $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique et $\frac{1}{20}$ d'acide azotique; celui-ci rend le courant plus constant en cédant de l'oxygène à l'hydrogène qui provient de la décomposition de l'eau, et en s'opposant ainsi à un dépôt gazeux nuisible sur le cuivre des couples (759).

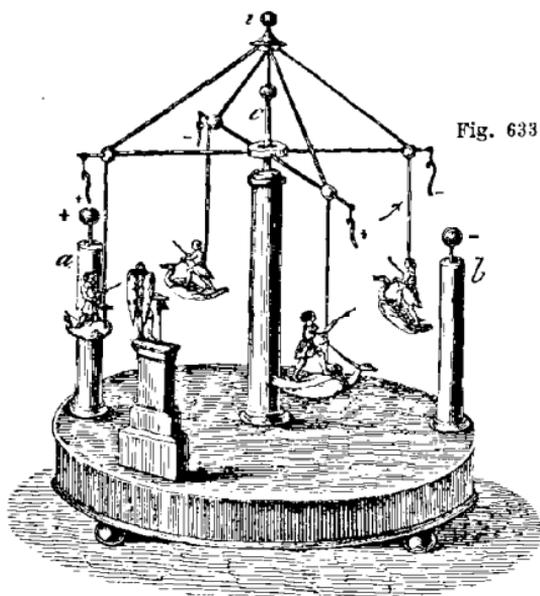
* 751. **Piles sèches.** — Les *piles sèches* sont de véritables piles à colonne dans lesquelles les rondelles acidulées sont remplacées par une substance solide hygrométrique. On en a construit de différentes sortes : dans la pile de Zamboni, qui est la plus en usage, les métaux électromoteurs sont l'étain et le bioxyde de manganèse. Pour construire cette pile, on prend une feuille de papier étamée sur une face, et sur l'autre on fixe, avec de la colle de pâte, du bioxyde de manganèse bien lavé. Ayant superposé 7 ou 8 de ces feuilles, on les découpe avec un emporte-pièce en disques de 25 millimètres de diamètre qu'on superpose dans le même ordre, de manière que l'étain de chaque disque soit en contact avec le manganèse du suivant. Ayant ainsi empilé 1 200 à 1 800 couples, on termine la pile, à chaque bout, par un disque de cuivre, et l'on serre tout le système fortement avec des fils de soie, pour établir les contacts. C'est au disque de cuivre en contact avec le manganèse que correspond le pôle positif; au disque de l'autre extrémité, c'est-à-dire au pôle étain, est le pôle négatif.

Les piles sèches sont remarquables par la durée de leur action, qui peut se prolonger plusieurs années. Leur énergie dépend beaucoup de la température et de l'état hygrométrique de l'air. Elle est plus forte en été qu'en hiver, et une forte chaleur peut la raviver lorsqu'elle semble éteinte. Une pile sèche de 2 000 couples ne donne ni commotion ni étincelle; mais elle peut charger la bouteille de Leyde et les autres condensateurs. Toutefois il faut pour cela un certain temps, parce que, la pile étant peu conductrice, l'électricité ne se meut que lentement dans son intérieur. Le développement de l'électricité dans ces piles est dû à une action chimique résultant de l'oxydation de l'étain par la décomposition lente des matières organiques et par la réduction du bioxyde de manganèse, réaction dans laquelle celui-ci s'électrise positivement, et l'étain négativement.

* 752. **Électromètre de Bohnenberger.** — Bohnenberger a construit un électromètre à pile sèche d'une extrême sensibilité. C'est un électroscope à feuilles d'or dont la tige ne porte qu'une seule feuille d'or suspendue à égale distance des pôles contraires de deux piles sèches placées verticalement, dans l'intérieur de la cloche. Aussitôt qu'on communique à la feuille d'or la plus faible quantité d'électricité libre, elle est attirée par une des piles et re-

poussée par l'autre, et son électricité est évidemment contraire à celle du pôle vers lequel elle se dirige.

* 753. **Appareil à rotation.** — On construit, sous le nom de *jeux de bague*, de petits appareils à rotation continue, dont le mouvement persiste pendant plusieurs années. Deux colonnes de cuivre



a et *b*, fixées sur un socle de bois, communiquent par leur base, l'une au pôle positif, l'autre au pôle négatif d'une forte pile sèche placée horizontalement au-dessous du socle (fig. 633). Cette pile est ordinairement formée de six piles plus petites communiquant entre elles et comprenant en tout 1 800 couples.

Sur un pivot *c*, placé à égale distance des deux colonnes *a* et *b*, est une chape d'ivoire *i*, à laquelle sont liés quatre supports qui soutiennent de petites figures peintes sur un carton très-léger. Ces supports se terminent par de petits étendards de clinquant fixés par de la gomme laque qui les isole. Ces étendards, attirés d'abord par l'électricité des boules qui terminent les colonnes, les touchent et se chargent de la même électricité qu'elles. Repoussés alors, ils se mettent à tourner, et les deux étendards positifs, par exemple, qui sont repoussés par la colonne *a*, se trouvent au contraire attirés par la colonne *b*, qu'ils viennent toucher pour être repoussés de même; d'où résulte une rotation continue.

CHAPITRE II

THÉORIE CHIMIQUE DE LA PILE ; PILES A COURANT CONSTANT

754. Électricité dégagée dans les actions chimiques. — La théorie du contact, proposée par Volta pour expliquer la production de l'électricité dans la pile, ne tarda pas à être attaquée par plusieurs physiciens. Fabroni, compatriote de Volta, ayant observé que les disques de zinc s'oxydaient au contact des rondelles acidulées, pensa que cette oxydation était la cause principale du dégagement de l'électricité. En Angleterre, Wollaston avança bientôt la même opinion, et Davy l'appuya de nombreuses expériences.

Pour démontrer le dégagement d'électricité dans les actions chimiques, on pose sur le plateau de l'électromètre condensateur un disque de papier mouillé, et dessus, une capsule de zinc dans laquelle on verse de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique; puis on plonge dans le liquide une lame de platine communiquant avec le sol, tandis qu'on fait aussi communiquer avec lui le plateau inférieur en le touchant avec le doigt mouillé. Lorsqu'on rompt les communications et qu'on enlève le plateau supérieur, on reconnaît que les feuilles d'or ont pris une quantité sensible d'électricité positive, ce qui montre que le plateau supérieur a été électrisé négativement par l'action chimique de l'acide sur les parois de la capsule.

Mais c'est surtout à l'aide du galvanomètre (800) qu'on a constaté que toutes les actions chimiques sont accompagnées d'un dégagement d'électricité plus ou moins abondant. Ayant fixé une lame de zinc à l'un des bouts du fil du galvanomètre, et à l'autre une lame de cuivre, on plonge les deux lames dans de l'eau acidulée. Aussitôt l'aiguille dévie, et le sens de la déviation fait voir que le zinc est électrisé négativement et le liquide positivement.

Le dégagement d'électricité est général dans toute action chimique, soit qu'elle ait lieu entre deux corps simples, entre un acide et un métal, ou entre un acide et un oxyde; et, dans tous les cas, il est soumis aux lois suivantes, constatées par M. Becquerel, à l'aide du galvanomètre.

755. Lois du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques. — 1^o *Dans la combinaison de l'oxygène avec un autre corps, l'oxygène prend l'électricité positive, et le combustible l'électricité négative.*

2^o *Dans la combinaison d'un acide avec une base, ou de corps*

se comportant comme tels, le premier prend l'électricité positive, et le second l'électricité négative.

3° Quand un acide agit chimiquement sur un métal, l'acide s'électrise positivement et le métal négativement, ce qui est une conséquence de la deuxième loi.

4° Dans les décompositions, les effets électriques sont inverses des précédents.

5° Dans les doubles décompositions, l'équilibre des forces électriques n'est point troublé.

Quant à la quantité d'électricité dégagée dans les actions chimiques, elle est énorme. En effet, M. Becquerel est arrivé à ce résultat, qui effraie l'imagination, que l'oxydation du poids d'hydrogène qui entre dans un milligramme d'eau, dégage suffisamment d'électricité pour charger vingt mille fois une surface métallique d'un mètre de superficie, à un tel degré, que les étincelles éclatent à un centimètre de distance. Faraday, Pelletier et Buff sont parvenus à des résultats semblables.

756. **Théorie électro-chimique d'Ampère.** — Se basant sur l'électricité qui devient libre dans les actions chimiques, Ampère a donné la théorie électro-chimique suivante :

1° Au moment où deux atomes se combinent, ils s'emparent, en quantités égales, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, électricités qui disparaissent aussitôt par la formation d'un composé à l'état neutre, et il a nommé *électro-positifs* les corps qui prennent l'électricité positive (l'hydrogène, les métaux et les bases), et *électro-négatifs* les corps qui prennent l'électricité négative (l'oxygène, le soufre, les acides et les corps se comportant comme tels).

L'oxygène, dans toutes ses combinaisons, est constamment électro-négatif, le potassium électro-positif. Les autres corps simples sont tantôt électro-positifs, tantôt électro-négatifs, suivant le corps avec lequel ils sont combinés. Le soufre, par exemple, qui est électro-positif avec l'oxygène, est électro-négatif avec l'hydrogène.

2° Cette hypothèse admise, Ampère explique ainsi le dégagement de l'électricité dans un couple : le zinc étant en contact avec l'acide, et chaque atome de celui-ci, qui s'unit au zinc, s'emparant d'une quantité d'électricité négative — A, une quantité égale d'électricité positive + A reste libre dans le liquide et l'électrise positivement, ce qui est conforme à la troisième loi ci-dessus. De même, chaque atome de zinc qui se combine, s'emparant d'une quantité d'électricité positive + A, une quantité égale d'électricité négative devient libre sur la portion de métal non attaquée. C'est-à-dire que l'électricité qui apparaît dans la pile n'est pas

celle que prennent les atomes, mais celle qui devient libre par le fait de la combinaison; en un mot, c'est le corps électro-négatif qui dégage de l'électricité positive, et le corps électro-positif qui dégage de l'électricité négative. C'est dans ce sens qu'il faut appliquer la théorie d'Ampère aux lois du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques (755).

757. **Théorie chimique de la pile.** — Dans cette théorie, la seule admise aujourd'hui, un *couple* est le système d'un zinc et d'un cuivre, non juxtaposés, plongeant dans de l'eau acidulée; et une *pile* est une série de couples réunis de manière que le zinc de chacun soit en contact avec le cuivre du couple suivant.

1^o *Cas d'un seul couple.* — Soit d'abord un couple unique, composé d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre plongées dans de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique (fig. 634). Au contact du zinc et de l'eau acidulée, l'action chimique donne naissance à une force électromotrice qui charge le zinc Z négativement et l'eau acidulée positivement (755 et 756). Quant au cuivre C, comme il est sensiblement inattaquable par l'acide sulfurique à la température ordinaire, il ne sert qu'à recueillir l'électricité positive du liquide.

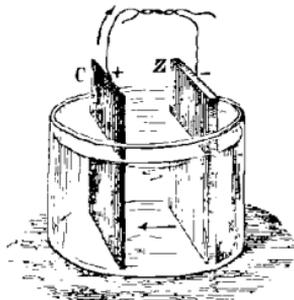


Fig. 634.

A cet état, si les lames zinc et cuivre ne sont pas réunies par un conducteur, elles se chargent respectivement d'électricités contraires jusqu'à ce qu'elles acquièrent une tension capable de faire équilibre à la force électromotrice, c'est-à-dire à l'action chimique qui tend à leur fournir une nouvelle quantité d'électricité. L'action chimique cesse alors, du moins si le zinc est pur ou amalgamé (767); mais si l'on réunit le zinc et le cuivre par un conducteur extérieur, les deux électricités se recombinent, et l'équilibre étant détruit, la force électromotrice reproduit aussitôt une nouvelle quantité d'électricité. De là un courant continu du cuivre au zinc à l'extérieur du couple, et du zinc au cuivre à l'intérieur.

Le pôle positif correspond donc, comme il a été dit (745), au cuivre, c'est-à-dire au métal sensiblement inactif, et le pôle négatif au zinc, c'est-à-dire au métal actif. Si les deux éléments du couple sont attaquables, c'est à celui qui l'est le moins que correspond le pôle positif; et la force électromotrice réelle est alors la différence entre celles qui se produisent sur les deux éléments du couple. Il importe donc qu'un des éléments étant très-attaquable, l'autre le soit le moins possible; c'est pourquoi on remplace

avec avantage, dans le couple voltaïque, le cuivre par le platine ou par le charbon de coke bien calciné.

2^o *Cas de plusieurs couples.* — Soit actuellement une pile formée d'une série de couples identiques, associés de manière que le zinc de chacun soit en contact avec le cuivre du suivant. L'action chimique, dans chaque couple, étant la même que s'il était seul, il se produit dans tous une force électromotrice égale, et par suite une tension ou densité électrique qui, se superposant d'un couple au suivant, donne une tension finale sensiblement proportionnelle au nombre des couples, proportionnalité qui n'est pas une simple hypothèse, comme l'avait admis Volta (746), mais un fait physique constaté par l'expérience. La théorie chimique de la pile peut donc se résumer dans les lois suivantes :

1^o L'action chimique, dans chaque couple, développe une force électromotrice qui électrise le cuivre positivement et le zinc négativement.

2^o La force électromotrice communique aux éléments de chaque couple une différence de tension constante, qui se superpose d'un couple au suivant; et, par suite, la tension croît proportionnellement au nombre des couples.

3^o Tant que le circuit est ouvert, la tension, dans chaque couple, fait équilibre à la force électromotrice, et l'action chimique cesse.

4^o Lorsque le circuit est fermé par un conducteur, les électricités contraires se recombinent, et l'action chimique recommençant, un flux continu d'électricité s'établit du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur : c'est le courant.

Réciproquement, les courants produisent des effets chimiques, qui seront décrits sous le nom d'*électrolyse* (784).

758. **La force électromotrice varie avec les métaux et avec les acides.** — A surface égale et au contact d'un même acide, les différents métaux ne dégagent pas des quantités égales d'électricité. Avec l'acide sulfurique étendu, et l'un des éléments du couple étant une lame de platine, M. Ed. Becquerel a trouvé qu'en représentant par 100 la quantité d'électricité dégagée par le zinc pur, les autres métaux fournissent les quantités suivantes :

Potassium	173	Mercure	31
Zinc amalgamé	103	Or	0
Étain	66	Platine	0
Fer.	61	Charbon	0
Cuivre rouge	35		

Si les deux éléments d'un couple sont attaquables, par exemple zinc et cuivre, la force électromotrice réelle est la différence des nombres ci-dessus.

Pour un même métal associé au platine, la force électromotrice varie avec la nature du liquide. Par exemple, très-faible dans l'eau ordinaire, elle est très-grande dans une dissolution de sel marin et dans l'acide sulfurique étendu.

Pour un même acide ou une même dissolution saline, la tension est indépendante du degré de concentration du liquide; il n'y a de modifié que la conductibilité du couple.

759. Affaiblissement du courant dans les piles, courants secondaires. — Les diverses piles à colonne, à auges, de Wollaston, décrites précédemment, et qui ont toutes pour caractère d'être composées de deux métaux et d'un seul liquide, présentent le grave inconvénient de donner des courants dont l'intensité décroît rapidement.

Cet affaiblissement est dû à deux causes : la première est le décroissement des actions chimiques par la neutralisation de l'acide sulfurique à mesure qu'il se combine avec le zinc; la deuxième provient des *courants secondaires*. On nomme ainsi des courants qui se produisent dans les piles en sens contraire du courant principal, et le neutralisent en totalité ou en partie. M. Becquerel a reconnu que ces courants sont engendrés par des dépôts qui se font sur les lames zinc et cuivre des couples. En effet, le courant qui va du zinc au cuivre, *dans la pile*, décomposant l'eau et le sulfate de zinc qui s'est formé, il se dépose, sur le cuivre vers lequel marche le courant, non-seulement une couche de zinc d'autant plus épaisse, que la pile est plus longtemps en activité, mais des bulles d'hydrogène, qui restent adhérentes au métal et ne s'en séparent qu'après avoir atteint un volume assez considérable. De là deux causes d'affaiblissement très-puissantes; car, tandis que le dépôt de zinc donne naissance à un courant de sens contraire à celui de la pile et le neutralisant plus ou moins, le gaz hydrogène, qui est très-oxydable, donne lui aussi, en reformant de l'eau, un courant secondaire de sens contraire à celui du courant principal, et de plus, par sa non-conductibilité, présente une grande résistance à la circulation de l'électricité dans la pile.

Si l'on interrompt le circuit, les dépôts se dissolvent et l'intensité du courant augmente. On obtient le même résultat en faisant passer le courant d'une autre pile en sens contraire du premier, les dépôts formés étant alors dissous par des dépôts opposés.

760. Polarité. — De la Rive a constaté, le premier, que des lames de platine qui ont servi à transmettre le courant dans un liquide décomposable, étant retirées de ce liquide et plongées dans de l'eau distillée, donnent naissance à un courant de sens inverse à celui qu'elles ont d'abord transmis, phénomène que le savant physicien de Genève a exprimé en disant que les lames sont *pola-*

risées. M. Becquerel et Faraday ont fait voir que cette polarité est un effet des dépôts engendrés par les courants secondaires.

Les lames de platine qui ont servi à la décomposition de l'eau pure acquièrent aussi la polarité électrique, sans qu'on puisse l'attribuer à l'effet d'un acide ou d'une base; mais Matteucci a fait voir qu'elle provient alors d'une couche d'oxygène et d'hydrogène déposée respectivement sur chaque lame.

PILES CLOISONNÉES A DEUX LIQUIDES

761. **Objet des piles à deux liquides.** — Dans les piles décrites jusqu'ici, lesquelles sont connues sous le nom de *piles à un seul liquide*, les causes qui concourent à l'affaiblissement du courant sont la transformation de l'acide sulfurique en sulfate de zinc, et la décomposition de ce sel par le courant intérieur de la pile, avec dépôts de zinc et d'hydrogène sur les lames de cuivre. Or le double objet des piles à deux liquides est : 1° de s'opposer aux dépôts de zinc et d'hydrogène sur les lames de cuivre; 2° de conserver à l'acide de la pile toujours le même degré de concentration.

On arrive à ce double résultat en faisant usage de deux liquides susceptibles de réagir l'un sur l'autre. Ils sont séparés par une *cloison* qui laisse passer facilement le courant, mais ne permet pas au zinc d'aller se déposer sur le cuivre. Enfin, les deux éléments d'un même couple plongent, l'un dans un des liquides, l'autre dans l'autre. Les piles ainsi construites présentent une constance d'intensité remarquable, qui leur a fait donner le nom de *piles à courant constant*. La première pile à courant constant est due à M. Becquerel, en 1829. Depuis on a beaucoup varié la forme de ces piles; les plus en usage sont la pile de Daniell et celle de Bunsen. La pile de Daniell satisfait seule aux deux conditions ci-dessus; c'est vraiment la pile à courant constant; celle de Bunsen ne satisfait qu'à la première condition.

762. **Pile de Daniell.** — En 1836, le chimiste anglais Daniell construisit la pile qui porte son nom, laquelle est surtout utilisée pour les courants peu intenses, mais de longue durée.

La figure 633 représente un couple ou un *élément* de cette pile, dont on a beaucoup varié la forme. Un vase V, de verre, est rempli d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge un cylindre de cuivre rouge C, percé latéralement de plusieurs trous et ouvert aux deux bouts. A la partie supérieure de ce cylindre est fixée une galerie annulaire G, percée sur son pourtour inférieur de petits trous qui plongent dans la dissolution. Cette galerie est destinée à contenir des cristaux de sulfate de

cuivre, qui se dissolvent à mesure que l'appareil fonctionne. Enfin, dans l'intérieur du cylindre C est un vase poreux, ou diaphragme P, de terre de pipe déglorée, plein d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, ou d'une dissolution de sel marin, ou même d'eau pure; dans le liquide plonge un cylindre de zinc Z, ouvert aux deux bouts et amalgamé. Aux cylindres zinc et cuivre sont fixées par des vis de pression deux lames minces de cuivre *p* et *n*, qui forment les électrodes de la pile.



Fig. 635.

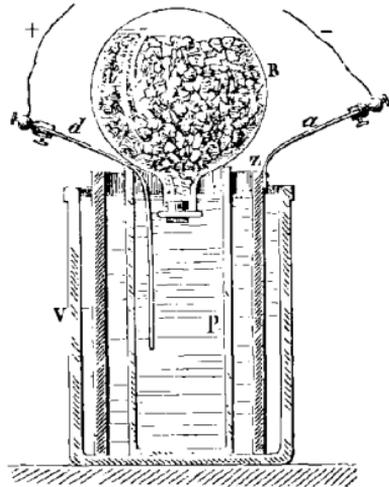


Fig. 636.

Tant que les deux électrodes ne communiquent pas entre elles, la pile est inactive; mais aussitôt que la communication est établie, l'action chimique commence: l'eau est décomposée, et l'acide sulfurique attaque le zinc, qui s'électrise négativement, tandis que l'eau acidulée s'électrise positivement (755). De celle-ci l'électricité positive se rend, à travers la cloison, dans la dissolution de sulfate, et enfin sur le cuivre C, qui devient ainsi le pôle positif. Quant à l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau, il est entraîné dans le sens du courant intérieur, et se rend dans la dissolution de sulfate de cuivre, dont il réduit l'oxyde et revivifie le cuivre, qui va former un dépôt sans adhérence sur le cylindre C. Par suite, la surface de celui-ci reste toujours identiquement la même, aucun dépôt d'hydrogène ne se faisant sur le cuivre. Enfin, l'oxyde de zinc qui provient de la décomposition du sulfate de zinc par le courant intérieur ne passe pas au travers du vase poreux, et reste dans la dissolution même où plonge le zinc. On voit donc disparaître ici les deux causes qui donnent naissance

aux courants secondaires dans les piles à un seul liquide (759).

Dans la pile de Daniell, la dissolution de sulfate de cuivre tend à s'appauvrir rapidement; mais les cristaux placés dans la galerie G se dissolvant au fur et à mesure, le degré de concentration reste constant. Quant à l'acide sulfurique rendu libre par la décomposition du sulfate de cuivre, il se porte, en même temps que l'oxygène de l'eau, vers le zinc pour le transformer en sulfate; et comme la quantité d'acide mise en liberté dans la dissolution de cuivre est régulière, l'action de cet acide sur le zinc l'est aussi, d'où résulte un courant constant. Quant aux pôles, c'est l'électrode fixée au zinc qui est négative, et celle fixée au cuivre qui est positive, comme dans les piles déjà décrites.

Au lieu d'un vase de terre poreuse, on prend aussi, pour la cloison qui sépare les deux dissolutions, une poche de toile à voiles ou de baudruche. L'effet est d'abord plus puissant; mais les deux dissolutions se mélangent plus rapidement, ce qui l'affaiblit. En général, les cloisons doivent être perméables au courant, mais prévenir autant que possible le mélange des deux liquides.

Avec la pile de Daniell, on obtient des effets constants pendant plusieurs jours, et même pendant plusieurs mois, lorsqu'on a soin de conserver la dissolution de sulfate de cuivre à l'état de saturation, en ajoutant de temps en temps des cristaux de ce sel.

763. **Pile à ballon.** — Dans l'élément représenté dans la figure 635, les cristaux de sulfate de cuivre doivent être renouvelés assez fréquemment; de plus, l'évaporation s'opérant facilement, le sulfate de zinc cristallise en grimpant sur les parois du vase poreux, ce qui établit une conductibilité nuisible par-dessus la cloison qui sépare les deux liquides.

Ces inconvénients disparaissent dans la *pile à ballon*, adoptée par M. Vérité. Dans un vase de faïence V (fig. 636) est de l'eau légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique, ou même de l'eau pure. Dans le liquide est un cylindre de zinc Z, puis un vase poreux P, rempli d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Dans cette dissolution plonge le goulot d'un ballon B rempli de cristaux du même sel et d'eau. Le goulot n'est fermé qu'en partie par un bouchon entaillé sur deux côtés. Par suite, aussitôt que le niveau baisse au-dessous du goulot, une bulle d'air entre dans le ballon et un volume égal de liquide saturé s'en écoule; d'où résulte un niveau constant. De plus, l'élément étant presque clos, l'évaporation est plus lente, et les cristaux grimpants moins abondants; aussi la pile marche-t-elle fort longtemps sans aucune surveillance.

Lorsqu'on fait usage d'eau pure au lieu d'eau acidulée, la pile n'a d'abord qu'une faible intensité au moment où l'on ferme le

circuit. Il importe donc d'établir celui-ci assez longtemps avant de faire usage de la pile, 24 heures au moins.

La figure 637 montre une association en batterie de la pile à

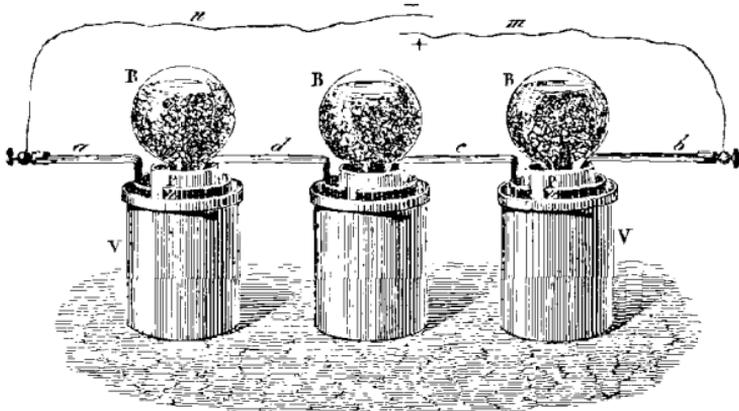


Fig. 637.

ballon. A chaque zinc, à partir du pôle positif, est soudée une lame de cuivre qui va plonger dans le vase poreux du couple suivant.

764. **Pile de Grove.** — Cette pile se compose : 1° d'un vase de verre A, en partie rempli d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique (fig. 638); 2° d'un

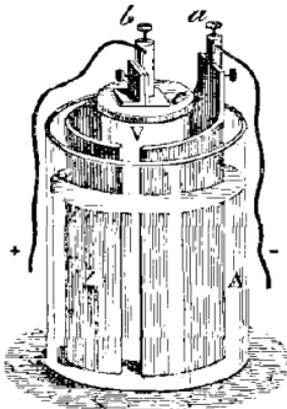


Fig. 638.



Fig. 639.

cylindre de zinc Z, ouvert aux deux bouts et fendu dans toute sa longueur; 3° d'un vase poreux V, de terre de pipe peu cuite, et rempli d'acide azotique ordinaire; 4° d'une lame de platine P, recourbée en S (fig. 639), et fixée à un couvercle c qui se pose sur le vase poreux. Une borne métallique b, communiquant avec la lame de platine, porte un fil de cuivre qui

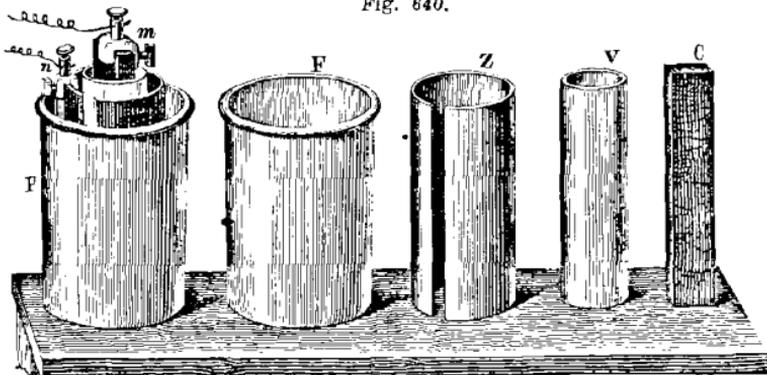
sert d'électrode positive, tandis qu'un second fil fixé au zinc est l'électrode négative.

Cette pile est peu en usage, à cause du prix du platine. Ce métal en outre, lorsque la pile a fonctionné un certain temps, de-

vient cassant et se brise par le plus petit effort; toutefois M. Adam a observé qu'en chauffant au rouge les lames de platine de la pile de Grove, elles reprennent leur élasticité. La théorie de la pile de Grove est la même que celle de la pile de Bunsen (765).

765. **Pile de Bunsen.** — La pile de Bunsen, ou pile à charbon,

Fig. 640.

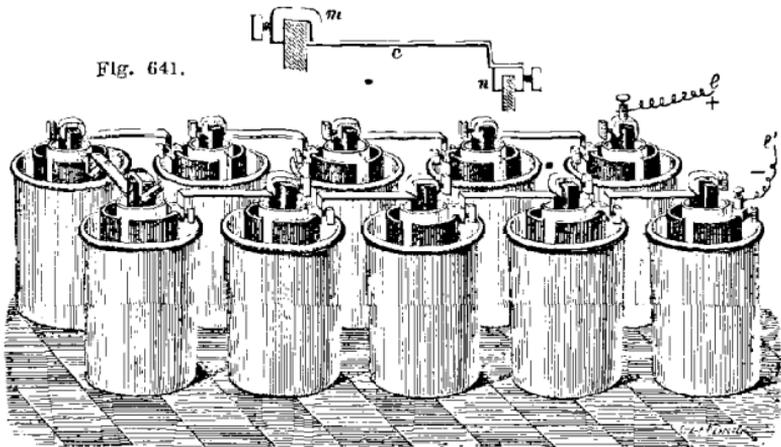


inventée en 1843, n'est autre chose que celle de Grove, dont la feuille de platine est remplacée par une plaque de charbon préparée en calcinant, dans un moule de tôle, un mélange intime de coke et de houille grasse, bien pulvérisé et fortement tassé.

Chaque élément de la pile à charbon se compose de quatre pièces pouvant se placer les unes dans les autres: 1° un bocal F (fig. 640), de grès ou de verre, plein d'une dissolution de 10 parties d'eau en volume pour une d'acide sulfurique; 2° un cylindre creux Z, de zinc amalgamé; 3° un vase poreux V, de terre de pipe peu cuite, dans lequel on met de l'acide azotique ordinaire; 4° une plaque de charbon C, préparé comme il a été dit ci-dessus, et bon conducteur. Dans le vase F se place d'abord le zinc, puis le vase poreux, et au centre le charbon, comme on le voit en P. Au charbon on fixe une pince de cuivre *m* sur laquelle est une borne avec un fil de cuivre, qui, ainsi qu'on va le voir ci-après, est l'électrode positive; au zinc est fixée une seconde pince *n* avec un fil qui est l'électrode négative. Ce système de pinces est généralement usité aujourd'hui. Il est, en effet, préférable aux lames de cuivre soudées aux zincs dont on fit d'abord usage, leurs soudures étant promptement attaquées par les acides et par le mercure qui sert à l'amalgamation du zinc; de plus, avec les pinces, on peut alternativement plonger le zinc par un bout ou par l'autre dans l'eau acidulée, et l'user ainsi également.

La pile est inactive tant que la communication n'est pas établie

par un conducteur entre le zinc et le charbon; mais dès qu'elle a lieu, l'action chimique commence. L'eau dans laquelle plonge le zinc étant décomposée par ce métal et par l'acide sulfurique, avec formation de sulfate de zinc, ce métal s'électrise négativement (755) et devient le pôle négatif du couple; l'eau acidulée s'électrisant au contraire positivement, l'électricité positive passe, au travers du vase poreux, dans l'acide azotique, et de là sur le



charbon, qui devient le pôle positif. L'hydrogène qui provient de la décomposition de l'eau ne se dépose pas sur le charbon, mais réduit l'acide azotique et le transforme en acide hypoazotique, en s'emparant d'un équivalent d'oxygène pour faire de l'eau. Quant au sulfate de zinc qui se forme, une partie est décomposée, comme dans les piles à un seul liquide, par le courant intérieur, et ici cette décomposition donne lieu à de l'acide sulfurique qui se porte sur le zinc, et à de l'oxyde de zinc qui, ne pouvant passer à travers le vase poreux pour se porter sur le charbon, reste dans le vase extérieur. Le charbon conserve donc une surface parfaitement nette, et c'est là ce qui contribue surtout à conserver au courant son intensité. Toutefois trois causes d'affaiblissement existent encore. 1^o Comme il n'y a toujours de décomposée qu'une portion du sulfate de zinc qui se produit, l'acide sulfurique libre va constamment en décroissant, cause d'affaiblissement qui n'existe pas dans la pile de Daniell. 2^o L'acide azotique s'appauvrissant de plus en plus en oxygène, l'hydrogène tend à se déposer sur le charbon. 3^o L'oxyde de zinc et les substances étrangères contenues dans ce métal, se portant sur le vase poreux, en obstruent les pores peu à peu et en diminuent la perméabilité pour le courant. De ces dif-

férentes causes il résulte que le courant s'affaiblit assez rapidement. Cependant, pour les courants dont le travail ne doit pas être trop prolongé, la pile de Bunsen est la plus énergique des piles à deux liquides et celle dont l'usage est le plus répandu. Toutefois elle a l'inconvénient de répandre des vapeurs d'acide hypoazotique tout à fait incommodes lorsque les couples sont nombreux.

Pour réunir plusieurs couples, on les dispose comme le montre la figure 641, dans laquelle le charbon de chaque couple est relié au zinc du suivant au moyen de deux pinces *m*, *n*, et d'une lame de cuivre *c*, représentées au-dessus de la figure. La lame de cuivre est serrée d'un bout entre le charbon et la pince par une vis de pression, et de l'autre elle va se souder sur la pince *n* qui se fixe sur le zinc du couple suivant, et ainsi de suite d'un pôle à l'autre. La pince du premier charbon et celle du dernier zinc sont seules munies de bornes, desquelles partent les électrodes *e* et *e'*.

756. Manipulation de la pile de Bunsen. — La manipulation de la pile de Bunsen est longue, pénible, et demande à être faite avec soin, si l'on veut obtenir de la pile tout son effet.

On doit d'abord faire le mélange d'eau et d'acide sulfurique d'avance dans un seul vase, afin d'avoir exactement le même degré de concentration pour tous les couples. Ayant versé premièrement l'eau dans un baquet de bois, on ajoute un dixième, en volume, d'acide sulfurique ordinaire, de manière que la dissolution marque 10 à 11 degrés au pèse-acide de Baumé. Si l'on n'a pas de pèse-acide, l'eau est suffisamment acidulée quand elle devient tiède, et qu'une goutte déposée sur la langue ne peut y être conservée.

Quant aux couples, ils doivent être rangés à la suite les uns des autres sur une table ou un plancher bien sec, en ayant soin d'éviter qu'ils ne se touchent entre eux par aucune de leurs pièces autres que les lames et les pinces de cuivre qui unissent le zinc de chaque élément au charbon de l'élément suivant. On verse ensuite, avec un entonnoir, l'acide azotique dans les vases poreux jusqu'à deux centimètres du bord, puis on remplit de la même manière les pots extérieurs avec l'eau acidulée jusqu'à un centimètre du bord, ce qui établit à peu près l'égalité de niveau des deux liquides, condition essentielle pour la constance de la pile. Dès que l'acide azotique est versé dans les vases poreux, on doit introduire l'eau acidulée, afin de ne pas donner à l'acide azotique le temps de traverser ces vases et de venir attaquer les zincs.

Le bon établissement du contact étant indispensable pour qu'une pile fonctionne bien, on doit décaper avec soin, en les frottant avec du papier de verre, les lames de cuivre qui s'engagent dans les pinces, et maintenir propres les faces internes de ces dernières.

L'acide azotique, s'il est neuf, doit marquer 40° au pèse-acide, et peut servir jusqu'à ce qu'il ne marque plus que 26°. On y ajoute alors un cinquantième, en volume, d'acide sulfurique; mais après cette addition, il ne peut servir qu'une fois. L'eau acidulée sert généralement deux fois, à moins que le sulfate de zinc formé ne commence à cristalliser.

Ce qu'on doit le plus observer pour conserver la pile en bon état, c'est l'amalgamation des zincs (767). On reconnaît qu'un zinc a besoin d'être amalgamé quand il fait entendre un sifflement dans l'eau acidulée sans que la pile soit en activité. S'il est fortement attaqué, on voit l'eau fumer et même bouillonner; dans ce cas, il faut retirer le zinc, sinon quelques heures suffisent pour le trouser.

Pour amalgamer les zincs, on les trempe quelques secondes dans l'eau acidulée (la même que celle de la pile), afin de les décaper; puis on les place un à un dans un vase de terre contenant un peu d'eau acidulée (deux fois plus que la première), et deux kilogrammes de mercure environ qu'on étend sur le zinc à l'aide d'une brosse de fils de fer. Quand les zincs sont amalgamés, on les plonge dans un baquet d'eau, au fond duquel, après l'opération, on retrouve l'excès de mercure.

767. Propriété du zinc amalgamé. — De la Rive a observé que le zinc parfaitement pur n'est pas attaqué par l'acide sulfurique étendu d'eau, mais le devient si on le met en contact avec une lame de platine ou de cuivre plongée dans la dissolution. Le zinc ordinaire du commerce, au contraire, qui n'est pas pur, est vivement attaqué par l'acide étendu; mais, amalgamé, il acquiert la propriété du zinc pur, et n'est attaqué qu'autant qu'il se trouve en contact avec un fil de cuivre ou de platine plongeant aussi dans la dissolution, c'est-à-dire qu'autant qu'il fait partie d'un couple en activité.

On explique la vive action de l'acide sulfurique sur le zinc ordinaire par les substances étrangères qu'il renferme, lesquelles, étant plus ou moins attaquables que ce métal, présentent à sa surface des parties où la force électromotrice est inégale; de là des courants qui entretiennent l'action chimique.

La propriété du zinc amalgamé a été appliquée aux piles par Kemp, qui, le premier, a imaginé d'amalgamer les zincs de chaque couple. Il résulte de cette amalgamation que tant que le circuit n'est pas fermé, c'est-à-dire tant qu'il n'y a pas courant, le zinc n'est pas attaqué; de là une grande économie de métal. On observe, en outre, qu'avec le zinc amalgamé, le courant est plus régulier, et, en même temps, plus intense pour une même quantité de métal dissous.

* NOUVELLES PILES

768. Pile au bichromate de potasse. — De nombreuses modifications ont été apportées aux piles à courant constant: nous citerons surtout la *pile au bichromate de potasse* de Bunsen, la *pile au sulfate de mercure* de Marié-Davy, la *pile sans diaphragme* de Callaud, et la *pile à sable* de Minotto.

La pile au bichromate de potasse est de deux sortes: à deux liquides ou à un seul. Celle à deux liquides ne diffère de la pile à charbon décrite et-dessus (fig. 640), qu'en ce que l'acide azotique du vase poreux est remplacé par la dissolution suivante: 900 gr. d'eau, 50 gr. de bichromate et 50 gr. d'acide sulfurique. On fait dissoudre à chaud le bichromate, puis on ajoute l'acide. Quant à l'eau du vase de grès, elle est acidulée au vingtième d'acide sulfurique. Cette pile offre le grand avantage de ne point répandre de vapeur d'acide hypoazotique, mais elle se polarise très-rapidement par un dépôt d'oxyde de chrome sur le zinc, et donne alors un courant peu intense.

Dans la pile à un seul liquide, lequel est encore une dissolution de bichromate de potasse et d'acide sulfurique, le vase poreux est supprimé, et les couples sont composés de deux plaques de zinc, et, entre celles-ci, d'une plaque de charbon; toutes les trois sont fixées à un disque de caoutchouc durci et plongent dans le même vase. Cette pile se polarise très-rapidement; mais Ruhmkorff a observé qu'en réduisant la longueur des plaques de zinc à un quart ou à un cinquième de celle du charbon, la pile ne se polarise que lentement et peut fonctionner pendant 9 à 10 heures.

769. Pile au sulfate de mercure. — La pile au sulfate de mercure a reçu différentes dispositions. Celle généralement adoptée est identiquement la même que pour la pile de Bunsen quant aux pièces qui la composent, seulement avec des dimensions beaucoup moindres. De plus, dans le vase extérieur V (fig. 642), au lieu d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, on met de l'eau ordinaire ou une dissolution de chlorure de sodium; et dans le vase poreux, au lieu d'acide

azotique, du bisulfate de protoxyde ou de bioxyde de mercure. Ce sel étant peu soluble, on le délaye à l'état pulvérulent dans trois fois son volume d'eau environ, puis on décante, et l'on a un résidu pâteux. Ayant d'avance mis le charbon dans le vase poreux, on remplit les vides avec ce résidu, et l'on verse dessus le liquide qu'on a décanté.

La pile ainsi disposée, l'action chimique ne se produit qu'autant que les deux pôles sont réunis par un conducteur. Alors, en considérant le cas où le vase extérieur ne contient que de l'eau, le zinc décompose celle-ci en s'oxydant lentement, tandis que l'hydrogène mis en liberté se rend dans le vase poreux, où

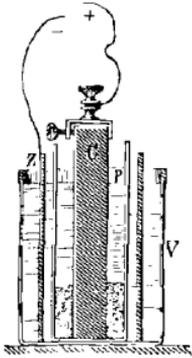


Fig. 642.

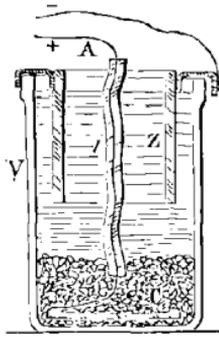


Fig. 643.

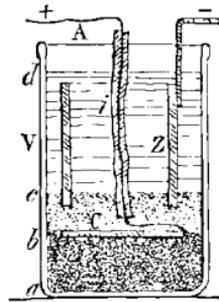


Fig. 644.

il réduit l'oxyde de mercure. L'acide sulfurique qui devient libre se porte alors sur le zinc; quant au mercure métallique, il se dépose sur le charbon, d'où il tombe au fond du vase poreux, où on le recueille quand la pile est épuisée. C'est là une économie importante, puisque ce même mercure peut ensuite servir à préparer une quantité de sulfate égale à celle qui a été décomposée. Une petite quantité du sulfate de mercure dissous peut, à travers le vase poreux, se rendre sur le zinc; mais il ne produit là qu'un effet utile, le mercure s'amalgamant avec ce métal.

La pile à sulfate de mercure s'épuise rapidement quand elle fonctionne d'une manière continue; mais elle peut fonctionner pendant trois à quatre mois pour des courants interrompus, comme ceux qui servent à faire marcher les télégraphes, les sonneries d'appartements, etc.

770. **Pile de Callaud.** — Dans la pile de Daniell, les vases poreux, à la longue, s'incrassent de cuivre, ce qui diminue leur perméabilité. M. Callaud, à Nantes, a obvié à cet inconvénient en supprimant le vase poreux et toute espèce de diaphragme, et en n'obtenant la séparation des deux liquides que par leur différence de densité et par le passage même du courant.

La pile de Callaud se compose d'un vase V de verre ou de faïence (fig. 643). Dans le vase est une plaque de cuivre C à laquelle est soudé un fil de cuivre A, isolé du reste de la pile par un conduit de gutta-percha. Au-dessus de la plaque est une couche de cristaux de sulfate de cuivre; puis on achève de remplir avec de l'eau pure; enfin, dans le liquide est immergé en entier un cylindre de zinc Z, pareil à ceux des piles déjà décrites, mais d'une hauteur deux fois moindre. La partie inférieure du liquide se sature de sulfate de cuivre, tandis que la partie supérieure reste à peu près pure, les deux liquides étant maintenus séparés par leur différence de densité et aussi par le passage du courant intérieur. Du reste, la théorie de cette pile est la même que celle de la pile de Daniell.

La pile de Callaud est non-seulement d'une manipulation simple, mais elle procure une notable économie de sulfate de cuivre, et fournit des courants con-

stants pendant deux mois, sans autre soin que d'ajouter un peu d'eau pour remplacer celle qui se perd par l'évaporation; aussi est-elle généralement adoptée aujourd'hui pour le service des télégraphes. 60 couples suffisent pour faire marcher les appareils de Tours à Bordeaux sans relais.

771. **Pile de Minotto.** — M. Minotto, à Turin, pour rendre la séparation des deux liquides plus complète, a ajouté à la pile de Callaud une couche de sable un peu gros ou de brique pilée *bc*, placée au-dessus du sulfate de cuivre *ab* (fig. 644), qui ici est réduit en poudre pour ne pas laisser passer le sable. La couche *bc* rend, en effet, la séparation des deux liquides plus complète; mais elle présente au courant intérieur, dans la pile, une résistance d'autant plus grande, qu'elle est plus épaisse.

La pile Callaud et la pile Minotto sont substituées aujourd'hui à la pile de Daniell sur la plupart des lignes télégraphiques.

Il existe encore plusieurs espèces de piles nouvelles, telles que celles de Gaston Planté, de Duchemin, de Carré, de Delaurier, de Granet, de Trouvé, de Warren de la Rüe, qu'il nous est impossible de donner ici.

CHAPITRE III

EFFETS DES COURANTS, LOIS DE L'ÉLECTROLYSE, GALVANOPLASTIE, DORURE ET ARGENTURE

772. **Effets divers des courants.** — Les effets de l'électricité dynamique se divisent en *effets physiologiques, calorifiques, lumineux, mécaniques, chimiques, magnétiques et induisants*. Ces effets diffèrent de ceux que présente l'électricité statique, en ce que ces derniers sont dus à une recombinaison instantanée des deux électricités à forte tension; tandis que les premiers résultent d'une recombinaison lente et à tension beaucoup plus faible, lorsque les deux pôles de la pile sont réunis par un circuit conducteur. Par la continuité de la force qui les produit, les effets des courants sont beaucoup plus remarquables que ceux des machines électriques.

Les effets calorifiques et lumineux dépendent de la quantité d'électricité mise en mouvement dans la pile, et par conséquent de la surface des couples. Il importe donc de monter alors ceux-ci de manière à multiplier la surface, ce qui s'obtient en les disposant en plusieurs séries parallèles dont on réunit les pôles de même nom.

Les effets chimiques, au contraire, ainsi que les effets physiologiques, dépendent de la tension, et par suite du nombre des couples; c'est pourquoi ceux-ci doivent être ici associés en une série longitudinale. Dans tous les cas, le maximum d'effet avec un nombre de couples donné s'obtient en les disposant de manière que la résistance intérieure de la pile égale celle du circuit extérieur que doit parcourir le courant (825). Enfin, tous les effets de la pile augmentent avec l'intensité de l'action chimique.

Faraday, qui a fait de nombreuses expériences sur les fils de cuivre revêtus de gutta-percha, a trouvé que les effets physiques et physiologiques produits par un courant qui passe dans des fils très-longs sont très-faibles, et même insensibles, quand les fils sont dans l'air, et qu'au contraire les mêmes effets sont très-intenses lorsque les fils sont immergés dans l'eau ou plongés dans le sol. Faraday, qui expérimentait sur des fils de 160 kilomètres de longueur, explique ce phénomène en comparant le fil de cuivre recouvert de gutta-percha et entouré d'eau à un condensateur construit sur une grande échelle : explication qui est confirmée par les effets qui se produisent dans la transmission du flux électrique dans les câbles sous-marins (875).

EFFETS PHYSIOLOGIQUES

773. Actions sur les nerfs et sur les muscles. — On a vu que ces effets furent les premiers observés, puisque c'est à eux qu'est due la découverte de l'électricité dynamique par Galvani (742). Ils consistent en commotions et en contractions musculaires très-énergiques quand les piles sont puissantes.

En prenant dans les deux mains les électrodes d'une forte pile, on ressent une commotion violente, comparable à celle de la bouteille de Leyde, surtout si les mains sont mouillées d'eau acidulée ou salée, ce qui augmente la conductibilité. La commotion est d'autant plus intense, que les couples sont plus nombreux. Avec une pile de Bunsen de 50 à 60 couples, petit modèle, la commotion est forte; avec 150 à 200 couples, elle est insupportable, et même dangereuse. Elle se fait ressentir moins avant dans les bras que la commotion de la bouteille de Leyde, et transmise par une chaîne de plusieurs personnes, elle n'est ressentie que par celles qui sont plus rapprochées des pôles.

Les effets physiologiques des courants ne sont pas les mêmes sur les nerfs sensitifs, sur les nerfs moteurs et sur les muscles. Si le courant agit sur les premiers seuls, il y a douleur; sur les seconds, il y a commotion; sur les muscles, il y a contraction; mais il faut alors un courant à plus forte tension.

Tous ces effets ne se font sentir qu'à la fermeture et à l'ouverture du courant, cessant aussitôt que le courant est invariablement établi, du moins s'il est peu intense; car avec des courants énergiques les commotions et les sensations persistent, la pile se rechargeant d'une manière continue en même temps que les électricités se réunissent par les muscles et par les nerfs; seulement elles sont beaucoup plus faibles qu'à la fermeture et à l'ou-

verture du circuit. Enfin, les effets des courants sur les nerfs varient suivant qu'ils se propagent dans le sens des ramifications nerveuses ou en sens contraire.

Par l'effet du courant, des lapins asphyxiés depuis une demi-heure ont pu être rappelés à la vie; une tête de supplicé a éprouvé de si effroyables contractions, que les spectateurs fuyaient épouvantés. Le tronc, soumis à la même action, se soulevait en partie; les mains s'agitaient, frappaient les objets voisins, et les muscles pectoraux imitaient le mouvement respiratoire. Enfin, tous les actes de la vie se reproduisaient imparfaitement, mais cessaient instantanément avec le courant.

EFFETS CALORIFIQUES

774 Fusion et volatilisation. — Un courant qui parcourt un fil métallique produit des effets analogues à ceux des batteries (737): le fil s'échauffe, devient incandescent, fond ou se volatilise, selon qu'il est plus ou moins long et d'un diamètre plus ou moins fort. Avec une pile puissante, tous les métaux sont fondus, même l'iridium et le platine, qui résistent au feu de forge le plus intense, et ne sont fondus que par la flamme au gaz oxyhydrique. Le charbon est le seul corps qui n'ait pu être fondu jusqu'ici par la pile. Cependant Despretz, avec une pile de 600 éléments de Bunsen, réunis en six séries parallèles, a porté des baguettes de charbon très-pur à une température telle, qu'elles se sont courbées, ramollies, et ont pu se souder ensemble; ce qui indique un commencement de fusion.

Dans les mêmes expériences, ce savant a transformé le diamant en graphite, et a obtenu, par une action assez prolongée, de petits globules de charbon fondu. Il a pu fondre en quelques minutes 250 grammes de platine; en n'opérant que sur quelques grammes, une partie a été volatilisée.

Il suffit d'une pile de 30 éléments de Bunsen pour fondre et volatiliser avec rapidité des fils fins de plomb, d'étain, de zinc, de cuivre, d'or, d'argent, de fer et même de platine, avec de vives étincelles diversement colorées. Le fer et le platine brûlent avec une lumière d'un blanc éclatant; le plomb, avec une lumière purpurine; celles de l'étain et de l'or sont d'un blanc bleuâtre; celle du zinc est mêlée de blanc et de rouge; enfin, le cuivre et l'argent donnent une lumière verte.

En faisant passer le courant dans des fils métalliques de même diamètre et de même longueur, mais de substances différentes, Children a constaté que ce sont ceux dont la conductibilité électrique est moindre qui s'échauffent davantage; d'où l'on a conclu

que les effets calorifiques de la pile sont dus à la résistance que rencontre le courant pour traverser le conducteur qui réunit les pôles. Lorsque les électrodes sont de même substance, c'est l'électrode positive qui s'échauffe le plus.

On a déjà remarqué (772) que les effets calorifiques dépendent plus de la quantité d'électricité que de la tension; en d'autres termes, ils dépendent plus de la surface des couples que de leur nombre. On parvient, en effet, à fondre un fil de fer fin avec un seul couple de Wollaston dont le zinc a $0^m,20$ sur $0^m,15$.

Le passage du courant à travers un liquide l'échauffe aussi, et d'autant plus, que le courant est plus intense et que le liquide est moins bon conducteur; mais les effets calorifiques des courants sont plus difficiles à observer dans les liquides, ces corps ayant une plus grande chaleur spécifique que les solides, et les gaz qui se produisent absorbant une grande quantité de chaleur latente. Par exemple, dans la décomposition de l'eau, on reconnaît que l'élévation de température est moindre au pôle négatif, où le volume de l'hydrogène qui se dégage est double de celui de l'oxygène qu'on recueille au pôle positif (784).

775. Lois de la chaleur produite par le passage des courants. — En interposant, dans un courant, un fil métallique enroulé en spirale dans un tube de verre plein d'eau, faisant l'office de calorimètre, M. Joule, en Angleterre, et M. Ed. Becquerel, en France, ont trouvé que le dégagement de la chaleur par le passage de l'électricité au travers des corps solides présente les lois suivantes :

1^o *La quantité de chaleur dégagée est en raison directe du carré de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné.*

2^o *Cette quantité de chaleur est en raison directe de la résistance du fil au passage de l'électricité.*

3^o *Quelle que soit la longueur du fil, si son diamètre est constant et qu'il passe la même quantité d'électricité, l'élévation de température est la même dans toute l'étendue du fil.*

4^o *Pour une même quantité d'électricité, l'élévation de température, en différents points du fil, est en raison inverse du cube du diamètre.*

776. Cause de la chaleur dégagée dans la pile, travail correspondant. — La chaleur qui se produit dans la pile est due à l'oxydation du zinc et à la combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique. M. Joule a fait voir qu'elle est proportionnelle au nombre d'équivalents de zinc consommés pour produire le courant, celui-ci ne créant pas de chaleur, mais ne faisant que transporter dans les différentes parties du circuit, proportionnellement à la résistance, la chaleur développée dans la pile par les actions chimiques.

Silbermann et M. Fabre, qui ont vérifié la loi de Joule à l'aide de leur calorimètre (406), ont constaté que la double action chimique de l'oxydation du zinc et de la combinaison avec l'acide sulfurique de l'oxyde formé, dégage 18 796 calories (393) par équivalent de zinc dissous, et que ces calories se retrouvent intégralement dans le circuit de la pile, extérieur et intérieur.

L'action électromotrice dans la pile se traduisant en chaleur, et celle-ci pouvant toujours se convertir en travail (408), on a pu comparer la pile à une machine à feu, dans laquelle la combustion du zinc remplace celle du charbon, et capable de produire un travail déterminé, équivalent à la chaleur qui disparaît dans le circuit. En effet, M. Fabre ayant placé, dans un des moufles du calorimètre à mercure, une petite pile, et, dans l'autre, un très-petit moteur électro-magnétique (877) qu'on pouvait faire marcher à volonté, a trouvé que, tant que la machine était en repos, la chaleur dégagée dans la pile et dans tout le circuit était constamment de 18 796 par équivalent de zinc; mais que, la machine fonctionnant, le nombre de calories diminuait, et que la chaleur disparue était proportionnelle au travail effectué (409).

EFFETS LUMINEUX

777. Arc voltaïque. — La pile est, après le soleil, la source de lumière la plus intense. Ses effets lumineux se manifestent par des étincelles, par l'incandescence des substances qui réunissent les deux pôles, et par l'arc voltaïque.

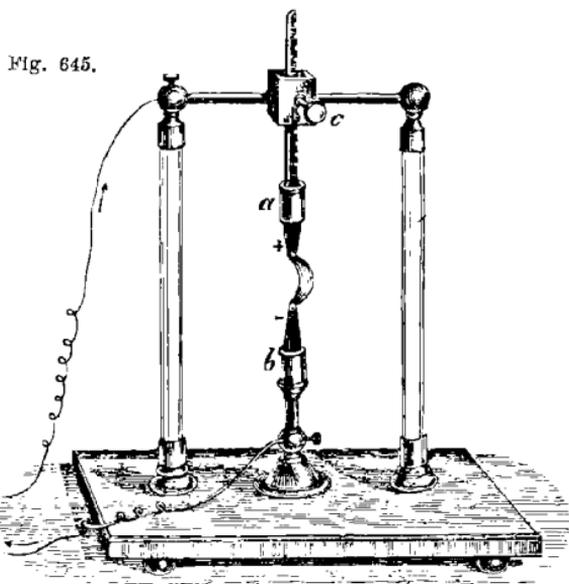
Les pôles d'une pile, à moins d'un nombre de couples considérable, possédant peu de tension, il ne se produit point d'étincelle quand on les réunit par un fil de cuivre; mais, à la rupture du circuit, une étincelle apparaît, d'autant plus forte, que les couples sont plus nombreux.

Par l'incandescence des conducteurs qu'ils traversent, les courants offrent des effets lumineux remarquables. Un fil de fer ou de platine, qui réunit les deux pôles d'une forte pile, et est assez gros pour n'être pas fondu, devient incandescent et jette un vif éclat tout le temps que la pile est en activité. Si le fil est enroulé sur lui-même en hélice, l'effet lumineux est augmenté (886).

Mais c'est surtout en faisant communiquer les électrodes avec deux cônes de charbon de coke bien calciné qu'on obtient un bel effet de lumière électrique (fig. 645). Le charbon *b* est fixe, tandis que le charbon *a* s'élève ou s'abaisse plus ou moins à l'aide d'une crémaillère à laquelle il est fixé, et d'un pignon qu'on fait tourner à la main par un bouton *c*. Les charbons étant mis en contact, le

courant passe et les rend aussitôt incandescents. Si on les écarte alors, il se produit de l'un à l'autre un arc lumineux d'un éclat éblouissant, auquel on a donné le nom d'*arc voltaïque*.

La longueur de l'arc varie avec l'intensité du courant; dans l'air, il peut atteindre une longueur de 7 centimètres, avec une pile de 600 couples disposés en six séries parallèles de 100 chacune,



quand le charbon positif est en haut; s'il est en bas, l'arc est plus court de près de 2 centimètres. Lorsque les charbons sont disposés horizontalement, ils doivent être plus rapprochés, l'arc s'éteignant plus facilement; ce qui résulte de ce que le refroidissement par l'air est augmenté. Dans l'air très-raréfié, la distance entre les deux charbons peut devenir beaucoup plus grande; l'électricité, ne rencontrant qu'une faible résistance, s'élanche des deux charbons même avant qu'on les ait amenés au contact. L'arc voltaïque peut aussi se produire dans les liquides; mais il est alors beaucoup moins long, et son éclat est bien affaibli.

Lorsque, le courant ne passant pas encore, on rapproche les charbons pour l'établir, on remarque que c'est sur le charbon négatif qu'apparaît d'abord la lumière; puis le charbon positif s'échauffant davantage (774), c'est ensuite lui qui présente le plus vif éclat.

L'arc voltaïque jouit de la propriété, lorsqu'on lui présente un fort aimant, d'être dirigé par celui-ci, ce qui est une conséquence de l'action des aimants sur les courants (838).

C'est Davy qui, le premier, à Londres, en 1801, fit l'expérience de la lumière électrique à l'aide de deux cônes de charbon et d'une pile à auges de 2000 couples dont les plaques avaient près de 11 centimètres de côté. Davy faisait usage de charbon de bois léger, éteint à l'état incandescent dans un bain de mercure, qui, en pénétrant dans les pores du charbon, en augmentait la conductibilité. Comme le charbon de bois brûle très-vite à l'air, on était obligé d'opérer dans le vide; c'est pourquoi l'expérience de la lumière électrique a longtemps été faite en plaçant les deux cônes de charbon dans l'œuf électrique (fig. 614). Aujourd'hui qu'on fait uniquement usage, dans ces expériences, de charbon de coke provenant des résidus des cornues à gaz, ce charbon, qui est dur et compacte, et peut être taillé en baguettes, ne brûle que lentement à l'air, ce qui dispense d'opérer dans le vide. Quand l'expérience se fait dans le vide, il n'y a pas combustion, mais le charbon positif se creuse et perd de son poids, tandis que le charbon négatif s'allonge et augmente de poids.

L'éclairage électrique est utilisé aujourd'hui dans les théâtres, dans les fêtes publiques, dans les ateliers, dans les phares; avec 80 à 100 couples Bunsen, on obtient un puissant éclairage; mais son prix de revient l'emporte de beaucoup sur l'éclairage au gaz.

778. Transport par l'arc voltaïque, sa constitution. — Lorsque l'arc voltaïque se produit entre deux cônes de charbon, on vient de voir que le charbon positif décroît lentement, même dans le vide, et se creuse, tandis que le charbon négatif augmente; d'où l'on conclut qu'il y a transport des molécules de charbon du premier pôle au second. Dans l'air, par suite de ce transport et d'une combustion lente, et avec des charbons de coke, le charbon positif s'use deux fois plus vite que le charbon négatif. Si, au lieu de se former entre deux charbons, l'arc se forme entre deux métaux différents, cuivre et argent par exemple, on reconnaît, par les dépôts qui se produisent, qu'il y a transport dans les deux sens; mais c'est du pôle positif au pôle négatif que le transport est plus abondant.

La haute température qu'atteignent les charbons au moment où on les met en contact, puis le transport qui se produit lorsqu'on les sépare, montre que l'arc voltaïque est dû aux molécules de charbon volatilisées, puis transportées d'un pôle à l'autre. Elles forment une chaîne continue qui suffit pour fermer le courant; mais cette chaîne, présentant une grande résistance, s'échauffe, d'après la deuxième loi de la distribution de la chaleur dans le circuit (775), jusqu'à produire le vif éclat qui constitue l'arc.

C'est par suite de cette résistance qu'on ne peut obtenir l'arc

qu'avec un grand nombre de couples, 40 Bunsen au moins, disposés en une seule série. C'est par la même cause que l'écart entre les deux charbons a une limite au delà de laquelle l'arc s'éteint. On le fait naître de nouveau, en rapprochant les charbons jusqu'au contact, ou en faisant passer de l'un à l'autre une forte étincelle électrique. Plus les électrodes sont facilement désagrégées par le courant, plus on peut les écarter sans éteindre l'arc. Le charbon, qui est une substance très-friable, est un des corps qui donnent l'arc voltaïque le plus long.

779. **Projection des deux charbons.** — On doit à Foucault une belle expérience qui consiste à projeter, à l'aide de lentilles, l'image

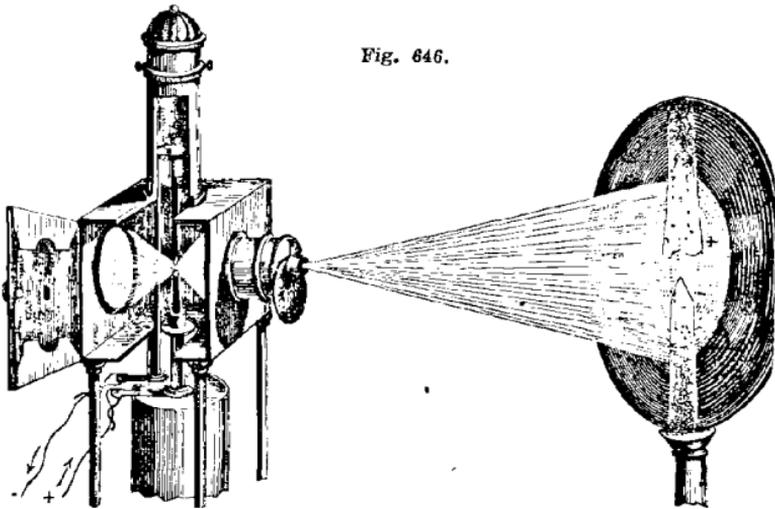


Fig. 646.

des cônes de charbon sur un écran, dans la chambre noire, au moment où la lumière électrique se produit (fig. 646). Cette expérience, qui se fait au moyen du microscope photo-électrique déjà décrit (fig. 491, page 544), met à même de distinguer très-bien les deux charbons incandescents, et l'on voit le charbon positif se creuser et diminuer, tandis que l'autre augmente. Quant aux globules représentés sur les deux charbons, ils proviennent de la fusion d'une petite quantité de silice contenue dans le coke dont ces charbons sont formés.

* 780. **Régulateur de la lumière électrique de Foucault.** — La lumière que fournit l'arc voltaïque présente l'inconvénient de ne pas conserver la continuité d'éclat qu'on rencontre dans les autres lumières; ce qui tient à ce que les charbons s'usent rapidement, l'intervalle qui les sépare augmente de plus en plus, et, par suite, l'intensité du courant décroît. Pour obvier à ce défaut, on s'est uniquement attaché d'abord à construire des régulateurs qui, mus par le cou-

rant lui-même, n'ont d'autre fonction que de rapprocher les charbons à mesure qu'ils s'usent. La lumière ainsi obtenue n'est pas complètement régulière. En effet, les charbons, n'étant jamais parfaitement purs, contiennent des matières étrangères et notamment de la silice qui, sous l'influence de la haute tempéra-

Fig. 647.

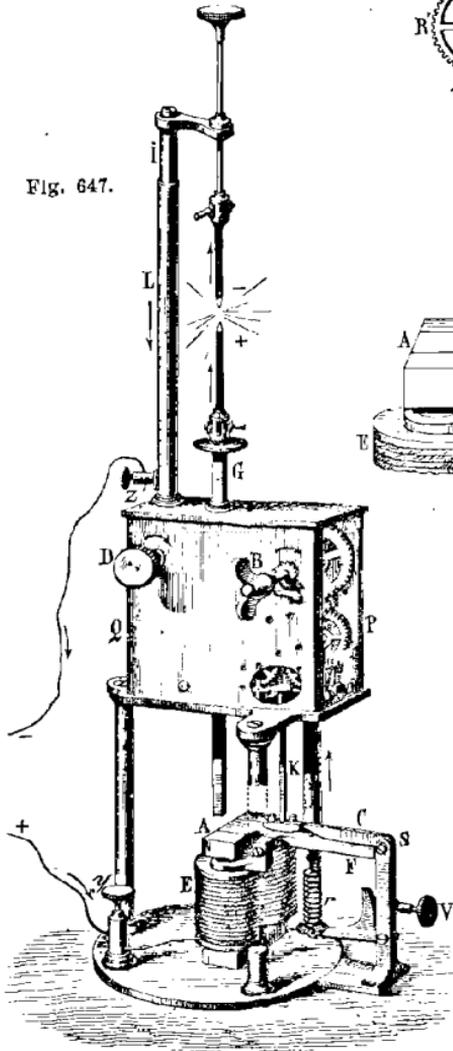
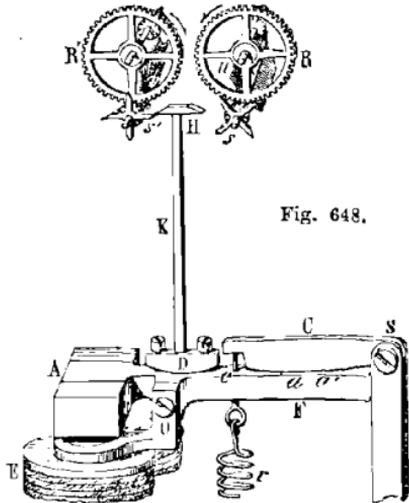


Fig. 648.



ture des charbons, entrent en fusion et forment, à l'extrémité de ceux-ci, un *champignon* qui en diminue l'intervalle, ce qui augmente l'éclat.

Foucault, le premier, construisit un régulateur qui rapprochait les charbons. Plus tard, le même savant a inventé un nouveau régulateur extrêmement sensible qui produit successivement le rapprochement et l'écart des charbons aussitôt que leur distance varie de la quantité la plus faible.

La figure 647 en donne une vue d'ensemble, et les figures 648, 649 et 650 en montrent les détails. L'appareil se compose d'une boîte de laiton PQ, dans laquelle sont deux mouvements d'horlogerie, tendant, l'un à rapprocher les charbons, l'autre à les écarter. Au-dessus de la boîte sont les deux charbons, le positif fixé à une tige mobile G, et le négatif porté par une tige I qui glisse à frottement doux dans une douille L. Les deux mouvements, qu'on monte à l'aide des boutons B et D, arrêtent à la fois les deux charbons, ou n'en laissent

marcher qu'un seul. Enfin, au-dessous de la boîte est l'appareil dans lequel passe le courant, et qui sert de régulateur aux mouvements d'horlogerie.

Représenté plus en grand dans la figure 648, il se compose d'abord d'un électro-aimant E dans lequel passe d'une manière continue le courant. Au-dessus de l'électro-aimant est une armature de fer doux A, fixée à l'extrémité d'un levier F, mobile autour d'un axe O. Cette armature n'est jamais en contact avec l'électro-aimant, mais s'en approche d'autant plus, que les charbons sont moins écartés, c'est-à-dire que le courant est plus intense. Au-dessus du levier F en est un second C, dont le point d'appui est en S, et qui est constamment entraîné de haut en bas par un ressort à boudin r attaché à son extrémité.

Le levier C étant courbe sur sa face inférieure, cette courbure en fait un levier à résistance variable, dont Robert Houdin a, le premier, indiqué l'usage, et qui donne ici à l'appareil une extrême sensibilité. En effet, l'armature A, tendant sans cesse à s'abaisser par l'attraction de l'électro-aimant, est en même temps sollicitée de bas en haut par le bras de levier F, qui est constamment sollicité à s'abaisser par la pression du ressort r que lui transmet le levier C. Or le point d'application de cette pression varie à mesure que le levier F s'incline. Dans le dessin (fig. 648), le point d'appui est en α ; mais si l'armature s'abaisse tant soit peu, il passe en α' . Le bras de levier ac , sur lequel agit le ressort r , augmente donc aussitôt que l'armature A s'abaisse. En résumé, l'intensité du courant et, par suite, le pouvoir attractif de l'électro-aimant croissant, la résistance en sens contraire croît en même temps. De là une oscillation continue, mais dans des limites très-resserrées, du levier F.

A ce levier est fixée une pièce D, sur laquelle s'élève une tige K, qui participe avec D aux oscillations du levier. La tige K se termine par une pièce H qui embraye, à droite et à gauche, avec des dents s, s' , fixées sur les axes de deux petits pignons, axes qui portent en outre des ailettes u et v recevant une rotation rapide des roues R et R' mues par les deux mouvements d'horlogerie. Ces ailettes, par la résistance qu'elles rencontrent dans l'air, sont destinées à ralentir le mouvement et à le régulariser. Lorsque la tige K incline à droite, l'embrayeur H bute contre la dent s , l'arrête et avec elle tout le mécanisme de droite. Celui de gauche marche alors seul, et les charbons se rapprochent. Si, au contraire, l'embrayeur incline à gauche, il arrête s' et tout le mécanisme de gauche. C'est celui de droite qui fonctionne maintenant, et les charbons s'écartent. Enfin, lorsque la tige K est verticale, l'embrayeur arrête à la fois les deux mécanismes, et les charbons sont fixes. Les oscillations de l'armature étant toujours très-petites, il en est de même de celles de l'embrayeur, et, par suite, les charbons n'avancent et ne reculent qu'infinitement peu avec les variations du courant; ce qui procure à la fois une grande fixité du point lumineux et de l'éclat de la lumière.

Pour compléter la description de l'appareil, il reste à décrire le mécanisme qui transmet un mouvement alternativement de sens contraire aux charbons. Les détails et la marche en sont représentés dans les figures 649 et 650, dans lesquelles les flèches indiquent le sens de la rotation des roues, et les numéros 1, 2, 3, ... l'ordre dans lequel elles se mènent. Deux barilletts M et N font successivement marcher les ronages. Le barillet N est le plus puissant, et assez pour remonter l'autre. L'arbre du barillet M (fig. 649) porte trois roues : la roue supérieure fait marcher une crémaillère G, qui porte le charbon positif; l'inférieure, qui est d'un diamètre deux fois moindre, fait marcher la crémaillère I, qui porte le charbon négatif. Du rapport du diamètre des deux roues, il résulte que la crémaillère I, pour un même nombre de tours du barillet, avance deux fois moins vite que la crémaillère G.

Quant à la roue intermédiaire, indiquée par le n° 2, elle mène la roue 3; celle-ci entraîne la roue 4, qui est sur le même axe; puis la roue 4 mène la roue 5.

C'est cette dernière, qu'on nomme la *roue satellite*, qui relie entre eux les deux barillets. Elle est seule liée à l'axe *pq*; les deux roues qui sont au-dessus et celle qui est au-dessous, quoique ajustées sur l'axe *pq*, sont *folles*, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas liées à cet axe et tournent sans lui. De plus, près des bords de la roue satellite 5, est implanté un axe qui la traverse et porte au-dessus

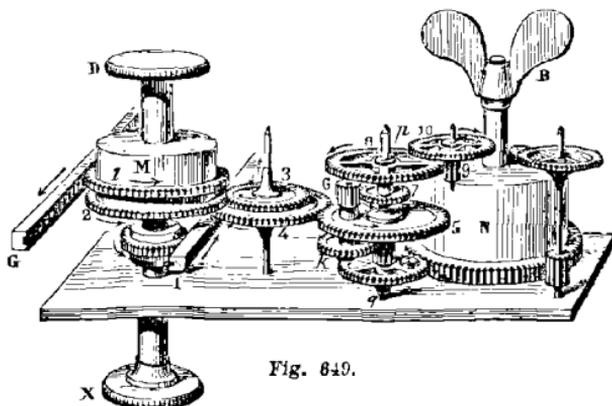


Fig. 649.

un pignon 6 et au-dessous une petite roue *k*. La roue satellite, menée par la roue 4, entraîne autour de l'axe *pq* le pignon 6, lequel met en mouvement la roue 7 et en même temps la roue 8 qui est liée avec elle. Puis la roue 8 mène le pignon 9 et la roue 10, et enfin cette dernière, par deux pignons et deux roues qui ne sont pas représentés dans le dessin, transmet le mouvement à la roue *R* et à l'ailette *v* (fig. 648).

Dans le mécanisme qui vient d'être décrit, le barillet *N* reste fixe, le barillet *M* fonctionne seul, et les engrenages intermédiaires n'ont d'autre usage que de

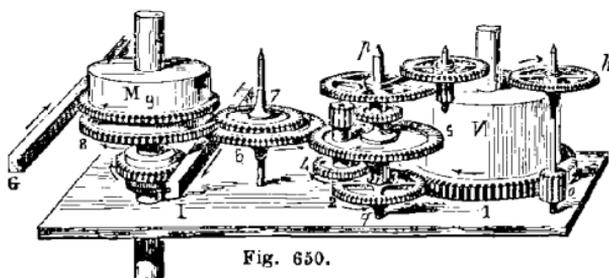


Fig. 650.

transmettre une grande vitesse à l'ailette *v*. Dans la figure 650, c'est le contraire qui a lieu : le barillet *N* porte une roue 1 qui transmet le mouvement au pignon *o* et à une roue *h*, laquelle, par une suite de pignons et de roues non figurés dans le dessin, le transmet à la roue *R* et à la palette *u* (fig. 648). Puis le même barillet, toujours par la roue 1, fait marcher la roue 2; avec celle-ci tourne le pignon 3 qui lui est lié, lequel imprime autour de l'axe *pq* un mouvement de translation à la roue 4. Or celle-ci, étant liée à la roue satellite 5, l'entraîne avec elle; en sorte que c'est la roue satellite qui fait marcher les roues 6 et 7; puis la roue 7 mène enfin le barillet *M*, qui maintenant, tournant en sens contraire, fait écarter les charbons.

La marche du courant est indiquée par les flèches (fig. 647). Entrant par la

borne *y*, il passe dans l'électro-aimant *K*, de là dans l'appareil, puis à la tige *G*, aux deux charbons, et redescend à la borne *z* par la colonne *L*, isolée de l'appareil. Un bouton placé sur la paroi de la boîte, à droite et au bas, sert à arrêter les barillets. Le bouton *X* (fig. 649) fait marcher le charbon négatif seul pour régler la hauteur du point lumineux. Pour cela, la petite roue qui fait marcher la crémaillère *I* est seulement fixée à frottement dur sur l'axe du barillet *M*, de manière que, sans faire tourner celui-ci, le bouton *X* entraîne la petite roue. Enfin, le bouton *V* (fig. 647) sert à régler le ressort à boudin *r*.

781. Propriétés et intensité de la lumière électrique. — La lumière électrique jouit des mêmes propriétés chimiques que la lumière solaire : elle détermine la combinaison d'un mélange de chlore et d'hydrogène, agit chimiquement sur le chlorure d'argent, et, appliquée à la photographie, donne de magnifiques épreuves, remarquables par la chaleur des tons; toutefois elle n'est pas applicable pour le portrait, parce qu'elle fatigue trop la vue. M. Hervé-Mangon a observé que la matière verte des végétaux se développe sous l'influence de la lumière électrique comme sous celle de la lumière solaire.

Transmise au travers d'un prisme, la lumière électrique donne un spectre, de même que la lumière solaire, ce qui montre qu'elle n'est pas simple. Wollaston et Fraunhofer ont trouvé que le spectre de la lumière électrique diffère de celui de la lumière solaire par la présence de plusieurs raies très-claires, dont une, en particulier, qui se trouve dans le vert, est d'une clarté presque brillante en comparaison du reste du spectre. Wheatstone a observé qu'en se servant pour électrodes de différents métaux, le spectre et les raies sont modifiés; résultat conforme à ce qui a été dit en parlant de l'analyse spectrale (557); enfin, Despretz a reconnu que la position des raies brillantes est fixe et indépendante de l'intensité du courant.

Avec des électrodes de charbon, les raies sont remarquables par leur nombre et leur éclat; avec le zinc, le spectre est caractérisé par une teinte vert-pomme très-développée; avec l'argent, on a un vert très-intense; avec le plomb, c'est la teinte violette qui domine; et ainsi de suite avec les différents métaux.

Quant à l'intensité de la lumière électrique, Bunsen, en expérimentant avec 48 couples, et en éloignant les charbons de 7 millimètres, a trouvé qu'elle équivalait à celle de 572 bougies. Mais cette expérience a été faite avec des couples dans lesquels le charbon était extérieur et le zinc intérieur; et ces couples avaient des effets beaucoup moindres que ceux dans lesquels le charbon est intérieur. Par conséquent, la lumière de 48 de ces derniers couples équivaut à plus de 572 bougies.

Foucault et M. Fizeau, qui ont cherché à comparer la lumière

électrique à la lumière solaire, n'ont pas comparé les quantités de lumière versées par ces deux sources, mais leurs effets chimiques sur l'iodure d'argent des plaques daguerriennes. Les résultats obtenus ne font donc pas connaître l'intensité optique de la lumière électrique, mais son intensité chimique.

En représentant par 1000 l'intensité de la lumière solaire à midi, Foucault et M. Fizeau ont trouvé que celle de la lumière de 46 couples Bunsen (à charbon intérieur) est représentée par 235, et celle de 80 couples, seulement par 238. Il résulte de ces nombres que l'intensité de la lumière ne croît pas d'une manière notable avec le nombre des couples; mais l'expérience démontre qu'elle s'accroît beaucoup avec leur surface. En effet, avec trois séries de 46 couples chacune, réunies parallèlement de manière que leurs pôles positifs concourent en un seul, ainsi que leurs pôles négatifs, ce qui revient à tripler les surfaces, l'intensité a été 385, la pile fonctionnant depuis une heure : c'est plus du tiers de l'intensité de la lumière solaire.

Despretz, dans ses expériences sur la pile, fait observer qu'on ne peut trop se préserver de ses effets lumineux, lorsqu'ils sont portés à une certaine intensité. La lumière de 100 couples peut, dit-il, donner des maux d'yeux très-douloureux. Avec 600, un seul instant suffit pour que la lumière occasionne des maux de tête et d'yeux très-violents, et la figure est brûlée comme par un fort coup de soleil. C'est pourquoi il est indispensable, pendant ces expériences, de porter des lunettes à verres d'un bleu foncé.

EFFETS MÉCANIQUES

782. Transports mécaniques par les courants. — Dans le flux électrique qui constitue les courants (748), il y a transport, dans le sens de leur direction, de matière pondérable. Par exemple, dans la formation de l'arc voltaïque (778), on a vu qu'il y a transport des molécules de charbon du pôle positif au pôle négatif : c'est là un effet mécanique.

Le transport des liquides par les courants fut observé pour la première fois par Porret. Ayant divisé un vase de verre en deux compartiments par une cloison perméable consistant en une membrane de vessie, il versa de l'eau au même niveau dans les deux compartiments, et y plongea deux électrodes de platine, en communication avec les pôles d'une pile de 80 couples. En même temps que l'eau était décomposée, une partie du liquide fut transportée, à travers la membrane, du compartiment positif au compartiment négatif, où le niveau s'éleva. Cette expérience ne réussit pas avec

de l'eau qui tient en dissolution un sel ou un acide, le liquide ne présentant pas alors assez de résistance au courant.

783. Expérience de L. Daniel sur l'action mécanique des courants. — M. L. Daniel, professeur de physique à l'école centrale, démontre l'action mécanique des courants par l'expérience suivante. Un tube de verre AB (fig. 651), de 50 centimètres de longueur

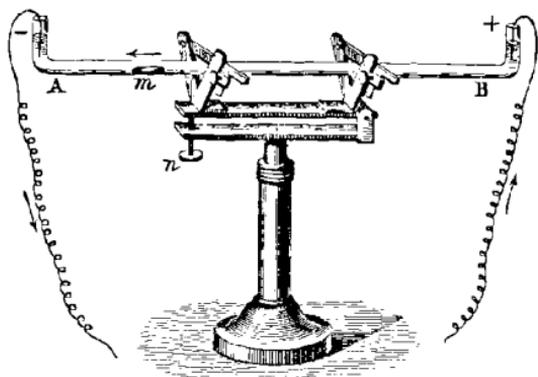


Fig. 651.

et de 1 centimètre de diamètre, étant recourbé à ses deux bouts et rempli d'eau faiblement acidulée, on y introduit un globule de mercure m , de 2 à 3 centimètres. Le tube est monté sur un support formé de deux plaques de cuivre articulées. La plaque inférieure est fixe, et l'autre s'élève ou s'abaisse d'un bout au moyen d'une vis de rappel n ; en sorte que le niveau du tube se règle par le globule même.

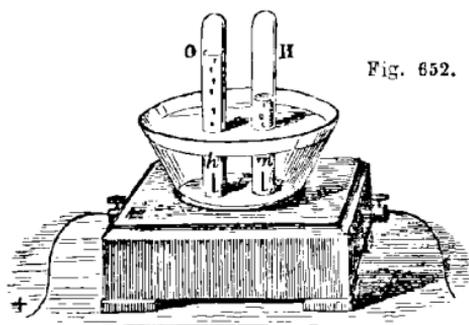
Dès qu'on plonge dans l'eau des branches verticales du tube les deux électrodes d'une pile de 4 ou 5 éléments de Bunsen, le globule de mercure s'allonge et avance du pôle positif vers le pôle négatif avec une vitesse qui croît avec le nombre des éléments. Avec 24, on fait marcher une longue colonne de mercure dans un tube d'un mètre de longueur; avec 50, la vitesse devient assez grande pour que le mercure se divise en globules, allant tous dans le même sens. Lorsqu'on intervertit le sens du courant, le mercure s'arrête, puis marche en sens contraire.

Quand on incline lentement le tube vers l'électrode positive, le mercure est encore entraîné dans le sens du courant. Si l'on continue, il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force impulsive du courant et le poids du mercure. La composante de ce poids, parallèlement au tube, peut alors, abstraction faite des résistances, représenter l'action mécanique du courant qui traverse le globule de mercure.

EFFETS CHIMIQUES ET LOIS DE L'ÉLECTROLYSATION

784. **Décomposition de l'eau, électrolyse.** — On a remarqué déjà que les effets chimiques de la pile dépendent plutôt du nombre des couples que de leur grandeur, parce que, dans les décompositions chimiques, l'action du courant s'exerçant sur des substances d'une faible conductibilité, il est nécessaire d'augmenter la tension, et, par conséquent, le nombre des couples.

La première décomposition opérée par la pile a été celle de



l'eau, en 1800, par deux Anglais, Carlisle et Nicholson, avec une pile à colonne. Il suffit de 4 ou 5 couples de Bunsen pour décomposer l'eau avec rapidité; mais celle-ci doit contenir en dissolution un sel ou un acide qui augmente sa conductibilité; sinon la décomposition est très-

lente, parce que l'eau pure étant fort peu conductrice, il ne passe qu'un courant faible. L'appareil dont on se sert pour décomposer l'eau par la pile, et recueillir l'oxygène et l'hydrogène qui se dégagent, se compose d'un vase de verre, mastiqué dans un pied de bois (fig. 652). Du fond du vase s'élèvent deux fils de platine *h* et *n*, en communication avec deux bornes de cuivre, fixées sur les côtés de l'appareil et destinées à recevoir les électrodes de la pile. Après avoir rempli le vase d'eau légèrement acidulée, on pose sur les fils de platine deux cloches pleines d'eau, puis on établit le courant. Aussitôt l'eau est décomposée en oxygène et en hydrogène qui se dégagent dans les cloches. On vérifie alors que la cloche positive se remplit d'oxygène, et la cloche négative d'hydrogène; de plus, le volume de ce dernier gaz est double du premier. Cette expérience donne donc à la fois l'analyse qualitative et l'analyse quantitative de l'eau.

Les substances qui, comme l'eau, sont décomposées par le courant, et dont les éléments sont complètement séparés, ont reçu de Faraday le nom d'*électrolytes*; et il a appelé *électrolyse*, ou *électrolyse*, le fait même de la décomposition par le courant.

La force décomposante des courants est énorme. En effet, en décomposant l'eau à l'aide d'un courant peu intense, dans des cylindres métalliques clos et à parois de 15 millimètres d'épais-

seur, M. Gassiot, à Londres, a pu faire éclater plusieurs cylindres par la tension des gaz résultant de l'électrolysation.

785. Voltamètre, unité d'intensité, équivalent électrique. — L'appareil employé ci-dessus pour la décomposition de l'eau (fig. 652) a reçu de Faraday le nom de *voltamètre*, parce que, de même que le galvanomètre (797) sert à mesurer l'intensité des courants faibles, le voltamètre peut servir à mesurer celle des courants puissants par la quantité de gaz recueillie dans les cloches dans un temps donné; car on va voir (786) que cette quantité est proportionnelle à l'intensité du courant.

Dans l'emploi du voltamètre, on a pris pour *unité d'intensité des courants* celle du courant qui dégage, en 1 minute, 1 gramme d'hydrogène; par suite, *l'intensité d'un courant se mesure par le poids d'hydrogène qu'il fait dégager dans le voltamètre en 1 minute.*

Enfin, on nomme *équivalent électrique* la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer 1 équivalent d'eau; c'est-à-dire le poids d'eau représenté en chimie par HO.

Dans les applications du voltamètre, il importe d'observer que la quantité de gaz qui se produit, dans un même voltamètre, par la décomposition de l'eau, ne dépend pas seulement de l'intensité du courant, mais encore du degré d'acidité de l'eau, de la nature, de la grandeur et de la distance des fils ou des lames qui plongent dans le liquide pour lui transmettre le courant. On doit donc avoir soin d'employer toujours le même appareil, ou des appareils identiques, sinon les résultats ne sont pas comparables.

786. Lois de l'action électrolysante des courants. — 1° Si l'on dispose à la suite les uns des autres une série de voltamètres, et qu'on les fasse traverser par un même courant, on observe que le poids d'hydrogène recueilli dans chacun est le même, et cela quelles que soient, dans les différents voltamètres, la matière et la distance des électrodes, la proportion et la nature de l'acide. Ce qui fait voir que *l'intensité du courant est la même dans tout le circuit extérieur de la pile d'un pôle à l'autre.*

2° En disposant, au-dessus des couples mêmes de la pile, des cloches de manière à recueillir l'hydrogène dégagé, Daniell a reconnu que la quantité de gaz recueillie est la même que dans les voltamètres extérieurs. D'où l'on conclut que *l'intensité du courant, à l'intérieur de la pile, est la même qu'à l'extérieur.*

3° Enfin, au lieu de faire passer le courant dans deux voltamètres consécutifs, si on le fait passer dans deux voltamètres parallèles, c'est-à-dire si l'électrode partant du pôle positif se bifurque en deux fils se rendant séparément à deux voltamètres identiques et se réunissant ensuite en un fil unique qui aboutit au pôle négatif,

on recueille dans chaque voltamètre des quantités d'hydrogène égales entre elles ; de plus, chacune est exactement la moitié, en temps égaux, du gaz obtenu quand le courant passe tout entier dans un seul des deux voltamètres. Donc *le poids de l'eau décomposée, dans un temps donné, est proportionnel à la quantité d'électricité qui passe dans le voltamètre.*

Toutes ces lois se vérifient avec d'autres électrolytes que l'eau, tels que des sels en dissolution ou en fusion. A l'aide d'instruments plus sensibles que le voltamètre (813), on constate qu'elles s'appliquent non-seulement aux effets chimiques des courants, mais à tous leurs autres effets. En outre, on verra bientôt (816) l'influence, sur l'intensité des courants, des résistances qu'ils rencontrent dans le circuit intermédiaire et dans la pile elle-même.

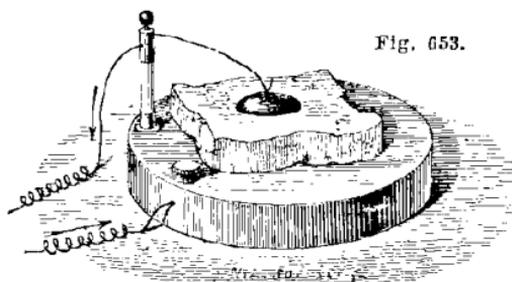
787. Loi de Faraday sur les décompositions électro-chimiques. — En disposant à la suite les unes des autres des dissolutions salines différentes, et en les réunissant par des fils de platine, Faraday a constaté que lorsqu'un courant passe dans tout le système, le poids du métal qui se dépose sur les fils négatifs, dans chaque dissolution, est proportionnel à l'équivalent du métal dissous ; d'où cette loi connue sous le nom de *loi de Faraday* : *Lorsqu'un même courant agit simultanément sur une suite de dissolutions, les poids des éléments séparés dans chacune d'elles sont dans le même rapport que leurs équivalents chimiques.*

Ou bien, au lieu de faire passer le courant simultanément dans une série de dissolutions différentes, on le fait passer dans une dissolution unique d'acide chlorhydrique, ou d'un sel métallique, réunie par un fil de platine à un voltamètre à eau ordinaire. Or, lorsqu'un équivalent d'eau a été décomposé dans celui-ci, on trouve qu'un équivalent d'hydrogène ou de métal s'est porté sur le fil négatif dans la dissolution. C'est le même résultat que ci-dessus ; mais comme on a pris, pour équivalent électrique, la quantité d'électricité qui décompose un équivalent d'eau (785), on voit qu'on peut donner de la loi de Faraday cet autre énoncé : *Quel que soit l'électrolyte qu'il traverse, toujours l'équivalent électrique en décompose un équivalent.*

L'intensité du courant étant la même dans toutes les parties du circuit, à l'extérieur et à l'intérieur de la pile, ce n'est pas seulement dans la dissolution interposée dans le circuit extérieur que la loi de Faraday est applicable, mais dans chacun des couples de la pile ; c'est-à-dire que *lorsqu'un équivalent d'électricité a été produit, un équivalent de zinc a été dissous dans chacun des couples de la pile*, loi qui a été vérifiée par Daniell.

788. Électrolytation des oxydes, des acides et des composés bi-

naires en général. — Les courants exercent sur les oxydes métalliques la même action que sur l'eau. Ils les réduisent tous, l'oxygène se rendant au pôle positif et le métal au pôle négatif. C'est Davy qui, le premier, en 1807, décomposa la potasse en en soumettant un morceau humide à un courant de 250 couples. Au pôle positif se rendit l'oxygène, et au pôle négatif un métal nouveau,



qui était le potassium. Il obtint de la même manière le sodium ; mais ces métaux, à cause de leur grande affinité pour l'oxygène, brûlant à l'air à mesure qu'ils deviennent libres, il est préférable d'opérer comme Seebeck l'a fait depuis. Dans un fragment de potasse on pratique une cavité qu'on remplit de mercure ; puis, à l'aide d'une plaque métallique sur laquelle on la pose, on fait communiquer la potasse avec le pôle positif d'une forte pile (fig. 653), et le mercure avec le pôle négatif. Le potassium, se portant alors sur le mercure, s'amalgame avec lui sans brûler. En distillant ensuite cet amalgame dans l'huile de naphte, on a pour résidu le potassium. On opère de la même manière avec la soude.

Les oxacides sont décomposés de même que les oxydes, et toujours l'oxygène se porte au pôle positif et le radical au pôle négatif. Les hydracides le sont aussi ; mais leur radical se porte au pôle positif et l'hydrogène au pôle négatif.

En général, les composés binaires métalliques, tels que les chlorures, les iodures, les bromures, se comportent de la même manière sous l'action des courants : le métal se rend au pôle négatif, et le chlore, l'iode, le brome, au pôle positif. Ces composés étant pour la plupart peu conducteurs de l'électricité à l'état solide, c'est à l'état de dissolution, ou à l'état de fusion, qu'il faut les soumettre à l'électrolyse.

Quant aux composés binaires non métalliques, comme le sulfure de carbone, le chlorure de soufre, n'étant pas assez conducteurs pour transmettre le courant, ils ne peuvent être électrolysés qu'à l'état de mélange.

Enfin, dans toute électrolyse, il n'apparaît aucune trace de décomposition d'un pôle à l'autre; ce n'est qu'au contact même des électrodes que la séparation des éléments du corps électrolysé se manifeste. On verra ci-après (791) comment on explique ce phénomène dans la théorie de Grothuss.

789. Décomposition des sels ternaires. — Les sels ternaires en dissolution sont tous décomposés par la pile, avec des effets qui varient suivant les affinités chimiques, mais qui, en réalité, sont toujours soumis à la même loi de décomposition.

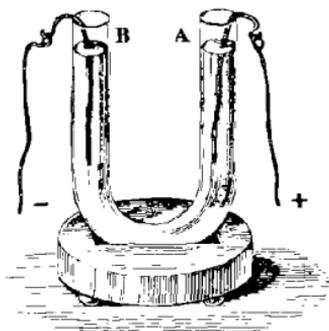


Fig. 654.

Avec les métaux des quatre dernières sections, l'acide du sel et l'oxygène de l'oxyde se rendent au pôle positif, et le métal seul au pôle négatif.

Avec les métaux des deux premières sections, c'est-à-dire avec les métaux alcalins et les métaux terreux, qui ont une grande affinité pour l'oxygène et décomposent l'eau à la température ordinaire, la décomposition des sels paraît

suivre une autre loi. En effet, l'acide du sel se portant encore au pôle positif, c'est l'oxyde du sel, et non le métal seul, qu'on recueille au pôle négatif; mais il y a en même temps dégagement d'oxygène au pôle positif, et d'hydrogène au pôle négatif.

Daniell, qui, le premier, remarqua ce dégagement de gaz, en a conclu que, dans les sels des deux premières sections, de même que dans ceux des dernières, l'oxyde étant encore décomposé, son oxygène se porte avec l'acide au pôle positif, et le métal seul au pôle négatif; mais que là, en vertu de sa grande affinité pour l'oxygène, le métal décompose l'eau en s'emparant de son oxygène, et reproduit ainsi l'oxyde qui se dépose, tandis que l'hydrogène se dégage.

On peut donc poser cette loi générale sur la décomposition des sels ternaires par la pile : *Toujours le métal du sel se rend au pôle négatif, tandis que l'acide et l'oxygène de l'oxyde se rendent au pôle positif.* Par exemple, avec le sulfate de cuivre, on a $\text{SO}^3, \text{CuO} + \text{HO} = \text{SO}^4 + \text{Cu} + \text{HO}$; et avec le sulfate de potasse, $\text{SO}^3, \text{KO} + \text{HO} = \text{SO}^4 + \text{K} + \text{HO}$; mais, par suite de la décomposition de l'eau par le potassium, le second membre de cette dernière égalité se change en $\text{SO}^4 + \text{KO} + \text{H}$.

On démontre la décomposition des sels par la pile avec un tube

de verre recourbé (fig. 654), dans lequel on verse une dissolution de sulfate de potasse ou de soude, colorée en bleu avec du sirop de violette. Ayant plongé dans les branches du tube deux lames de platine, on met celles-ci en communication avec les électrodes de la pile. Au bout de quelques minutes, si l'on fait usage de trois ou quatre couples de Bunsen, la branche positive A se colore en rouge, et la négative B en vert; ce qui montre que l'acide du sel s'est porté au pôle positif, et le métal alcalin oxydé au pôle négatif; car on sait que le sirop de violette a la propriété de rougir par l'action des acides, et de verdir par celle des bases.

La décomposition des sels par la pile a reçu d'importantes applications dans la galvanoplastie, la dorure et l'argenture (793).

790. Effets secondaires dans l'électrolyse. — Dans plusieurs cas, il se produit dans les dissolutions salines, pendant l'électrolyse, des réactions qu'on désigne sous le nom d'*effets secondaires*, et dont on peut citer les exemples suivants :

1^o Dans les sels à base de potasse ou de soude, on vient de voir que le métal qui se rend au pôle négatif, décomposant l'eau et s'emparant de son oxygène, apparaît à l'état d'oxyde au pôle négatif; c'est là un effet secondaire, puisqu'il ne se produit qu'après la décomposition du sel.

2^o Avec les sels dont l'oxyde peut prendre un plus haut degré d'oxydation, comme les sels de protoxyde de fer, l'oxygène mis en liberté au pôle positif suroxyde la base du sel, et celui-ci passe ensuite à l'état de sel de peroxyde.

3^o Enfin, la nature des électrodes donne lieu à des effets secondaires importants : par exemple, avec les sels de cuivre, si l'électrode positive est elle-même de cuivre, l'oxygène qui s'y dégage à l'état naissant l'attaque en formant de l'oxyde de cuivre; puis ce dernier, se combinant avec l'acide sulfurique qui se rend au même pôle, reproduit une quantité de sulfate précisément égale à celle qui a été décomposée. Le premier effet est la décomposition du sulfate de cuivre, et le second est la reproduction d'une quantité égale du même sel. On verra ci-après l'application de ce dernier effet dans la galvanoplastie, la dorure et l'argenture.

791. Théorie de Grotthuss sur les décompositions électro-chimiques. — Grotthuss a donné, des décompositions électro-chimiques par la pile, la théorie suivante. Adoptant d'abord l'hypothèse que, dans tout composé binaire, ou se comportant comme tel, un des éléments est électro-positif, et l'autre électro-négatif (756), ce savant admet que, sous l'influence des *électricités contraires* des électrodes de la pile, il se produit dans le liquide où elles plongent une suite de décompositions et de recompositions succes-

sives d'un pôle à l'autre, en sorte qu'il n'y a que les éléments des molécules extrêmes qui, ne se recomposant pas, restent libres et se portent aux pôles. L'eau, par exemple, étant formée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène, et le premier gaz étant électro-négatif, le second électro-positif, lorsque le liquide est traversé par un courant suffisamment énergétique, la molécule *a*,



Fig. 655.

en contact avec le pôle positif, se polarise, c'est-à-dire que l'oxygène, qui est électro-négatif, se trouve attiré, et l'hydrogène, qui est électro-positif, est repoussé (fig. 655). L'oxygène de cette molécule se rendant alors sur l'électrode positive, l'hydrogène, mis en liberté, s'unit immédiatement à l'oxygène de la molécule *b*, puis l'hydrogène de celle-ci à l'oxygène de la molécule *c*, et ainsi de suite, jusqu'au pôle négatif, où les derniers atomes d'hydrogène restent libres et se dégagent. La même théorie s'applique aux oxydes métalliques, aux acides et aux sels; en un mot, à toutes les décompositions électrolytiques.

792. Transports électro-chimiques par les courants. — Dans les décompositions électro-chimiques, il n'y a pas seulement séparation des éléments, mais transport des uns au pôle positif, et des autres au pôle négatif. Ce phénomène a été démontré par Davy à l'aide de nombreuses expériences; nous citerons les deux suivantes :

1^o Ayant versé une dissolution de sulfate de soude dans deux capsules réunies par une mèche d'amiante humectée de la même dissolution, on plonge l'électrode positive dans une des capsules et l'électrode négative dans l'autre. Le sel est alors décomposé, et, au bout de quelques heures, tout l'acide sulfurique se trouve dans la première capsule, et la soude dans la seconde.

2^o Trois verres A, B, C (fig. 656), contenant, le premier une dissolution de sulfate de soude, le second du sirop de violette étendu, et le troisième de l'eau pure, on les fait communiquer entre eux par des mèches d'amiante humectées, puis on fait passer le courant de C vers A, par exemple. Le sulfate du verre A est alors décomposé, et bientôt la soude reste dans ce

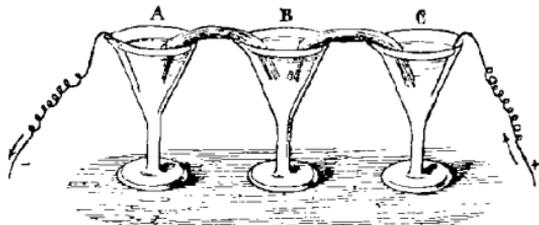


Fig. 656.

verre, qui est négatif, tandis que tout l'acide est transporté dans le verre C, qui est positif. Si, au contraire, le courant va de A vers C, c'est la soude qui se rend en C, tandis que tout l'acide reste dans le verre A; mais, dans les deux cas, on observe que la teinture de violette du verre B n'est ni rougie ni verdie par le passage de l'acide ou de la base dans sa masse, phénomène qui s'explique, d'après la théorie de Grotthuss, par les décompositions et les recompositions qui s'opèrent successivement de molécule à molécule, en sorte que le vase B est toujours à l'état neutre.

GALVANOPLASTIE, DORURE ET ARGENTURE

793. **Galvanoplastie.** — La décomposition des sels par la pile a reçu une importante application dans la *galvanoplastie*. On nomme ainsi l'art de modeler les métaux en les précipitant de leurs dissolutions salines par l'action lente d'un courant électrique. On a d'abord admis que la galvanoplastie avait été découverte simultanément, en 1838, par Jacobi, en Russie, et par Spencer, en Angleterre; mais c'est à Jacobi qu'appartient la priorité.

Lorsqu'on veut reproduire une médaille ou tout autre objet par la galvanoplastie, on commence par s'en procurer une empreinte en creux, sur laquelle puisse se déposer la couche métallique qui doit reproduire en relief la médaille. On a d'abord obtenu ces empreintes à l'aide du soufre, de la stéarine, de l'alliage fusible de Darcet; mais la substance généralement employée aujourd'hui est la gutta-percha, dont l'emploi est facile et qui donne des empreintes d'une grande netteté. On recouvre de plombagine l'objet dont on veut prendre l'empreinte, afin qu'il n'adhère pas à la gutta-percha, ce qui se fait en le frictionnant avec une brosse douce qu'on a passée dans de la plombagine pulvérisée. Puis, ayant chauffé la gutta dans l'eau chaude jusqu'à ramollissement, on applique dessus la pièce à reproduire, en ayant soin de la soumettre à une pression un peu forte. Laisant refroidir, on détache la gutta, qui est peu adhérente, et l'on a alors sur cette substance une empreinte en creux, très-fidèle, de l'objet. Il reste à enduire cette empreinte de plombagine pour la rendre conductrice.

Pour reproduire ensuite la pièce dont on a obtenu l'empreinte, on prend une cuve remplie d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, et ayant posé dessus deux baguettes de laiton B et D (fig. 637), communiquant, l'une au pôle négatif et l'autre au pôle positif de la pile, on suspend à la première le moule *m*, qu'on a préparé, et à l'autre une plaque de cuivre rouge C. Le courant se trouvant ainsi fermé, le sulfate de cuivre est décomposé; son acide

et l'oxygène de l'oxyde se rendent au pôle positif, tandis que le cuivre seul se rend au pôle négatif, et se dépose lentement sur le moule suspendu à la baguette B; on peut même ainsi suspendre plusieurs moules à la fois. Au bout de 48 heures, le moule est recouvert d'une couche de cuivre solide et résistante, mais non

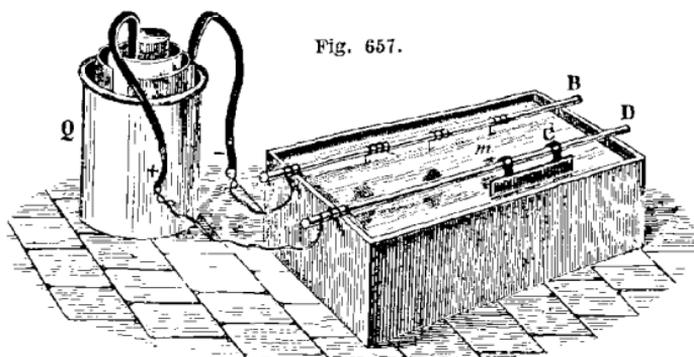


Fig. 657.

adhérente. C'est cette couche de cuivre qui, retirée du moule, reproduit l'objet avec une exactitude absolue. Dans le présent ouvrage tous les dessins sont gravés sur bois, puis le tirage est fait avec des clichés de cuivre obtenus par le procédé ci-dessus.

La plaque de cuivre C, placée au pôle positif, n'a pas seulement pour but de fermer le courant, elle sert aussi à entretenir la dissolution dans un état de concentration constant; en effet, l'acide et l'oxygène qui se rendent au pôle positif se combinent avec le cuivre de la plaque, et reproduisent constamment une quantité de sulfate égale à celle qui a été décomposée par le courant (790,3°).

Pour la galvanoplastie, on préfère la pile de Daniell (762), à cause de la constance de son effet.

794. **Dorure galvanique.** — Avant de connaître la décomposition des sels par la pile, on dorait au mercure. Pour cela, on appliquait un amalgame d'or sur les pièces à dorer; puis les chauffant dans un four, le mercure se volatilisait, et l'or seul restait sous la forme d'une couche très-mince sur les objets dorés. Le même procédé était appliqué à l'argenture; mais à ce procédé, coûteux et insalubre, on substitue aujourd'hui la dorure et l'argenture galvaniques. La dorure par la pile ne diffère de la galvanoplastie qu'en ce que la couche métallique qu'on fait déposer sur les objets à dorer est beaucoup plus mince et adhérente. Brugnatelli, élève de Volta, est le premier, en 1803, qui ait observé qu'on pouvait dorer avec une pile et une dissolution alcaline d'or; mais c'est de la Rive qui, le premier, appliqua réellement

la pile à la dorure. Les procédés de dorure et d'argenture furent ensuite perfectionnés par Elkington, Ruolz et autres physiciens.

Les pièces à dorer doivent subir trois préparations, qui sont le *recuit*, le *dérochage* et le *décapage*.

Le recuit consiste à chauffer les pièces pour détruire les matières grasses dont elles ont pu être imprégnées dans les travaux auxquels elles ont été soumises antérieurement.

Les pièces à dorer étant ordinairement de cuivre, leur surface, pendant le recuit, s'est recouverte d'une couche de protoxyde et de bioxyde de cuivre que le dérochage a pour but d'enlever. Pour cela, on plonge les pièces encore chaudes dans un bain d'acide sulfurique très-étendu d'eau, où on les laisse assez longtemps pour que l'oxyde se détache. On les frotte alors avec une brosse dure, et on les lave à l'eau distillée.

Les pièces étant encore irisées, il reste le décapage, qui consiste à les plonger rapidement dans un bain d'acide azotique ordinaire, puis dans un mélange du même acide, de sel marin et de suie, et enfin à les laver dans l'eau pure.

Les pièces une fois préparées, on les suspend à l'électrode négative d'une pile de 3 ou 4 couples de Daniell ou de Bunsen, et on les plonge dans un bain d'or, en les disposant comme pour la galvanoplastie (fig. 657). Elles restent dans le bain plus ou moins longtemps, suivant l'épaisseur qu'on veut donner au dépôt.

On a beaucoup varié la composition des bains. Le plus simple se compose de 1 gramme de chlorure d'or et de 10 grammes de cyanure de potassium dissous dans 150 grammes d'eau. Pour entretenir le bain à un degré de concentration constant, on suspend à l'électrode positive une lame d'or qui se dissout à mesure que le bain laisse déposer son or sur les pièces placées au pôle négatif.

Le procédé qui vient d'être décrit s'applique très-bien pour dorer le cuivre, l'argent, le bronze, le laiton, le maillechort. Quant aux autres métaux, comme le fer, l'acier, le zinc, l'étain, le plomb, ils se dorant mal. Pour obtenir une bonne dorure, on est obligé de les recouvrir d'abord d'une couche de cuivre, au moyen de la pile et d'un bain de sulfate de cuivre; c'est ensuite le cuivre qui les recouvre qu'on dore comme il a été dit ci-dessus.

795. Argenture. — Tout ce qu'on vient de dire sur la dorure galvanique s'applique exactement à l'argenture; il n'y a de différence que dans la composition du bain, qui est formé de 1 gramme de cyanure d'argent et de 10 grammes de cyanure de potassium dissous dans 150 grammes d'eau. A l'électrode positive est suspendue une plaque d'argent qui empêche le bain de s'appauvrir, et à l'électrode négative sont les pièces à argenter, bien décapées.

Après les différents effets des courants, qui viennent d'être décrits, il reste à faire connaître leur action sur les aimants.

CHAPITRE IV

EFFETS MAGNÉTIQUES DES COURANTS ; GALVANOMÈTRE

796. **Expérience d'Ørsted, loi d'Ampère.** — A l'occasion du thermo-multiplicateur de Melloni, on a déjà vu l'action directrice que les courants fixes exercent sur les aimants mobiles (298). Découvert, en 1819, par Ørsted, professeur de physique à Copenhague, ce phénomène devint bientôt, entre les mains d'Ampère et de Faraday, la source d'une branche nouvelle de la physique, décrite plus loin sous le nom d'*électro-magnétisme*.

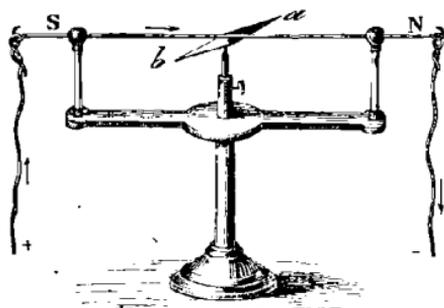


Fig. 658.

Pour répéter l'expérience d'Ørsted, on tend horizontalement, dans la direction du méridien magnétique, un fil de cuivre, au-dessus d'une aiguille aimantée mobile (fig. 658). Tant que le fil n'est point traversé par un courant, l'aiguille lui demeure parallèle; mais aussitôt que les extrémités du fil sont

en communication avec les électrodes d'une pile, l'aiguille s'écarte et approche d'autant plus de prendre une direction perpendiculaire au courant, que celui-ci est plus intense.

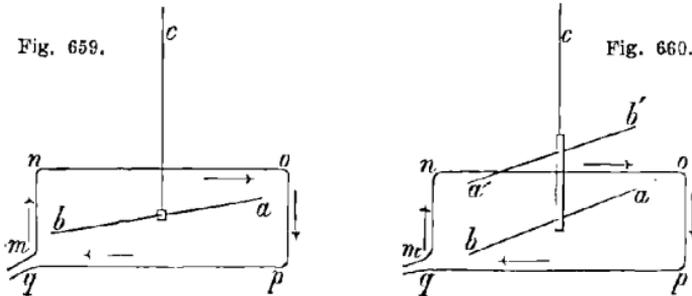
Quant au sens de la déviation, on a vu (298) qu'il dépend de la direction du courant du nord au sud, ou du sud au nord, au-dessus ou au-dessous de l'aiguille. Ampère a compris ces différents cas en un seul énoncé en concevant un observateur placé dans le fil qui réunit les deux pôles, de manière que, le courant entrant par les pieds et sortant par la tête, la face soit tournée vers l'aiguille. Le courant ainsi personnifié, Ampère a donné cette loi, qui, dans tous les cas, se vérifie par l'expérience : *L'action directrice des courants sur les aimants mobiles consiste toujours à faire dévier le pôle austral vers la gauche du courant.*

On verra (837 et 848) que l'action directrice des courants sur les aimants est due à une action réciproque entre ces courants et les courants d'Ampère qui circulent autour des aimants.

797. **Galvanomètre, sa théorie.** — Le *galvanomètre*, connu aussi sous les noms de *multiplicateur* et de *rhéomètre*, est dû à Schweigger, peu après la découverte d'Ørsted. Cet instrument, dont on a déjà donné une notion succincte à l'occasion du thermomultiplicateur (299), est une application de l'action directrice des courants sur les aimants : par la déviation qu'il imprime à l'aiguille, il décèle la présence des courants; par le sens de la déviation, il fait connaître leur direction; et par l'angle d'écart, il sert à mesurer leur intensité.

L'action directrice de la terre tendant constamment à maintenir l'aiguille aimantée dans le méridien magnétique (663), les courants rencontrent là, pour faire dévier l'aiguille, une résistance qui, lorsqu'ils sont très-faibles, peut rendre la déviation insensible. Il importe donc de multiplier l'action des courants et de diminuer la résistance de la terre. Ce double résultat s'obtient par les deux procédés suivants.

Le premier, dû à Schweigger, consiste à replier le fil que par-



court le courant, au-dessus et au-dessous de l'aiguille dans le sens de sa longueur, de manière à former un circuit rectangulaire vertical dans lequel elle est suspendue à un fil de cocon (fig. 659). Si on applique ici la loi d'Ampère (796), on reconnaît facilement que lorsqu'un courant parcourt le circuit $mno pq$, les quatre parties mn , no , op et pq agissent dans le même sens pour faire dévier le pôle a en arrière du plan du dessin, et le pôle b en avant. En enroulant le fil dans le sens de l'aiguille, on a donc *multiplié* l'action du courant. Si, au lieu d'un seul circuit, on en fait plusieurs, l'action se multiplie encore et la déviation augmente. Toutefois on ne multiplierait pas indéfiniment l'action du courant en continuant les circonvolutions; car on verra bientôt que l'intensité d'un courant s'affaiblit lorsque la longueur du circuit qu'il parcourt augmente. Le fil de cuivre ainsi enroulé doit être recouvert de soie avec soin; sinon, l'électricité passant

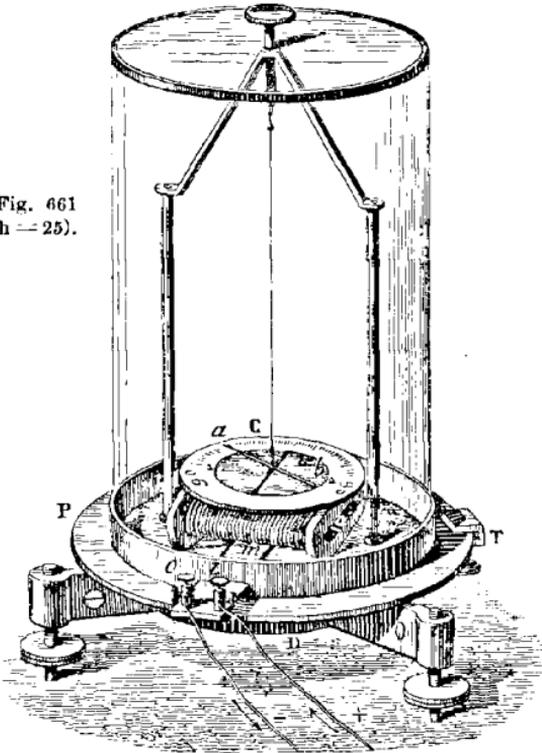
d'un circuit au suivant, le tout se comporterait comme un circuit unique. M. Tyndall a observé que la soie blanche est préférable à la soie verte qu'on emploie ordinairement, la matière colorante de celle-ci contenant souvent du fer en quantité suffisante pour imprimer à l'aiguille une déviation de plusieurs degrés.

Le deuxième procédé, dû à Nobili, consiste à faire agir le circuit, non sur une seule aiguille, mais sur un système astatique (671) de deux aiguilles superposées parallèlement, les pôles contraires en regard (fig. 660), l'une intérieure, l'autre extérieure au circuit, et liées ensemble de manière à ne pouvoir tourner l'une sans l'autre. L'aiguille intérieure ab est alors influencée comme ci-dessus par le circuit $mno pq$; mais les différentes parties de celui-ci n'agissent pas également sur l'aiguille $a'b'$. En effet, d'après la loi d'Ampère, la partie no tend à amener le pôle a' en avant, tandis que les trois portions mn , op et pq tendent à faire dévier le même pôle en arrière. A cause de la moindre distance, c'est no qui prédomine, et par suite l'action finale du circuit complet est d'imprimer à $a'b'$ une déviation dans le même sens qu'à ab , ce qui augmente l'action du courant; mais l'effet du système astatique est surtout de réduire l'action directrice de la terre. En effet, si les deux aiguilles étaient rigoureusement de même force, de même longueur, et leurs axes magnétiques dans le même plan, les actions contraires sur les pôles a et b' , ainsi que sur les pôles b et a' , se neutraliseraient complètement, et l'action de la terre étant nulle, le système, rigoureusement astatique, ne rencontrerait d'autre résistance que la torsion du fil de suspension. Dans la pratique, la force de l'une des aiguilles l'emportant toujours sur celle de l'autre, la terre les dirige en vertu de leur différence d'intensité; et, cette différence pouvant être rendue aussi petite qu'on le veut, on peut arriver à une déviation appréciable, même pour des courants extrêmement faibles.

798. **Construction du galvanomètre.** — La figure 661 représente un galvanomètre extrêmement sensible construit par Ruhmkorff. Le pied de l'instrument se compose d'un disque épais D , de laiton, porté par trois vis calantes; au-dessus est un plateau tournant P , de même métal, sur lequel est fixé un cadre de cuivre rouge, d'une largeur presque égale à la longueur des aiguilles. Sur ce cadre s'enroule un grand nombre de fois un fil de cuivre rouge m , recouvert de soie. Ses deux bouts arrivent à des bornes i et o , destinées à recevoir les fils qui unissent l'instrument avec le courant qu'on veut observer. Au-dessus du cadre est un cercle gradué C , aussi de cuivre rouge, et fendu suivant un diamètre parallèle à la direction du fil enroulé en dessous. Le zéro de la gra-

duction correspond à la fente pratiquée dans le cercle, et des deux côtés la graduation est tracée jusqu'à 90 degrés. Enfin, sur les côtés du cadre s'élèvent deux colonnes qui portent une vis de rappel à laquelle est suspendu par un fil de cocon un système

Fig. 661
(h = 25).



astatique de deux aiguilles ab et $a'b'$. L'aiguille ab qui est au-dessus du cercle sert à marquer les déviations; l'aiguille $a'b'$ est dans l'intérieur du circuit. C'est pour introduire cette aiguille qu'une fente est pratiquée dans le cercle C ; une ouverture semblable, non visible dans le dessin, existe entre les fils du circuit, au-dessous du cercle gradué. Au moyen des vis calantes, on établit l'horizontalité de manière que le fil de cocon passe exactement par le centre sans frotter contre les bords de la fente; et à l'aide de la vis de rappel on soulève ou on abaisse le système astatique jusqu'à ce qu'il tourne librement dans le circuit. A cet effet, la vis de rappel s'engage dans un écrou pratiqué dans la pièce à laquelle est attaché le fil de cocon, et quand la vis tourne, elle fait monter ou descendre cette pièce sans la faire

tourner et sans tordre le fil. Afin de préserver l'instrument des agitations de l'air, on le recouvre d'une cage de verre.

Pour se servir de l'instrument, on commence par l'orienter, c'est-à-dire par diriger dans le méridien magnétique le diamètre qui passe par le zéro de la graduation. Pour cela, prenant à la main les bornes *i*, *o*, on fait tourner le plateau P sur son support D, jusqu'à ce que l'extrémité de l'aiguille *ab* corresponde au zéro. Pour fixer alors l'instrument, on serre, à l'aide d'une vis de pression, une pince T fixée au pied D.

A l'instant où le courant commence à passer, les aiguilles, brusquement écartées de leur position d'équilibre, tendent à faire plusieurs tours sur elles-mêmes. On évite cette rotation en fixant, en regard des divisions 90, deux petites bornes contre lesquelles bute l'aiguille supérieure. Les aiguilles tendant encore à osciller assez longtemps, c'est pour diminuer la durée de ces oscillations que le cadran et le cadre sont de cuivre rouge. En effet, on verra plus tard que les oscillations de l'aiguille aimantée font naître dans ce métal des courants d'induction qui, réagissant sur elle, l'arrêtent très-rapidement.

Le galvanomètre représenté dans la figure 661 se désigne sous le nom de *galvanomètre de Nobili*, à cause du système astatique qu'y a ajouté ce physicien.

799. Graduation du galvanomètre. — Le galvanomètre, tel qu'il vient d'être décrit, est un instrument extrêmement sensible pour constater la présence des courants; mais il ne fait pas connaître leur intensité. Pour le faire servir à cet usage, il faut construire des tables au moyen desquelles on puisse déduire, de la déviation de l'aiguille, l'intensité relative du courant.

La méthode la plus simple pour former ces tables est celle du *multiplicateur à deux fils*, due à M. Becquerel. On enroule simultanément, sur le cadre de l'appareil, deux fils de cuivre recouverts de soie, identiques en longueur et en diamètre; et choisissant une source d'électricité dynamique constante, mais très-faible, on fait passer le courant dans un des fils, ce qui donne une certaine déviation, soit de 5 degrés. Puis, à l'aide d'une source électrique identique avec la première, on fait passer en même temps, dans le second fil, un courant de même intensité que le premier. On obtient alors une déviation de 10 degrés, due à l'action simultanée des deux courants, ou, ce qui est la même chose, à un courant double du premier en intensité. Si l'on fait ensuite passer dans un des fils un courant capable de donner seul la déviation 10, et dans l'autre un des courants qui ont produit la déviation 5, ce qui revient à un courant triple du premier, on obtient la dé-

viation 15. Enfin, faisant passer dans chacun des fils, à la fois, un courant capable de donner la déviation 10, on en observe une de 20. C'est-à-dire que *jusqu'à 20 degrés les déviations sont proportionnelles à l'intensité du courant*. Au delà, elles croissent moins vite; mais, par le même procédé, on continue à déterminer de distance en distance les déviations correspondantes à des intensités connues, puis on achève la table par la méthode des interpolations. Chaque galvanomètre exige une table particulière; car la relation entre l'intensité du courant et la déviation des aiguilles varie avec leur degré d'aimantation, leur longueur, leur distance du courant, et avec le nombre des tours du circuit.

Le multiplicateur à deux fils sert encore à mesurer la différence d'intensité de deux courants; ce qui s'obtient en faisant passer simultanément, en sens contraires, un courant dans chaque fil. L'appareil prend alors le nom de *galvanomètre différentiel*.

On gradue aussi facilement le galvanomètre, à l'aide des courants thermo-électriques. En effet, on verra bientôt (808) que l'intensité de ces courants est proportionnelle, jusqu'à la limite de 45 degrés environ, à la différence de température des soudures. Par conséquent, en faisant passer, dans le galvanomètre à un seul fil, le courant d'un couple thermo-électrique, il suffit, une des soudures étant à zéro, de porter successivement l'autre à 5, 10, 15, ... 45 degrés, de noter au fur et à mesure la déviation de l'aiguille, et enfin d'achever, par interpolation, la graduation de 5 en 5.

800. Usages du galvanomètre. — Par son extrême sensibilité, cet appareil est un des instruments les plus précieux de la physique. C'est avec lui que M. Becquerel a constaté qu'il y a dégagement d'électricité dans toutes les combinaisons chimiques, et a déterminé les lois de ces combinaisons (755).

Par exemple, si l'on fixe aux extrémités du circuit du galvanomètre deux fils de platine, et si l'on plonge ceux-ci dans une capsule remplie d'acide azotique, on ne remarque aucune déviation de l'aiguille, ce qu'il était facile de prévoir, puisque le platine n'est pas attaqué par l'acide azotique. Mais si l'on verse une goutte d'acide chlorhydrique près d'un des fils immergés, aussitôt l'aiguille dévie, ce qui indique que le circuit est traversé par un courant. En effet, on sait que, par leur réaction mutuelle, les acides azotique et chlorhydrique donnent naissance à de l'acide chlorazotique, ou *eau régale*, qui attaque le platine. On reconnaît de plus, par le sens de la déviation, que le platine est électrisé négativement et l'acide positivement.

801. Conditions auxquelles doit satisfaire le galvanomètre. — En s'appuyant sur les formules données plus loin sur l'intensité des

courants (823), on reconnaît que les indications du galvanomètre sont soumises aux conditions suivantes :

1^o Si la résistance extérieure est assez petite, par rapport à celle du circuit galvanométrique, pour qu'on puisse la négliger, *la sensibilité de l'instrument est proportionnelle à la section du fil du galvanomètre, et indépendante du nombre des tours de ce fil*. On doit donc faire usage, dans ce cas, d'un fil gros et court; c'est ce qui a lieu dans l'appareil de Melloni (297), et avec les courants thermo-électriques en général; la résistance des piles thermo-électriques étant toujours très-faible, le nombre des tours du fil varie alors de 30 à 300.

2^o Au contraire, si c'est la résistance du circuit extérieur qui est très-grande, en sorte qu'on puisse négliger la résistance du fil du galvanomètre, *la sensibilité est proportionnelle au nombre des tours*. Il importe donc ici de faire usage d'un galvanomètre à fil long, mais fin, pour qu'il puisse faire un grand nombre de tours sans trop s'écarter des aiguilles. Par exemple, lorsque le galvanomètre est destiné à mesurer des courants dus aux actions chimiques, la résistance du circuit extérieur étant alors très-grande, le fil qui s'enroule sur le cadre doit être d'un petit diamètre, et faire de 600 à 800 tours au moins. Le nombre des tours s'élève même souvent à 2 000 ou 3 000, et pour des expériences très-déliées de physiologie il a été porté jusqu'à 30 000.

802. **Boussole galvanométrique.** — Pour les courants intenses, on fait usage de galvanomètres à une seule aiguille, et l'on ne fait faire au fil qu'un très-petit nombre de tours, même un seul. Le galvanomètre le plus simple est alors une boussole au-dessus de laquelle est tendu un fil de cuivre dirigé dans le sens du méridien magnétique, et dans lequel passe le courant dont on cherche l'intensité. L'instrument prend dans ce cas le nom de *boussole galvanométrique*.

CHAPITRE V

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES

803. **Expérience de Seebeck.** — On a déjà vu (297) que la chaleur peut donner naissance à des courants qu'on désigne sous le nom de *courants thermo-électriques*, pour les distinguer des courants dus aux actions chimiques, qui sont dits courants *hydro-électriques*. Les courants thermo-électriques, toujours très-faibles, sont remarquables par la liaison qu'ils établissent entre

la chaleur et l'électricité, et par l'application qu'ils ont reçue dans l'appareil de Melloni.

On savait déjà que plusieurs cristaux naturels, comme la tourmaline, la topaze, acquéraient des propriétés électriques lorsqu'on élevait leur température, et Volta avait annoncé qu'une lame d'argent chauffée inégalement à ses extrémités constituait un élément

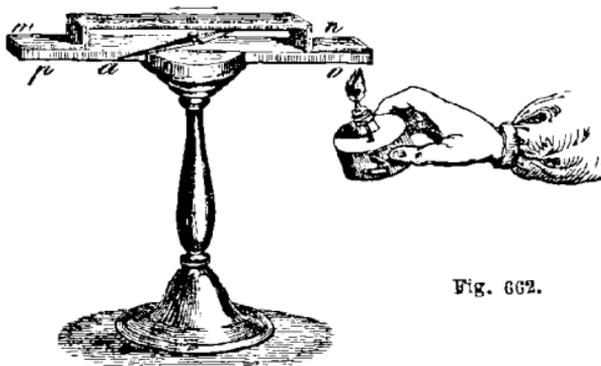


Fig. 662.

électromoteur; mais c'est Seebeck qui, le premier, en 1821, montra que le mouvement de la chaleur dans un circuit métallique donne naissance à des courants électriques.

Ces courants se constatent au moyen d'une lame de cuivre *m* dont les extrémités sont recourbées et soudées à une lame de bismuth *op* (fig. 662). Dans l'intérieur du circuit ainsi formé est une aiguille aimantée *a* mobile sur un pivot. Ayant placé l'appareil dans la direction du méridien magnétique, on chauffe l'une des soudures, et l'on voit alors l'aiguille prendre une déviation qui indique la production d'un courant de *n* vers *m*, c'est-à-dire de la soudure chaude à la soudure froide, dans le cuivre. Si, au lieu de chauffer la soudure *n*, on la refroidit avec de la glace, en conservant à l'autre soudure sa température, il se produit encore un courant, mais en sens inverse, c'est-à-dire de *m* vers *n*, et, dans les deux cas, le courant a d'autant plus d'énergie, que la *différence de température des deux soudures est plus grande*.

804. **Cause des courants thermo-électriques.** — Les courants thermo-électriques ne sont point dus au contact; car ils peuvent se développer dans des circuits formés d'un seul métal. Ils ne proviennent pas non plus d'actions chimiques, puisque M. Becquerel a constaté qu'ils se produisent également dans le vide et dans l'hydrogène. Le même savant les avait attribués à une inégale propagation de la chaleur dans les différentes parties du circuit. Depuis, Magnus a fait voir que, dans un circuit de deux conduc-

teurs cylindriques de cuivre, d'inégal diamètre, mais dans les mêmes conditions physiques l'un et l'autre, si l'on chauffe un des points de contact, il ne se produit point de courant, quelle que soit la différence de diamètre et de masse entre ces conducteurs; ce qui ne permet pas de donner pour cause aux courants thermo-électriques l'inégale propagation du flux de chaleur dans les deux parties du circuit. Aussi ces courants sont-ils attribués aujourd'hui à une différence de structure ou de densité des deux côtés du point chauffé.

En effet, tant que toutes les parties du circuit sont homogènes, il ne se manifeste aucun courant lorsqu'on chauffe un quelconque de ses points. C'est ce qui arrive, par exemple, si l'on réunit les deux bouts du fil de cuivre qui s'enroule autour du galvanomètre par un second fil de cuivre. Mais M. Becquerel lui-même a trouvé que si l'on détruit l'homogénéité de ce dernier fil en un de ses points, en le tordant plusieurs fois sur lui-même, ou en le nouant, et qu'on chauffe alors près de ce point, l'aiguille indique, par sa déviation, un courant allant du point chauffé au point où l'homogénéité a été détruite. En chauffant de l'autre côté de ce dernier point, le courant se produit en sens inverse.

805. Pouvoirs thermo-électriques des métaux. — On nomme *pouvoir thermo-électrique* d'un métal accouplé à un autre dans un circuit fermé, l'intensité relative du courant qu'on obtient en chauffant un des points de contact à une température donnée, tandis que l'autre est maintenue à zéro. Pour une même différence de température entre les points de contact, ce pouvoir varie avec les métaux, et ceux-ci restant les mêmes, il augmente avec la différence de température.

Ayant soudé à la suite les uns des autres une série de métaux différents, et mis les deux bouts en communication avec le galvanomètre, M. Becquerel chauffa successivement chacune des soudures à 20 degrés, toutes les autres étant maintenues à zéro. La conductibilité restant sensiblement la même, le pouvoir thermo-électrique était mesuré par la déviation du galvanomètre. M. Becquerel a pu ainsi ranger les métaux dans l'ordre suivant de leurs pouvoirs thermo-électriques : bismuth, nickel, platine, palladium, manganèse, argent, étain, plomb, cuivre, or, zinc, fer et antimoine, chacun étant positif avec ceux qui le précèdent et négatif avec ceux qui le suivent.

806. Propriétés des courants thermo-électriques. — Ces courants se distinguent des courants hydro-électriques en ce que, conduits comme eux par les métaux, ils ne le sont pas par les liquides, ou ne le sont qu'à un degré extrêmement faible. Cette différence

ne tient point à la nature de ces courants, mais seulement à leur tension, qui est considérablement plus faible que celle des courants hydro-électriques. Pouillet a constaté, en effet, au moyen du galvanomètre différentiel, que l'intensité du courant thermo-électrique développé par un couple bismuth et antimoine dont les soudures sont maintenues à une différence de température de 100 degrés, est cent mille fois moindre que celle du courant hydro-électrique d'une pile à auges ordinaire de 12 couples.

Les courants thermo-électriques ont, ainsi que les courants voltaïques, une action directrice sur l'aiguille aimantée; mais comme, vu leur faible tension, ils s'affaiblissent rapidement lorsque la longueur du circuit qu'ils traversent augmente, on doit éviter de leur faire parcourir de longs fils, quand on les fait passer dans le galvanomètre; c'est pourquoi, dans ce cas, on forme le circuit d'un fil court et gros, tandis que dans les galvanomètres destinés aux courants hydro-électriques, le fil est fin et long (801).

807. **Couples et piles thermo-électriques.** — On a déjà vu (297)

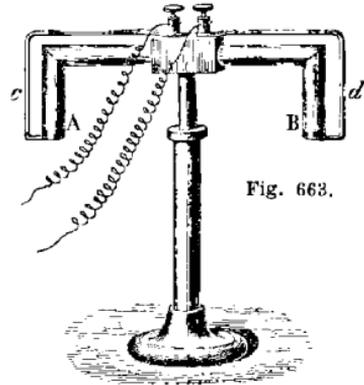


Fig. 663.

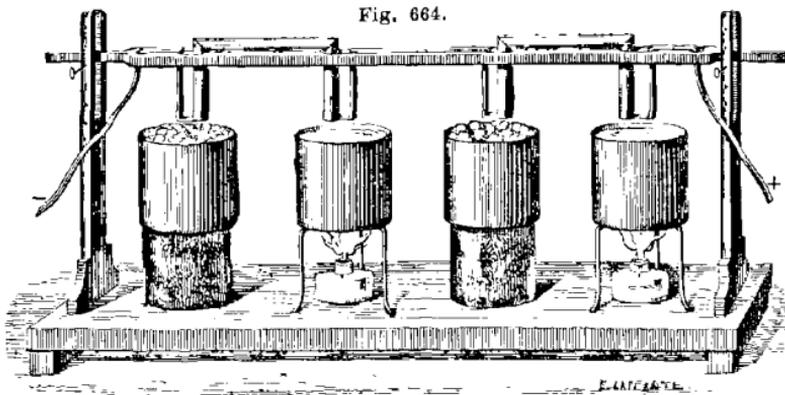


Fig. 664.

qu'on nomme *couple thermo-électrique* un système de deux métaux soudés l'un à l'autre, dont les extrémités libres peuvent être réunies par un conducteur. La figure 662 représente un couple bismuth et cuivre, et la figure 663 le couple dont Pouillet a fait usage dans ses recherches sur les lois des courants. Ce couple

se compose d'un barreau de bismuth AB, deux fois recourbé, aux extrémités duquel sont soudées deux lames de cuivre *c*, *d*, qui viennent aboutir à deux bornes isolées. De celles-ci partent des fils de cuivre destinés à servir d'électrodes.

En réunissant plusieurs de ces couples de façon que le deuxième cuivre du premier se soude au bismuth du second, puis le deuxième cuivre de celui-ci au bismuth du troisième, et ainsi de suite, on a une *pile thermo-électrique*, qu'on fait fonctionner en maintenant les soudures de rang impair, par exemple, à zéro dans de la glace, et en chauffant celles de rang pair à 100 degrés dans des vases remplis d'eau à 100 degrés (fig. 664).

On a beaucoup varié la disposition des piles thermo-électriques; la plus en usage est celle adoptée par Nobili et appliquée par Melloni au thermo-multiplicateur (fig. 256, page 261).

808. Lois des courants thermo-électriques. — 1^{re} LOI. — *Dans un couple thermo-électrique, tant que la différence de température entre les deux soudures reste la même, le courant est rigoureusement constant.*

2^e LOI. — *L'intensité des couples thermo-électriques augmente avec la différence de température entre les soudures; et si l'une d'elles est à zéro, cette intensité est proportionnelle, jusqu'à 45 degrés, à la température de l'autre soudure.*

3^e LOI. — *Dans une pile thermo-électrique, l'intensité du courant, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnelle au nombre des couples.*

Ces lois sont dues à M. Becquerel. Dans la deuxième, la limite de 45 degrés s'applique au couple cuivre et antimoine, mais elle varie avec les métaux. Pour le fer et le cuivre elle s'étend jusqu'à 300 degrés, et beaucoup au delà pour le fer et le palladium.

* 809. **Pile thermo-électrique d'Ed. Becquerel.** — M. Becquerel père avait observé, dès 1827, qu'un fil de cuivre associé avec un fil de même métal sulfuré à la surface donnait, par une élévation de température d'un des contacts de 200 à 300 degrés, un couple thermo-électrique beaucoup plus énergique que ceux qu'on obtient avec d'autres métaux. M. Ed. Becquerel pensa tout de suite à utiliser le sulfure de cuivre fondu dans la construction des piles thermo-électriques; mais Bunsen fit connaître avant lui une pile thermo-électrique dans laquelle il faisait usage de sulfure de cuivre naturel (pyrite de cuivre). Peu après, Mathiessen et Marcus construisirent des piles thermo-électriques antimoine et zinc, plus puissantes en quantité que les piles au sulfure de cuivre, mais ayant moins de tension.

M. Ed. Becquerel, ayant donné suite à ses recherches sur le pouvoir thermo-électrique du sulfure de cuivre artificiel, a trouvé, en 1865, que cette substance chauffée à 200 ou 300 degrés est fortement positive, et qu'un couple de ce sulfure et de cuivre a une force électromotrice près de dix fois plus grande que celle du couple bismuth et cuivre de la figure 663. Le sulfure de cuivre naturel est, au contraire, fortement négatif.

Le sulfure artificiel ne fondant qu'à 1035 degrés environ, on peut en faire usage à des températures très-élevées. Le métal que M. Ed. Becquerel lui associe est le mallechort (alliage de 90 de cuivre et 10 de nickel). La figure 665 représente la disposition d'une pile de M. Ed. Becquerel de 64 couples rangés en

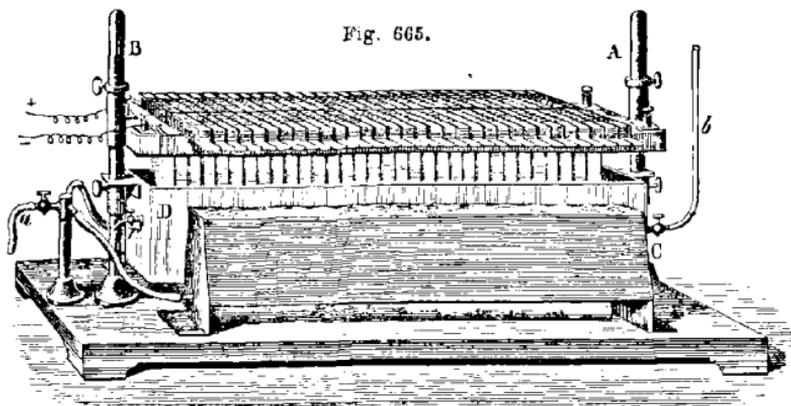


Fig. 665.

deux séries de 32. La figure 667 donne, sur une plus grande échelle, la vue d'un seul couple, et la figure 666 celle de 6 couples en deux séries de 3. Le sulfure de cuivre est taillé en prismes rectangles S (fig. 667), de 10 centimètres de longueur sur 18 millimètres de largeur et 12 d'épaisseur. A l'extrémité antérieure est une armature de mallechort *m* destinée à préserver le sulfure du grillage

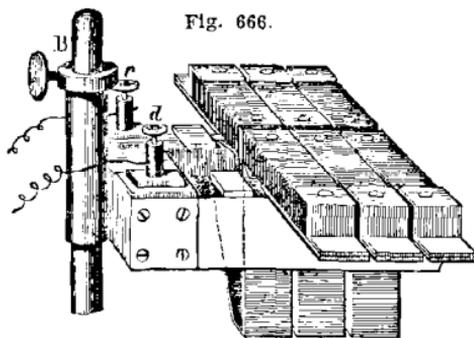


Fig. 666.

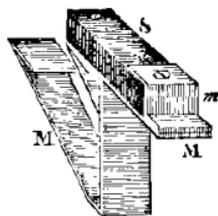


Fig. 667.

quand on chauffe le couple à la flamme du gaz. En dessous est une lame de mallechort MM qui se recourbe plusieurs fois pour aller se réunir au sulfure du couple suivant, et ainsi de suite. Les couples ainsi disposés en deux séries de 32 sont fixés à un cadre de bois supporté par deux colonnes de cuivre A, B (fig. 665), le long desquelles on peut l'élever plus ou moins. Au-dessous des couples est une caisse de laiton D remplie d'eau qui se renouvelle constamment, l'eau arrivant d'un bout par un tube *b* et se dégageant de l'autre, à mesure qu'elle s'échauffe, par un robinet *r*. Les lames de mallechort, lorsqu'elles plongent dans le liquide, sont donc entretenues à une température constante. Enfin, de chaque côté de la caisse est un réservoir C, dans lequel du gaz d'éclairage est amené par un tube de caoutchouc *a*. Ces deux réservoirs sont recouverts d'une toile métallique très-fine à travers laquelle le gaz se dégage. En inflam-

mant celui-ci et en abaissant les couples, l'extrémité des lames de maillechort est portée par la flamme à une température de 200 à 300 degrés. Pour recueillir le courant, on place sur la gauche du cadre deux bornes *d*, *c* (fig. 666), communiquant l'une avec le premier sulfure, c'est le pôle positif, l'autre avec le dernier maillechort, c'est le pôle négatif. A l'autre extrémité du cadre sont deux autres bornes destinées, suivant la manière dont les communications sont établies, à faire marcher la pile en tension, les 64 couples en une seule série (824), ou en quantité, c'est-à-dire en deux séries parallèles de 32.

La résistance du sulfure de cuivre au passage de l'électricité et par suite à la recombinaison des électricités contraires de la pile étant très-grande, le courant acquiert une forte tension. Aussi peut-il servir à télégraphier à une grande distance, et la pile ci-dessus suffit pour faire porter un poids de 100 kilogrammes à un fort électro-aimant. Elle fait rougir un fil de fer fin et court, et décompose l'eau faiblement. M. Becquerel a reconnu qu'il faut 8 à 9 couples de cette pile pour fournir une force électromotrice équivalente à celle d'un couple à sulfate de cuivre.

810. **Applications des courants thermo-électriques.** — La plus importante application des courants thermo-électriques est celle qui a été faite par Melloni au thermo-multiplicateur, appareil déjà décrit (300) et dont on a vu les nombreux usages dans l'étude de la chaleur rayonnante.

Par leur constance et leur proportionnalité aux différences de température, les courants thermo-électriques fournissent une méthode simple et rigoureuse pour graduer les galvanomètres (799). Ils ont encore trouvé une application dans les aiguilles thermo-électriques de M. Becquerel et dans la pince de Pelletier. Enfin, une application scientifique et industrielle en a été faite depuis quelques années dans le thermomètre et le pyromètre électriques.

* 811. **Thermomètre électrique de Becquerel.** — Cet appareil, extrêmement sensible, est formé de deux fils longs de plusieurs mètres, l'un de fer, l'autre de cuivre, soudés ensemble à leurs deux extrémités, et recouverts de gutta-percha dans tout le reste de leur longueur. Le fil de cuivre est coupé en deux parties pour se relier aux deux bornes d'un galvanomètre (fig. 668). Une des soudures est placée dans le lieu dont on veut connaître la température. Dans le dessin, elle est placée à l'extrémité d'un mât A, en B, sous un chapeau d'argent qui la préserve de la pluie et du soleil, mais permet à l'air de circuler autour.

La seconde soudure plonge dans du mercure contenu dans une éprouvette *a*, plongée elle-même dans de l'éther *e*, dans une éprouvette plus grande C. A côté est un thermomètre *t*, très-sensible, qui donne la température de l'éther. Enfin, un soufflet S, par un tuyau de caoutchouc et un tube de verre, sert à faire passer dans l'éther un courant d'air qui le vaporise et le refroidit. Si, au contraire, on veut l'échauffer, on approche de l'éprouvette C un vase hémicylindrique de fer-blanc contenant de l'eau chaude ou simplement un linge chaud.

Ces détails connus, tant que les deux soudures sont à la même température, aucun courant ne se produit dans le circuit, et le galvanomètre reste à zéro; mais, dès que la plus faible différence de température existe, l'aiguille du galvanomètre dévie et marque, par le sens de sa déviation, si c'est la soudure B qui est la plus chaude, ou celle plongée dans le mercure. Si c'est cette dernière, on fait marcher le soufflet jusqu'à ce que l'éther se vaporisant et se refroidissant, le galvanomètre revienne à zéro. Les deux soudures étant alors à la même température, si on consulte le thermomètre *t*, il fait connaître la température qui a lieu en B.

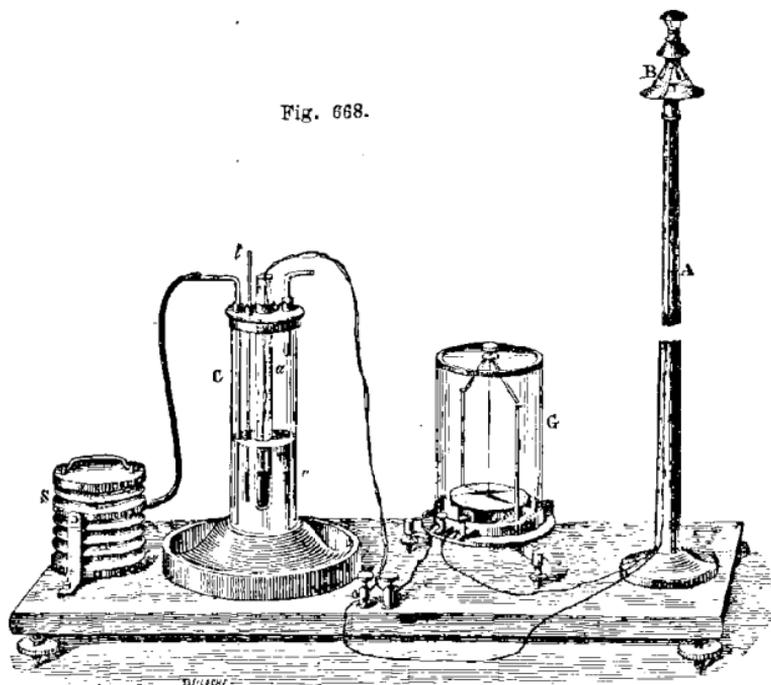
A l'aide de cet instrument, M. Becquerel a fait de nombreuses recherches sur la température du sol à différentes profondeurs, sur celle de l'air à diverses hauteurs, et enfin sur la température des plantes et des animaux.

* 812. **Pyromètre électrique d'Ed. Becquerel.** — Dès 1835, M. Becquerel père faisait voir que les courants thermo-électriques peuvent être utilisés pour

mesurer les très-hautes températures; et Pouillet, en 1836, adoptait un thermomètre électrique fer-platine; mais de 500 à 700 degrés, les indications du couple fer-platine sont tout à fait en retard sur la marche de la température; de plus, le fer étant très-oxydable, ce couple s'altère.

M. Ed. Becquerel, ayant constaté qu'un couple platine-palladium est celui dont

Fig. 668.



les indications offrent le plus de régularité, a adopté ces deux métaux pour la construction du pyromètre électrique. Son appareil est formé de deux fils, l'un de platine, l'autre de palladium, tous les deux de 2 mètres de longueur et de 1 millimètre carré de section. A leur extrémité ils ne sont point soudés, mais seulement serrés fortement, sur un centimètre de longueur, par un fil fin de platine. Le fil de palladium est renfermé dans un tube mince de porcelaine; celui de platine est à l'extérieur, et le tout est placé dans un tube P aussi de porcelaine et plus gros (fig. 669). C'est l'extrémité de ce dernier contenant la ligature qu'on plonge dans le lieu dont on cherche la température. De l'autre extrémité sortent les fils platine et palladium *m* et *n*, qui vont se souder à deux fils de cuivre qui conduisent le courant à un magnétomètre G. Dans le parcours de ces fils, leurs soudures avec les fils *m* et *n* sont engagées dans deux tubes de verre plongés dans la glace, afin que ces soudures, étant toutes deux à la même température, ne donnent lieu à aucun courant.

Le magnétomètre est un galvanomètre à grandes dimensions, très-sensible. Il se compose d'un barreau aimanté *ab* placé dans un cadre de cuivre rouge, qui amortit les oscillations (883), et porté par un étrier H, suspendu lui-même à un long fil de platine très-fin. Sur l'étrier est fixé un miroir M tournant avec le barreau, et destiné à donner par réflexion l'image des divisions tracées sur une échelle horizontale E, placée à distance. Ces divisions s'observent avec une

lunette L. Pour cela, avant le passage du courant, on amène l'image du zéro de l'échelle, qui est mobile, au fil micrométrique de la lunette; alors la plus légère déviation du miroir donne l'image d'une division plus élevée, et, par suite, l'angle d'écart du barreau, angle qui est toujours très-petit et ne doit pas

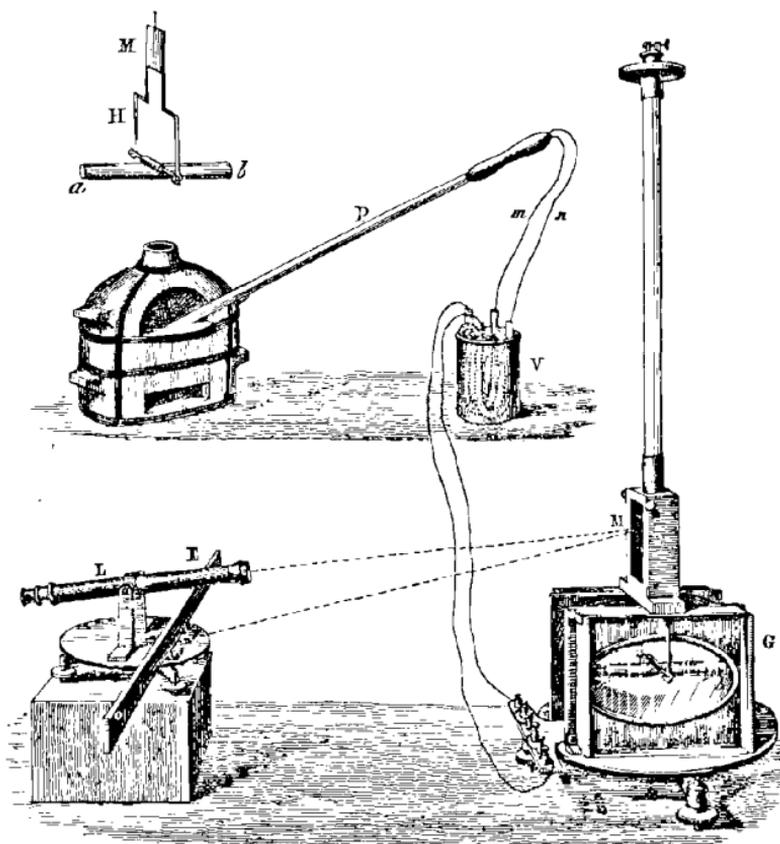


Fig. 669.

dépasser 3 ou 4 degrés; ce qu'on obtient en plaçant dans le circuit un rhéostat (815). L'angle d'écart connu, on en déduit l'intensité du courant et la température du couple platine-palladium, au moyen de tables pyrométriques. Celles-ci se construisent par interpolation quand on connaît les intensités correspondantes à deux températures voisines de celles qu'on veut observer.

Les indications du pyromètre électrique vont jusqu'à 1200 degrés, point de fusion du palladium.

CHAPITRE VI

INTENSITÉ, RÉSISTANCE, VITESSE ET DÉRIVATION DES COURANTS

813. Intensité des courants. — L'*intensité* d'un courant est représentée par sa puissance soit décomposante, éclairante ou calorifique, soit induisante sur un autre courant ou sur une aiguille aimantée, et deux courants sont dits de même intensité quand ils produisent le même effet, par exemple quand ils décomposent dans le même temps une même quantité d'eau, ou impriment à l'aiguille aimantée la même déviation. De même, un courant est double, triple d'un autre, lorsqu'il produit un effet double, triple. On ne peut déterminer l'intensité absolue des courants, mais seulement relative.

On a déjà vu que cette intensité se détermine par le voltamètre et par le galvanomètre (785 et 797), le premier étant utilisé pour les courants intenses, le second pour les courants faibles. Les indications de ces deux instruments sont proportionnelles entre elles; mais, tandis que le galvanomètre marque à chaque instant l'intensité du courant, le voltamètre ne donne que l'intensité moyenne pendant un temps donné. L'intensité des courants puissants se mesure encore avec la *boussole des sinus* et la *boussole des tangentes*, dues toutes les deux à Pouillet. Nous décrirons en outre le *rhéostat*, instrument qui sert à modifier l'intensité des courants en faisant varier la résistance des circuits qu'ils parcourent.

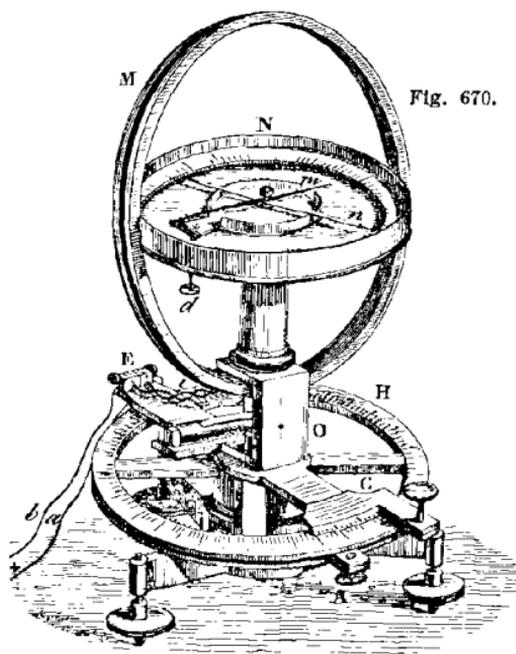


Fig. 670.

814. Boussole des sinus. — Cet instrument diffère du galvanomètre déjà décrit, en ce que le fil de cuivre dans lequel passe le courant ne fait autour de l'aiguille aimantée qu'un très-petit nombre de tours, même quelquefois un seul. Au centre d'un cercle horizontal N (fig. 670) est une aiguille aimantée *m*; une

deuxième aiguille n , de cuivre argenté, et mobile avec la première, à laquelle elle est fixée, sert à repérer l'aiguille m sur le cercle gradué N . Un cercle de cuivre M est disposé perpendiculairement au cercle horizontal. C'est sur ce cercle M que s'enroule le fil dans lequel passe le courant. Les bouts de ce fil, représentés en a et b , viennent se terminer à deux pièces E , auxquelles aboutissent deux fils de cuivre α et β , en communication avec la source électrique dont on veut mesurer le courant. Enfin, les cercles N et M sont portés sur un pied O , qui peut tourner autour d'un axe vertical passant par le centre d'un cercle horizontal fixe H .

Le circuit galvanométrique M étant orienté, c'est-à-dire dirigé dans le méridien magnétique, et par conséquent dans le même plan que l'aiguille; on fait passer le courant dans les fils α et β . Les aiguilles ayant dévié, on tourne le circuit M dans le sens de la déviation jusqu'à ce qu'il coïncide de nouveau avec le plan vertical passant par l'aiguille aimantée m . A ce moment, l'action directrice du courant s'exerçant perpendiculairement à la direction de l'aiguille aimantée, le calcul fait voir que l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle de déviation de cette aiguille, angle qui est égal à la rotation du cercle M et se mesure sur le cercle H , au moyen d'un vernier que porte la pièce C . C'est cette pièce qui, fixée au pied O , sert à le faire tourner au moyen d'un bouton A auquel elle est liée. L'angle de déviation connu, et par suite son sinus, on en déduit l'intensité du courant, puisque cette intensité est proportionnelle au sinus.

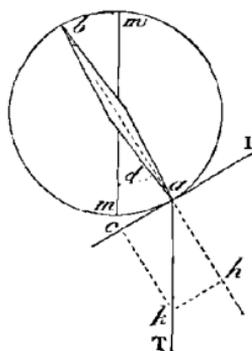


Fig. 671.

Pour démontrer que l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle de déviation, soient mm' (fig. 671) la direction du méridien magnétique, d l'angle de déviation, I l'intensité du courant, et T la force directrice de la terre. Si l'on représente par ak la direction et l'intensité de cette dernière force, on peut la remplacer par les deux composantes ah et ac (30). Or la première n'ayant aucune action directrice sur l'aiguille ab , c'est la composante ac qui fait seule équilibre à la force I ; il

faut donc qu'on ait $I = ac$. Mais le triangle rectangle ack donne $ac = ak \cos cak$, ou $ac = T \sin d$, l'angle cak étant le complément de l'angle d , et ak égal à T ; donc enfin $I = T \sin d$, ce qu'il fallait démontrer.

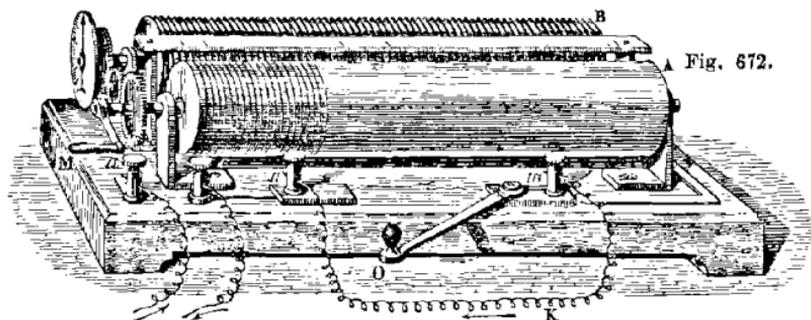
Dans la boussole des tangentes, l'aiguille ab est très-petite, et l'intensité du courant est alors très-sensiblement proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation de l'aiguille aimantée.

815. **Rhéostat.** - Le *rhéostat*, dû à Wheatstone, est un appareil qui sert à modifier l'intensité des courants, en donnant le moyen d'augmenter à volonté la résistance à leur propagation (816). Par suite, introduit dans un circuit voltaïque en même temps qu'un galvanomètre, il donne le moyen de produire sur celui-ci une déviation déterminée. Il se compose d'un cylindre de laiton A , et, à côté, d'une vis de bois B dont le pas est de 1 millimètre (fig. 672). Un fil fin de laiton, fixé d'un bout à l'extrémité du cylindre A , s'enroule plus ou moins sur celui-ci, puis passe sur la vis de bois, autour de laquelle il s'enroule jusqu'en B . Là, le bout du fil est mis en communication avec un axe métallique qui porte la vis, et enfin avec une lame de cuivre qui aboutit à la borne m . Sur les axes du cylindre et de la vis sont montées deux roues d'engrenage d'égal diamètre, réunies par un pignon. En faisant tourner le cylindre A dans un sens ou dans l'autre, à l'aide d'une manivelle M , la vis B tourne dans le même sens avec une vitesse égale, et le fil se déroule du cylindre sur la vis ou réciproquement. Le nombre des tours du fil sur le cylindre croissant ou décroissant à chaque révolu-

tion, une échelle horizontale, placée au-dessus et divisée en millimètres, marque les nombres de tours, tandis qu'une aiguille fixée à l'axe de la vis donne, sur un cercle gradué, les fractions de tours; d'où l'on déduit la longueur de fil enroulée sur la vis. Enfin, une pièce mobile O sert à établir ou à interrompre la communication entre les bornes *m* et *n*.

Ces détails connus, le courant, entrant dans l'appareil par la borne *a*, gagne le cylindre A, dans lequel il se propage sans résistance jusqu'au point où le fil passe sur la vis de bois. Suivant alors le fil dans les spires de cette vis jusqu'en B, c'est dans ce parcours que le courant rencontre une résistance d'autant plus grande, que le fil est plus fin et qu'il fait un nombre de tours plus considérable dans les spires de la vis. De celle-ci le courant arrive à la borne *m*, et de là, quand la pièce O est en contact avec le pied de la borne *n*, il revient par la borne *c* à la pile de laquelle il est parti.

Supposons maintenant qu'à la sortie du rhéostat le courant passe dans un galvanomètre et y produise une déviation de 60 degrés. Si l'on ouvre la pièce O, et qu'on lui substitue un conducteur K dont on veut déterminer la résistance et, par suite, la conductibilité, le circuit étant alors modifié, le galvanomètre



accuse une déviation, soit de 50 degrés. Mais en enroulant le fil lentement sur le cylindre A, la résistance diminue sur la vis, et bientôt le galvanomètre marque de nouveau 60. Si la longueur du fil sur la vis a été diminuée de 2 mètres, on en conclut que 2 mètres du fil fin de l'appareil offrent la même résistance que le conducteur K introduit dans le circuit. Il en serait de même si l'on interposait entre *m* et *n* toute autre résistance, par exemple un voltamètre contenant un li- quide quelconque. D'où l'on voit comment le rhéostat donne le moyen de mesurer les résistances relatives des divers circuits traversés par un même courant, ou, pour un même circuit, de comparer les intensités de courants différents.

816. **Unité et lois des résistances.** — Dans les conducteurs qu'ils traversent et dans la pile elle-même, les courants rencontrent des résistances dont on a à tenir compte dans les applications de la pile. Pour mesurer ces résistances, on a choisi pour *unité de résistance* celle d'une colonne de mercure ayant, à zéro, 1 mètre de longueur, 1 millimètre carré de section, et contenue dans un tube de verre. Cette unité est connue sous le nom d'*unité Siemens*, parce que c'est Siemens qui, le premier, l'a adoptée.

S'il s'agit, par exemple, de comparer la résistance du fer à celle du mercure, on fait passer un courant constant dans la colonne mercurielle ci-dessus, et, en même temps, dans une boussole des sinus. Ayant noté la déviation marquée par celle-ci, on remplace la colonne mercurielle par un fil de fer d'un millimètre carré de section, en augmentant successivement sa longueur jusqu'à ce que la boussole revienne à la même déviation. Or on trouve qu'il faut, pour cela, don-

ner au fil de fer une longueur de 7 mètres, d'où l'on conclut que, à section égale, la résistance du mercure est 7 fois plus grande que celle du fer.

En expérimentant sur des fils métalliques dont la nature, la longueur et la section varient, et en expérimentant sur les couples eux-mêmes, on trouve que la résistance aux courants est soumise aux lois suivantes :

1° Toutes choses égales d'ailleurs, elle est proportionnelle à la longueur des conducteurs.

2° Elle est en raison inverse de leur section.

3° Elle est en raison inverse de la conductibilité électrique des différentes substances qui composent le circuit (817).

4° Dans l'intérieur de la pile, elle est en raison inverse de la surface des couples, c'est-à-dire de la section du prisme liquide qui unit un couple au suivant.

Il découle de ces deux premières lois que la résistance ne change pas quand la section des conducteurs varie dans le même rapport que leur longueur.

Quant à la résistance des liquides, elle est considérable. En effet, d'après les expériences de Pouillet, la résistance des dissolutions salines est 16 millions de fois plus grande que celle du cuivre rouge, et celle de l'eau distillée 7 200 fois plus grande que celle de l'acide azotique.

817. Coefficients de conductibilité pour les courants. — M. Ed. Becquerel a trouvé que les pouvoirs conducteurs ou coefficients de conductibilité relative des métaux pour l'électricité, sont représentés, à zéro, par les nombres suivants, celui de l'argent étant pris égal à 100 :

Argent recuit	100	Palladium écroul.	14
Cuivre id.	91	Fer id.	12
Or id.	65	Plomb laminé.	9
Zinc id.	24	Platine écroul.	8
Étain id.	14	Mercure.	1,74

Pour les liquides, le même savant a trouvé les nombres suivants, comparativement au pouvoir conducteur de l'argent, pris égal à 100 000 000 000, à zéro.

Argent	100 000 000 000	Sulfate de cuivre	5 420
Acide azotique.	93 770	Eau distillée.	18

D'où l'on voit que la conductibilité des liquides est énormément moindre que celle des métaux.

L'élévation de température augmente la conductibilité des liquides, tandis que l'effet contraire a lieu pour les métaux.

La conductibilité des liquides composés a été considérée par la plupart des physiciens comme une conductibilité purement électrolytique, c'est-à-dire due à la décomposition chimique. Cependant Faraday, en faisant connaître sa loi générale des décompositions électrolytiques (787), avait annoncé qu'elle comporterait quelques restrictions dans le cas où les liquides seraient capables de conduire l'électricité sans subir de décomposition.

La conductibilité purement électrolytique a surtout été soutenue par Buff; mais, d'après Foucault, les liquides possèdent aussi une conductibilité propre, ou conductibilité physique, à la manière des métaux; seulement cette dernière est beaucoup plus faible que la conductibilité électrolytique.

818. Lois de Ohm sur l'intensité des courants thermo-électriques. — Dans les piles dont la résistance intérieure est assez faible pour être négligée, comme les piles thermo-électriques, dont toutes les parties sont métalliques, l'intensité des courants présente les lois suivantes :

1° Toutes choses égales d'ailleurs, elle est en raison inverse de la longueur du

circuit extérieur que parcourt le courant, c'est-à-dire en raison inverse de la résistance.

2° Elle est directement proportionnelle à la section du même circuit.

3° Elle est directement proportionnelle au coefficient de conductibilité du circuit.

Ces lois sont connues sous le nom de lois de *Ohm*, parce que c'est ce physicien qui, en 1827, les trouva théoriquement, en s'appuyant sur les travaux de Fourier sur la propagation de la chaleur.

819. Vérification expérimentale des lois de Ohm. — Pouillet, en 1838, arriva aux lois de Ohm uniquement par l'expérience. Pour cela, il choisit deux couples thermo-électriques pareils à celui représenté dans la figure 663, identiques entre eux, et dont l'une des soudures étant à zéro, l'autre était à 100 degrés. Or, en réunissant dans chaque couple les pôles par deux fils de cuivre rouge de même section, mais de longueurs inégales l et l' , et en enroulant ces fils en sens contraires sur le cadre d'un même galvanomètre, Pouillet trouva que les deux courants se faisaient équilibre quand les nombres de tours étaient en raison directe des longueurs l et l' ; c'est-à-dire que le fil l' étant, par exemple, trois fois plus long que l , il devait faire trois fois plus de tours; ce qui montre que l'intensité du courant correspondant à l' est trois fois moindre que celle du courant qui parcourt le fil l , et vérifie la première loi de Ohm.

Pour constater la seconde, Pouillet réunissait les pôles des mêmes couples par des fils de cuivre de même longueur, mais de sections différentes; et enroulant ces fils, comme ci-dessus, sur un même galvanomètre, les deux courants se faisaient équilibre lorsque les nombres de tours étaient en raison inverse des sections s et s' ; d'où l'on conclut que la section étant deux, trois fois plus grande, l'intensité devient elle-même deux, trois fois plus grande.

Enfin, pour la troisième loi, les fils étaient de même longueur et de même section, mais l'un de cuivre, et l'autre de platine, de plomb, de fer, etc.; l'équilibre s'établissait alors quand les nombres de tours étaient en raison inverse des coefficients de conductibilité c et c' (817); donc les intensités varient en raison directe des mêmes coefficients.

Pouillet a constaté que, dans les liquides comme dans les solides, l'intensité du courant est en raison directe de la section de la colonne liquide que traverse le courant, et en raison inverse de sa longueur, pourvu que celle-ci égale au moins cinq ou six fois le diamètre de la section.

820. Expression algébrique des lois de Ohm, longueur réduite. — En représentant par I l'intensité d'un courant thermo-électrique, par l , s , c , la longueur, la section et le coefficient de conductibilité du circuit parcouru par le courant, et par A une quantité variable avec la nature du couple, mais constante pour un même couple et pour une même différence de température des soudures, les trois lois de Ohm sont comprises dans la formule $I = A \frac{cs}{l}$. On verra ci-après (821) la valeur de la quantité A , et que cette valeur représente la force électromotrice du couple.

Les divers circuits que parcourent les courants étant, en général, hétérogènes, il importe, lorsqu'on veut les comparer entre eux, de les ramener tous à l'homogénéité; c'est ce qu'a fait Pouillet en les remplaçant par un conducteur de cuivre équivalent, c'est-à-dire de même résistance. Le conducteur qu'il a adopté est un fil de cuivre rouge, de 1 millimètre carré de section, et dont il a pris le coefficient de conductibilité pour unité des conductibilités.

Cela posé, le couple restant le même, supposons que le circuit change, et que sa longueur, sa section et sa conductibilité soient l' , s' et c' . L'intensité étant

représentée par I' , on a, comme ci-dessus, $I' = A \frac{c's'}{l'}$.

Si l'on veut satisfaire à la condition que I' reste égal à I , il faut que le second circuit soit équivalent au premier, ce qui n'a lieu qu'autant que

$$\frac{cs}{l} = \frac{c's'}{l'}, \quad \text{d'où} \quad l' = c's' \frac{l}{cs}.$$

Prenant $s' = 1$, et $c' = 1$, on a $l' = \frac{l}{cs}$.

Pouillet a donné le nom de *longueur réduite* à cette valeur $\frac{l}{cs}$ du second circuit par rapport au premier. Cette longueur réduite représentant la résistance R d'un fil de cuivre rouge d'une longueur l' , dont la section est de 1 millimètre carré, et le coefficient de conductibilité égal à 1, on pose $\frac{l}{cs} = R$, et la formule $I = A \frac{cs}{l}$, qui représente les lois de Ohm, prend la forme $I = \frac{A}{R}$.

821. **Mesure de la force électromotrice d'un couple.** — La formule $I = \frac{A}{R}$ pouvant se mettre sous la forme $IR = A$, on sait, d'après la première loi de Ohm (818), que, pour un couple donné, le produit IR est constant; il en est donc de même de la quantité A . De là on a choisi cette quantité pour représenter la force électromotrice du couple.

L'égalité $I = \frac{A}{R}$ fait voir que *l'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice.*

Si l'on prend $R = 1$, on a $A = I$; c'est-à-dire que *la force électromotrice d'un couple est égale à l'intensité du courant quand la résistance est égale à l'unité.*

On a adopté plusieurs méthodes pour calculer la force électromotrice A . Toutes sont fondées sur la formule $I = \frac{A}{R}$; c'est-à-dire qu'on détermine A au moyen de I et de R , I étant mesuré par le poids d'hydrogène que le courant dégage par minute dans le voltamètre (755), et R l'étant à l'aide du rhéostat (815).

822. **Application des lois de Ohm aux couples hydro-électriques.** — Lorsqu'on veut appliquer les lois de Ohm à un couple hydro-électrique, de Daniell ou de Bunsen, par exemple, on trouve que la première loi de Ohm, celle en vertu de laquelle l'intensité est en raison inverse de la résistance, ne se vérifie pas comme elle le fait avec les couples thermo-électriques.

Cela résulte de ce que le courant ne rencontre pas seulement ici la résistance du circuit extérieur, mais celle des liquides du couple, laquelle est très-grande. Or cette résistance peut être calculée, lorsqu'on connaît l'épaisseur de la masse liquide que le courant traverse, la surface immergée des lames qui plongent dans le liquide, et le coefficient de conductibilité de ce dernier. En représentant cette résistance par r et l'ajoutant à R , la formule $I = \frac{A}{R}$ devient $I = \frac{A}{R+r}$, et sous cette forme elle satisfait à la première loi de Ohm.

823. **Formules générales sur l'intensité des courants.** — On vient de voir que les formules qui représentent l'intensité des couples thermo-électriques et celle des couples hydro-électriques, sont respectivement $I = \frac{A}{R}$ [1], et $I = \frac{A}{R+r}$ [2], r étant la longueur réduite qui représente la résistance intérieure du couple. De ces formules on déduit facilement l'intensité des courants pour un nombre quelconque de couples.

En effet, soient n couples thermo-électriques associés en série, c'est-à-dire à la suite les uns des autres, et soient Λ , Λ' , Λ'' ..., les forces électromotrices de chacun d'eux. Ces forces s'ajoutant, la force électromotrice finale est $\Lambda + \Lambda' + \Lambda''$..., et la formule [1] devient $I = \frac{\Lambda + \Lambda' + \Lambda'' \dots}{R}$ [3].

Si les n couples sont hydro-électriques, il y a à tenir compte des résistances propres à chacun d'eux. En représentant celles-ci par r , r' , r'' ..., la résistance totale des couples est $r + r' + r''$..., et la formule [3] prend la forme

$$I = \frac{\Lambda + \Lambda' + \Lambda'' \dots}{R + r + r' + r'' \dots} \quad [4].$$

Les différents couples d'une pile étant toujours sensiblement identiques, on peut supposer $\Lambda = \Lambda' = \Lambda''$..., et $r = r' = r''$...; les formules [3] et [4] deviennent alors

$$I = \frac{n\Lambda}{R} \quad [5], \quad \text{et} \quad I = \frac{n\Lambda}{R + nr} \quad [6].$$

La formule [5] montre que, dans les piles thermo-électriques, l'intensité est proportionnelle au nombre des couples.

Quant aux piles hydro-électriques, la formule [6] pouvant se mettre sous la forme $I = \frac{\Lambda}{\frac{R}{n} + r}$, si la résistance R est petite par rapport à r , on peut né-

gliger le terme $\frac{R}{n}$ à côté de r , et I égale sensiblement alors $\frac{\Lambda}{r}$, c'est-à-dire l'intensité d'un seul couple; d'où $\frac{\Lambda}{r}$ est une valeur maximum. Il faut donc, lorsque R est faible, n'employer qu'un seul couple, mais à grande surface, pour diminuer la résistance r .

Au contraire, si la résistance R est assez grande pour qu'on puisse négliger r par rapport à $\frac{R}{n}$, on a $I = \frac{\Lambda}{\frac{R}{n}}$, ou $I = \frac{n\Lambda}{R}$, valeur croissant avec n ; c'est-à-

dire qu'il faut alors faire usage d'un grand nombre de couples.

824. Combinaisons diverses des couples d'une pile selon la résistance. — Étant donné un certain nombre de couples égaux entre eux, il importe, d'après ce qui précède, de les combiner de manières différentes, suivant la résistance du circuit intermédiaire. Par exemple, dans le cas de six couples seulement, on peut former les quatre combinaisons suivantes : 1° une seule série longitudinale (fig. 673), dont C représente l'électrode positive et Z l'électrode négative; 2° deux séries parallèles de trois couples chacune (fig. 674), les électrodes positives des deux séries se réunissant en C, et leurs électrodes négatives en Z; 3° trois séries parallèles de deux couples chacune (fig. 675), dont les électrodes de même nom vont encore concourir en une seule; 4° enfin, six séries d'un seul couple chacune (fig. 676), dont tous les pôles se réunissent en C et en Z. Avec douze couples, on pourrait réaliser huit combinaisons différentes, et ainsi de suite à mesure qu'on prend un plus grand nombre de couples. Les combinaisons en séries longitudinales se désignent sous le nom d'*association en série*; et celles en séries parallèles, sous celui d'*association en batterie*.

Dans ces diverses combinaisons, diminuer la longueur des séries pour en augmenter le nombre dans un rapport inverse, revient à diminuer le nombre des couples et à augmenter la surface, ce qui rend la résistance de la pile moindre, et conduit, pour un même nombre de couples, à des effets très-différents.

Pour n couples hydro électriques; montés en série, on a vu ci-dessus (823) que

l'intensité I est donnée par la formule $I = \frac{nA}{R + nr}$ [6]. Pour calculer l'intensité I' du courant fourni par les mêmes couples, lorsqu'ils sont montés en batterie (fig. 676), observons qu'alors la pile ne contenant en réalité qu'un seul couple



Fig. 673.

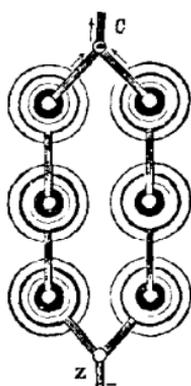


Fig. 674.

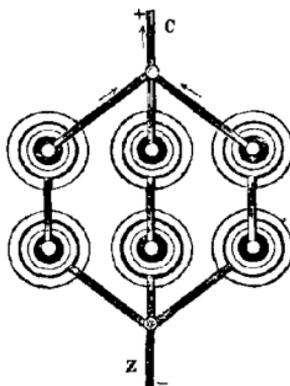


Fig. 675.

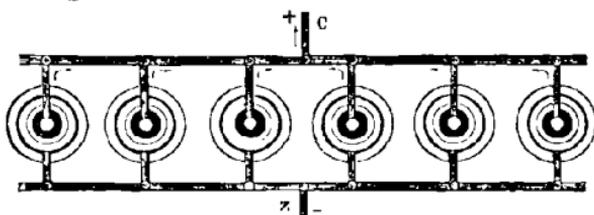


Fig. 676.

d'une surface n fois plus grande, la résistance est n fois moindre, c'est-à-dire $\frac{r}{n}$.

On a donc $I = \frac{nA}{R + nr}$, et $I' = \frac{A}{R + \frac{r}{n}} = \frac{nA}{Rn + r}$,

I étant l'intensité en série, et I' l'intensité en batterie.

Ces deux formules, pouvant s'écrire sous la forme

$$I = \frac{nA}{(R + r) + (n-1)r}, \quad \text{et} \quad I' = \frac{nA}{(R + r) + (n-1)R},$$

ont non-seulement même numérateur, mais leurs dénominateurs ont une partie commune $R + r$, et leurs secondes parties ne diffèrent que par les facteurs R et r . Par suite, si $R = r$, on a $I = I'$; si $R > r$, on a $I' < I$, et pour $R < r$, on trouve $I' > I$.

Il y a donc avantage à monter la pile en batterie lorsque R est faible, et en série dans le cas contraire, résultat conforme à ce qu'on a vu plus haut (823).

* 825. L'effet maximum a lieu lorsque la résistance extérieure égale la résistance intérieure de la pile. — Soient N couples associés en k séries parallèles de n couples chacune. Chaque série a une force électromotrice nA , et une résistance nr ; pour k séries montées en batterie, la résistance étant k fois moindre, on a

$$I = \frac{nA}{R + \frac{nr}{k}}, \quad \text{ou} \quad I = \frac{knA}{kR + nr}.$$

Or on sait que plus le dénominateur d'une fraction est petit, plus la fraction est grande. La valeur de I sera donc maximum quand le dénominateur $kR + nr$ sera minimum.

Cela posé, si l'on représente par m ce minimum, on a $kR + nr = m[A]$, équation dans laquelle k et n sont deux variables dont le produit est constant et

égal au nombre total des couples; c'est-à-dire que $kn = N$, d'où $k = \frac{N}{n}$. Portant cette valeur de k dans l'équation [A], on a une équation du second degré par rapport à n . En la résolvant, il vient

$$n = \frac{m}{2r} + \frac{1}{2r} \sqrt{m^2 - 4NRr} \quad [B].$$

Or on ne peut prendre $m^2 < 4NRr$, sinon on aurait une quantité négative sous le radical, et la valeur de n serait imaginaire. La plus petite valeur qu'on puisse donner à m^2 est donc $4NRr$; d'où $m = 2\sqrt{NRr}$. Portant cette valeur de m dans

l'égalité [B], on trouve $n = \frac{1}{r} \sqrt{NRr}$, ou $nr = \sqrt{NRr}$ [1].

Mais k étant égal à $\frac{N}{n}$, on a $k = \frac{Nr}{\sqrt{NRr}}$; d'où $kR = \frac{NRr}{\sqrt{NRr}} = \sqrt{NRr}$ [2].

Les formules [1] et [2] font voir que le dénominateur $kR + nr$ est minimum, et par suite I maximum, quand $kR = nr$; c'est-à-dire quand $R = \frac{nr}{k}$. Donc, pour que l'effet d'une pile soit maximum, il faut associer les couples de manière que la résistance extérieure R et la résistance intérieure $\frac{nr}{k}$ soient égales.

826. Vitesse de l'électricité. — De nombreuses tentatives ont été faites pour déterminer la vitesse de propagation de l'électricité dans les fils métalliques. En 1834, Wheatstone fit usage d'un miroir tournant semblable à celui déjà décrit en parlant de la vitesse de la lumière (fig. 373, page 443). D'après le retard qu'éprouvait, dans un temps donné, l'image de l'étincelle produite par une bouteille de Leyde, lorsque l'électricité passait dans un long fil, Wheatstone trouva que l'électricité, dans un fil de laiton de 2 millimètres de diamètre, se propageait avec une vitesse de 460 000 kilomètres par seconde, vitesse qui correspond à une fois et demie celle de la lumière. Walker, en Amérique, ayant fait, en 1840, des recherches sur le même sujet au moyen de signaux transmis par les fils de télégraphes électriques, trouva que la vitesse de l'électricité était de 30 000 kilomètres par seconde, nombre 15 fois plus petit que le précédent.

En 1850, MM. Fizeau et Gouelle, en expérimentant sur les fils télégraphiques de Paris à Amiens et à Rouen, sont arrivés aux résultats suivants :

1° Dans un fil de fer dont le diamètre est de 4 millimètres et demi, l'électricité se propage avec une vitesse de 101 700 kilomètres par seconde.

2° Dans un fil de cuivre d'un diamètre de 2 millimètres et demi, la vitesse est de 177 700 kilomètres.

3^e Les deux électricités se propagent avec la même vitesse.

4^e Le nombre et la nature des éléments dont la pile est formée, et, par conséquent, la tension de l'électricité et l'intensité du courant, n'ont pas d'influence sur la vitesse de propagation.

MM. Burnouf et Guillemin, en 1854, en expérimentant sur un circuit de 164 kilomètres, entre Foix et Toulouse, ont trouvé, dans des fils de cuivre, la vitesse de 180 000 kilomètres.

Dans des expériences faites entre les observatoires de Greenwich et d'Édimbourg, avec des fils de cuivre, on a trouvé 12 200 kilomètres pour la vitesse de l'électricité; et, entre les observatoires de Greenwich et de Bruxelles, à l'aide d'un fil sous-marin, on a trouvé seulement 4 300 kilomètres; mais, dans ce dernier cas, le fil de cuivre, recouvert de gutta-percha, étant en grande partie plongé dans la mer, Faraday a fait voir que cette énorme différence est due à l'action par influence que le fil exerce au travers de la gutta-percha sur le liquide dans lequel il est plongé. Ce sont donc les nombres de MM. Fizeau et Gonelle, et de MM. Burnouf et Guillemin, qui représentent avec le plus de fidélité la vitesse de l'électricité dans les fils métalliques.

827. **État permanent et état variable dans les circuits voltaïques.** — Un courant est à l'état *permanent* quand, dans toutes les parties du circuit, il passe des quantités égales d'électricité. Or, à la fermeture du courant, l'état permanent ne s'établit pas instantanément; il passe d'abord plus d'électricité dans les parties les plus rapprochées de la pile: c'est l'état *variable*. C'est Ohm qui, le premier, a signalé l'état variable dans la propagation des courants. M. Gaugain en a recherché les lois dans les corps peu conducteurs, tels que des fils de coton et des colonnes d'huile, et MM. Burnouf et Guillemin dans les fils métalliques des lignes télégraphiques.

Ces deux physiiciens sont ainsi arrivés aux résultats suivants avec un circuit de 570 kilomètres, communiquant d'un bout avec une pile à charbon de 60 éléments, et de l'autre avec la terre. 1^o Pendant l'état variable, l'intensité du courant est plus faible près de la pile que dans le reste du circuit. 2^o Une fois l'état permanent obtenu, le courant est, au contraire, moins intense à l'extrémité qui communique avec le sol, ce qui s'explique par les dérivations (828) qui se produisent par les poteaux et par l'air humide. 3^o La durée de l'état variable a été de $\frac{1}{50}$ de seconde avec un circuit de 570 kilomètres. 4^o La durée de l'état variable est d'autant moindre, que le courant est plus intense. 5^o Enfin, à l'ouverture du courant, la durée de la décharge, c'est-à-dire du retour du circuit à l'état neutre, égale à peu près quatre fois celle de l'état variable.

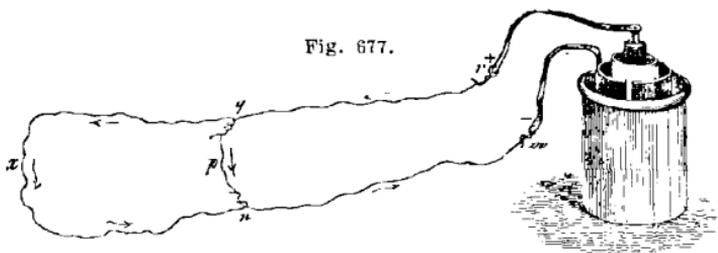
L'existence de l'état variable explique la discordance qu'on rencontre dans les résultats obtenus par les expérimentateurs qui ont cherché la vitesse de propagation de l'électricité; elle fait voir en même temps que cette vitesse ne peut être déterminée qu'approximativement.

828. **Courants dérivés, lois de la dérivation.** — Soit le courant d'une pile, d'un élément de Bunsen par exemple, parcourant un fil de cuivre *rqppnm* (fig. 677); et considérons le cas où l'on réunit deux points quelconques *n* et *q* de ce circuit par un second fil *qxn*. Le courant de la pile, se bifurquant alors au point *q*, se partage en deux autres, l'un qui continue à se propager dans le sens *qppnm*, et l'autre qui prend la direction *qxn*.

Les deux points *q* et *n*, d'où part et où aboutit le second conducteur, ont reçu le nom de *points de dérivation*; l'intervalle *qpn* qui les sépare, celui de *distance de dérivation*, et le fil *qxn*, celui de *fil de dérivation*. Le courant qui parcourt le fil *qxn* se nomme le *courant dérivé*; le courant qui parcourait le circuit *rqppnm* avant la dérivation, est le *courant primitif*; celui qui traverse le même conducteur après la dérivation, est le *courant partiel*; et enfin on appelle *courant principal* la totalité du courant qui parcourt tout l'ensemble du circuit quand on a ajouté le fil de dérivation.

Les courants dérivés sont soumis aux deux lois suivantes :

1^o *L'intensité du courant dérivé est directement proportionnelle à l'intensité du courant primitif et à la distance de dérivation.*



2^o *Quel que soit le nombre des points de dérivation, la somme des intensités des courants dérivés égale l'intensité du courant primitif.*

CHAPITRE VII

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

829. **Actions mutuelles entre les courants électriques.** — Lorsque deux fils métalliques voisins sont traversés simultanément par un courant électrique, il se produit entre eux, selon la direction relative des deux courants, des attractions ou des répulsions analogues à celles qui s'exercent entre les pôles des aimants. Ces phénomènes, dont la découverte est due à Ampère, peu de temps après celle d'Ørsted (796), constituent une branche de l'électricité dynamique qu'on nomme *électro-dynamique*. Les lois qui les régissent présentent différents cas, suivant que les courants sont parallèles ou angulaires, rectilignes ou sinueux.

830. **Lois des courants parallèles.** — 1^o *Deux courants parallèles de même sens s'attirent.*

2^o *Deux courants parallèles de sens contraires se repoussent.*

Quant à l'intensité de l'action dynamique entre les courants parallèles, elle présente les deux lois suivantes :

1^o *Entre deux éléments de courants, c'est-à-dire entre deux portions infiniment petites, l'attraction et la répulsion sont en raison composée des intensités des courants, et en raison inverse du carré de la distance.*

2^o *Entre un courant indéfini et un courant fini, la résultante des attractions ou des répulsions totales est proportionnelle à la longueur du courant fini, et en raison inverse de la simple distance au courant indéfini.*

Les deux dernières lois ont été trouvées par le calcul par Am-

père. Les deux premières se démontrent expérimentalement à l'aide d'un appareil dû à Ampère, modifié ensuite par Pouillet, et enfin par Obellianne. Nous le donnons ici tel qu'il est construit par Ruhmkorff.

L'appareil se compose de deux colonnes de laiton A et D, entre

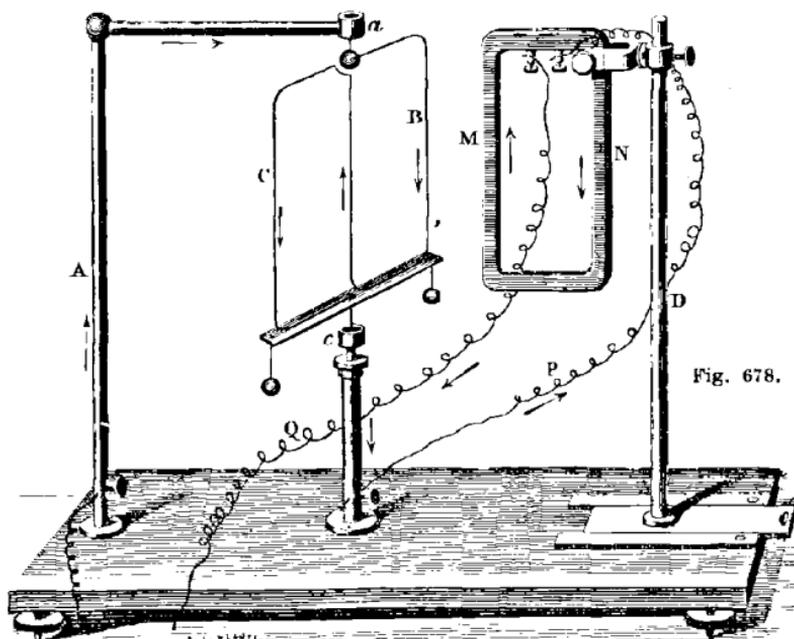


Fig. 678.

lesquelles en est une plus petite. La colonne D porte un multiplicateur MN de 20 tours (fig. 678), qu'on fixe à différentes hauteurs au moyen d'une vis de pression, et qui augmente beaucoup la sensibilité de l'instrument. Ce multiplicateur est maintenu par deux articulations qui permettent, l'une de le renverser sur lui-même (fig. 681), l'autre de le placer horizontalement (fig. 682). La petite colonne est creuse, et dans son intérieur glisse un tube de laiton terminé par un godet c, plein de mercure, qu'on élève plus ou moins. La colonne A supporte un godet a, rempli également de mercure, et représenté en coupe et en grandeur naturelle dans la figure 680. Il est percé, en dessous, d'un trou capillaire dans lequel s'engage la pointe d'une aiguille à coudre fixée à une petite boule de laiton. Cette pointe se prolonge jusqu'au mercure et tourne librement dans le trou. Quant au circuit mobile, il se compose d'un fil de cuivre rouge partant de la boule de laiton et se contournant, dans le sens des flèches, du godet a au

godet *c*. Ses deux branches inférieures sont fixées à une planchette de bois mince, et tout le système est équilibré par deux petites boules de laiton suspendues aux extrémités.

Ces détails connus, le courant d'une pile de 4 ou 5 couples de

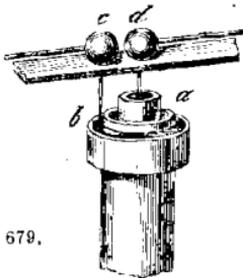


Fig. 679.

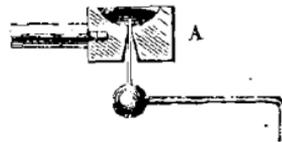


Fig. 680.

Bunsen, montant par la colonne A (fig. 678) jusqu'au godet *a*, parcourt le circuit BC, gagne le godet *c*, descend par la colonne centrale, et de là se rend par un fil P au multiplicateur MN, d'où il revient enfin à la pile par le fil Q. Or si, avant de faire passer le courant, on dispose le circuit mobile dans le plan du multiplicateur, les branches B et M en présence, on observe qu'aussitôt que

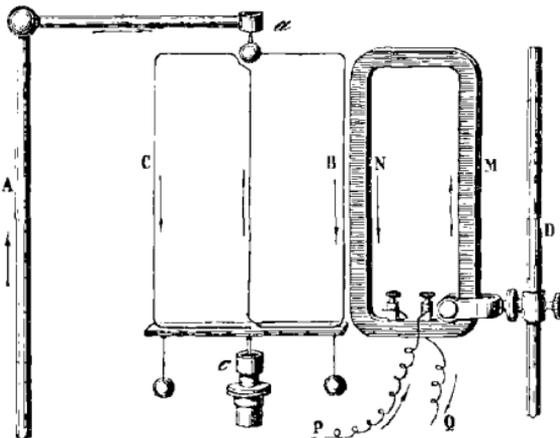


Fig. 681.

le courant passe, la branche B est repoussée, ce qui démontre la deuxième loi; car, dans les branches B et M, les courants, marchant dans le sens des flèches, sont de sens contraires.

Pour démontrer la première loi, on renverse le multiplicateur (fig. 681). Les courants sont alors de même sens, et si l'on écarte la branche B avant le passage du courant, on la voit se rapprocher dès qu'il passe, ce qui vérifie la première loi.

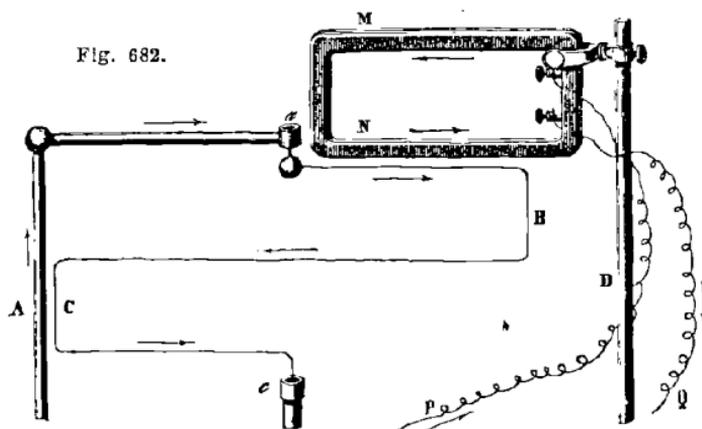
Dans l'appareil d'Obellianne les deux godets ne sont pas disposés comme dans la figure 678, mais réunis en un godet à deux compartiments concentriques isolés l'un de l'autre (fig. 679). Une des extrémités du circuit plonge dans le compartiment central *a*, l'autre dans le compartiment *b*. Avec cette disposition, la rotation s'opère sans résistance dans le compartiment central; mais, dans le second, la pointe fixée à la boule *c* ne peut tourner qu'en déplaçant le mercure, d'où résulte une résistance assez grande, surtout si le mercure n'est pas bien pur. Avec le godet représenté dans la figure 680, cette résistance disparaît.

Dans les expériences qui précèdent et dans celles qui suivent, il est souvent nécessaire de renverser le sens des courants. On arrive à ce résultat en faisant passer les courants dans de petits appareils qu'on nomme *commutateurs*. On en a construit de différents systèmes. Nous décrirons plus loin le commutateur de Bertin (842) et celui de Ruhmkorff (889).

831. **Lois des courants angulaires.** — 1° *Deux courants rectilignes, dont les directions forment un angle, s'attirent lorsqu'ils s'approchent ou s'éloignent tous les deux du sommet.*

2° *Ils se repoussent si, l'un marchant vers le sommet de l'angle, l'autre s'en éloigne.*

On démontre ces lois au moyen de l'appareil de la figure 678,

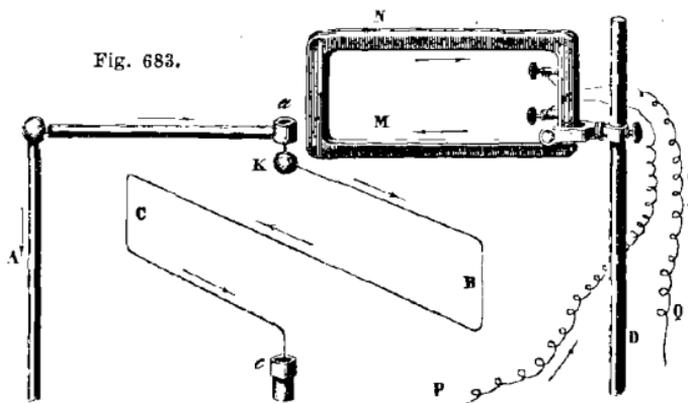


en y remplaçant le circuit mobile par le circuit BC (fig. 682). Disposant alors le multiplicateur horizontalement, de façon que son courant soit de même sens que dans le circuit mobile, si l'on écarte celui-ci et qu'on fasse passer le courant, le circuit se rapproche aussitôt, ce qui vérifie la première loi.

Pour vérifier la seconde, il suffit de retourner le multiplicateur

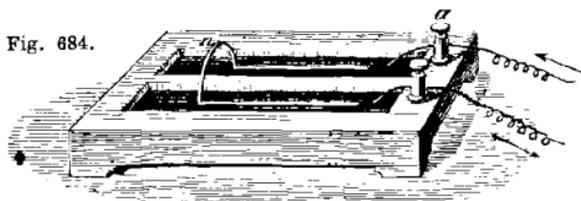
de façon que les courants soient de sens contraires, et aussitôt il y a répulsion (fig. 683).

Ampère a conclu de là qu'un courant angulaire tend à se re-



dresser, et que, dans un courant rectiligne, chaque élément du courant repousse le suivant et en est repoussé.

On démontre ce principe en faisant voir que, lorsque le courant passe d'un bain de mercure dans un petit fil de cuivre qui repose sur la surface du liquide, ce fil est repoussé. Pour cela, sur une planchette sont pratiquées deux cavités longitudinales contenant du mercure, et les deux baigns sont reliés par un fil de cuivre recourbé, qui repose dessus. Or, dès qu'un courant,

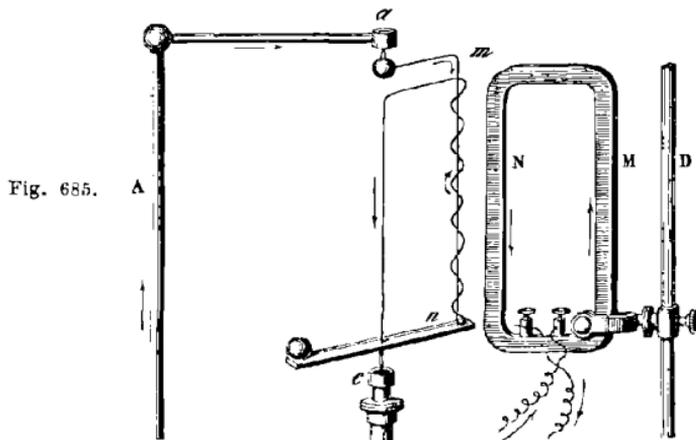


arrivant par la borne *a* (fig. 684), passe dans le premier bain, puis dans le fil de cuivre, et de là dans le deuxième bain, le fil est repoussé et s'éloigne des deux bornes. D'où l'on conclut que les éléments de courant en contact sur le mercure et le cuivre se repoussent; mais il est à remarquer que la résistance qui résulte du changement de conducteur peut suffire pour produire le même effet.

832. Lois des courants sinueux. — *L'action attractive ou répulsive d'un courant sinueux est la même, toutes choses égales*

d'ailleurs, que celle d'un courant rectiligne d'une longueur égale en projection.

Cette loi se vérifie encore avec l'appareil d'Obellianne, en disposant le multiplicateur verticalement (fig. 685), et en plaçant auprès un circuit mobile mn , composé d'une partie rectiligne descendante et d'une partie sinieuse ascendante. Lorsque le courant



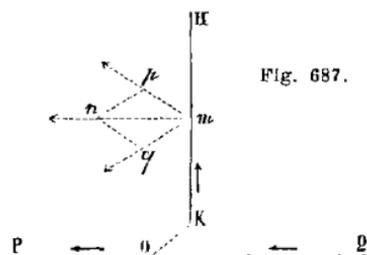
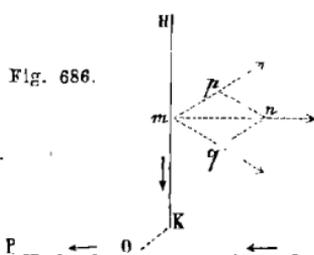
passé, on n'observe ni attraction ni répulsion, ce qui fait voir que les actions contraires du multiplicateur sur le fil rectiligne et sur le fil sinieux sont égales.

Le principe des courants sinieux trouvera bientôt son application dans les *solénoïdes*, appareils formés de la combinaison d'un courant rectiligne avec un courant sinieux (843).

DIRECTION DES COURANTS PAR LES COURANTS

833. **Action d'un courant indéfini sur un courant perpendiculaire à sa direction.** — D'après l'action qui s'exerce entre deux courants angulaires (831), on détermine facilement celle qu'exerce un courant rectiligne PQ (fig. 686), fixe et indéfini, sur un courant mobile KH perpendiculaire à sa direction. Pour cela, soit OK la perpendiculaire commune à KH et PQ , laquelle est nulle si les deux lignes PQ et KH se rencontrent. Le courant PQ étant dirigé de Q vers P , dans le sens des flèches, soit d'abord le cas où le courant HK se rapproche du courant PQ . D'après la première loi des courants angulaires, la portion QO du courant PQ attire le courant HK , puisque ces courants se dirigent tous les deux vers le sommet de l'angle formé par leurs directions. Quant à la portion PO du courant PQ , elle repousse au contraire le courant KH ; car ici les deux courants sont de sens opposés par rapport au sommet

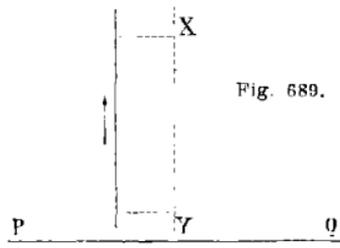
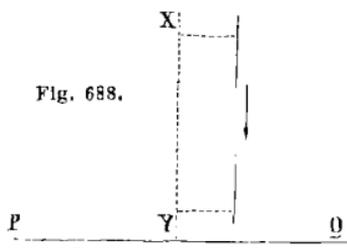
de l'angle. Représentant donc par mq et mp les deux forces, l'une attractive, l'autre répulsive, qui sollicitent le courant KH, forces qui sont de même intensité, puisque tout est symétrique des deux côtés du point O, ces deux forces se composent en une force unique mn (30), laquelle tend à entraîner le courant KH parallèlement au courant PQ, dans un sens opposé à ce dernier.



Si l'on considère le cas où le courant KH s'éloigne du courant PQ (fig. 687), on reconnaît facilement qu'il est encore entraîné parallèlement à ce courant, mais dans le même sens que lui.

On peut donc poser ce principe général : *Un courant fini 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; si le courant mobile s'écarte du courant fixe, il est encore sollicité à se mouvoir parallèlement à ce courant, mais dans le même sens.*

Il suit de là qu'un courant vertical étant mobile autour d'un



axe XY parallèle à sa direction (fig. 688 et 689), tout courant horizontal PQ a pour effet de faire tourner le courant mobile autour de son axe, jusqu'à ce que le plan de l'axe et du courant soit devenu parallèle à PQ, le courant vertical s'arrêtant, par rapport à son axe, du côté d'où vient le courant PQ (fig. 688), ou du côté où il se dirige (fig. 689), selon que le courant vertical est descendant ou ascendant, c'est-à-dire selon qu'il s'approche ou qu'il s'écarte du courant horizontal.

On déduit encore du principe ci-dessus qu'un système de deux courants verticaux, mobiles ensemble autour d'un axe vertical (fig. 690 et 691), est dirigé, par un courant horizontal PQ, dans un plan parallèle à ce courant, quand des deux courants verticaux l'un est ascendant et l'autre descendant (fig. 689); mais que

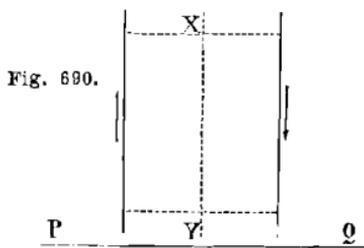


Fig. 690.

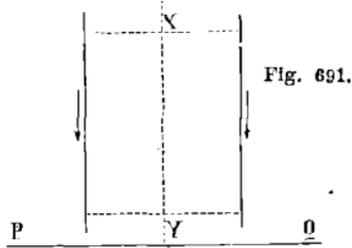


Fig. 691.

s'ils sont tous deux descendants (fig. 691), ou tous deux ascendants, le système n'est pas dirigé.

834. **Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant rectangulaire ou circulaire.** — Il est facile de reconnaître qu'un courant horizontal indéfini exerce sur un courant rectangulaire mobile autour d'un axe vertical (fig. 692) la même action directrice

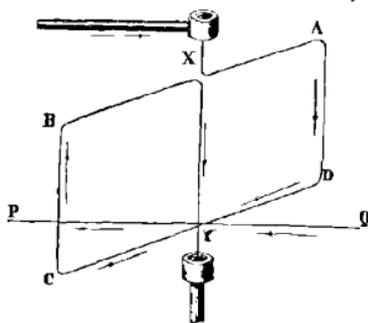


Fig. 692.

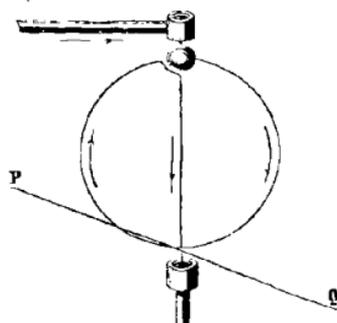


Fig. 693.

que ci-dessus. En effet, d'après la direction des courants marquée par les flèches, la portion QY agit par attraction non-seulement sur la portion horizontale YD (loi des courants angulaires, 831), mais sur la partie verticale AD (loi des courants perpendiculaires, 833). La même action a évidemment lieu entre la portion PY, et les parties CY et BC. Donc *le courant fixe PQ tend à diriger le courant rectangulaire mobile ADCB dans une position parallèle à PQ, et telle que, dans les fils CD et PQ, le sens des deux courants soit le même.*

Tout ce qu'on vient de dire d'un courant rectangulaire s'applique exactement à tout courant circulaire (fig. 693).

ROTATION DES COURANTS PAR LES COURANTS

835. **Rotation d'un courant horizontal fini par un courant rectiligne horizontal indéfini.** — Les attractions et les répulsions qu'exercent entre eux les courants angulaires peuvent facilement se transformer en mouvement circulaire continu. Pour cela, soit

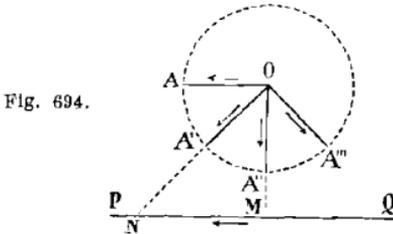


Fig. 694.

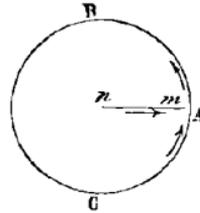


Fig. 695.

un courant OA (fig. 694), mobile autour du point O , dans un plan horizontal, et soit PQ un courant indéfini, aussi horizontal. Ces courants étant dirigés dans le sens des flèches, il s'ensuit que, en OA , le courant mobile est attiré par le courant PQ , puisqu'ils sont de même sens. Arrivé en OA' , le courant mobile est attiré par la portion NQ du courant fixe et repoussé par la portion PN . De même, en OA'' , il est attiré par MQ et repoussé par PM , et ainsi de suite; d'où résulte un mouvement de rotation continu dans le sens $AA'A''A'''$. Donc, *par l'effet du courant fixe indéfini PQ , le courant mobile OA tend à tourner d'un mouvement continu dans une direction rétrograde par rapport à celle du courant fixe.* Si le courant mobile, au lieu d'être dirigé de O vers A , l'était de A vers O , la rotation aurait lieu en sens contraire.

Si, les deux courants étant encore horizontaux, le courant fixe est circulaire au lieu d'être rectiligne, son effet sera encore de produire un mouvement circulaire continu. Soient, en effet, deux courants placés dans un plan horizontal, l'un ABC (fig. 695), fixe et circulaire, l'autre mn , rectiligne et mobile autour du centre n . Ces courants, dirigés dans le sens des flèches, s'attirent dans l'angle nAC , car ils vont tous les deux vers le sommet (831, 1^o). Dans l'angle nAB , au contraire, ils se repoussent, car l'un va vers le sommet, tandis que l'autre s'en éloigne. Les deux effets concourent donc pour faire tourner le fil mn dans le sens ACB .

836. **Rotation d'un courant vertical par un courant circulaire horizontal.** — Un courant circulaire horizontal, qui agit sur un courant rectiligne vertical, lui imprime aussi un mouvement de rotation continu. On constate cette rotation au moyen d'un vase de cuivre rouge autour duquel s'enroule une lame de même métal

recouverte de soie ou de laine, et parcourue par un courant fixe (fig. 696). Au centre du vase est une colonne de laiton *a*, terminée par une capsule qui contient du mercure. Dans celui-ci plonge un pivot qui supporte un fil de cuivre rouge *bb*, recourbé à ses extrémités en deux branches verticales qui vont se souder à un anneau très-léger de cuivre rouge, plongeant dans de l'eau acidulée contenue dans le vase. Le courant d'une pile arrivant par le fil *m* se

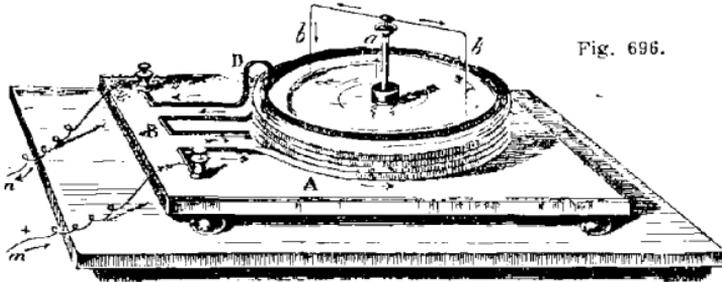


Fig. 696.

rend dans la lame A, d'où, après avoir fait plusieurs circuits autour du vase, il arrive à la lame B, et de là gagne, en dessous du vase, la partie inférieure de la colonne *a*. Montant dans cette colonne, il passe dans les fils *bb*, dans l'anneau de cuivre rouge, dans l'eau acidulée et dans les parois du vase, d'où il revient à la pile par la lame D. Le courant se trouvant ainsi fermé, le circuit *bb* et l'anneau se mettent à tourner en sens contraire du courant fixe, mouvement dû à l'action du courant circulaire sur le courant des branches *bb*, comme il est facile de le voir d'après les deux lois des courants angulaires, la branche *b*, de droite, étant attirée en avant par la portion A du circuit fixe, et la branche *b*, de gauche, l'étant en sens contraire par la portion opposée. Quant à l'action du courant circulaire sur la partie horizontale du circuit *bb*, elle concourt évidemment pour faire tourner dans le même sens; mais son action peut être rendue négligeable par la distance.

CHAPITRE VIII

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

837. **Actions des courants sur les aimants.** — Les courants exercent sur les aimants deux sortes d'actions, l'une directrice qui a déjà été étudiée (796), l'autre attractive ou répulsive; de plus, toutes ces actions sont réciproques; c'est-à-dire que de même que

les courants agissent sur les aimants, réciproquement ceux-ci agissent sur les courants pour les diriger, les attirer ou les repousser. L'étude de ces actions et réactions entre les aimants et les courants se désigne sous le nom d'*électro-magnétisme*.

On a vu (796) que l'action directrice des courants sur les aimants consiste en ce que *le courant tend toujours à mettre l'aimant en croix avec lui, son pôle austral à gauche d'un observateur couché dans le courant, de manière que, regardant l'aimant, le courant entre par les pieds et sorte par la tête.*

L'intensité de l'action réciproque entre les aimants et les courants présente deux cas : 1^o celui où l'on ne considère que l'action d'un pôle magnétique sur un *élément* de courant ; 2^o celui où l'on considère l'action sur une aiguille aimantée d'un courant *indéfini*, c'est-à-dire d'une très-grande longueur par rapport à l'aiguille, et surtout par rapport à sa distance du courant.

Dans le premier cas, la force qui s'exerce entre le pôle magnétique et l'élément électro-dynamique *est en raison inverse du carré de la distance*, comme toutes les forces de la nature.

Dans le second, en faisant osciller une aiguille aimantée à des distances variables d'un courant rectiligne indéfini, perpendiculaire au plan d'oscillation, Biot et Savart ont trouvé que *l'intensité de la résultante des actions directrices de toutes les parties du courant sur l'aiguille est en raison inverse de la simple distance*. Il est à remarquer que ces lois sont les mêmes que celles entre deux éléments de courants, et entre un courant fini et un courant indéfini (830).

L'action attractive ou répulsive des courants sur les aimants se constate en suspendant, par une de ses extrémités, à un fil très-fin, une aiguille à coudre aimantée; puis on fait passer un courant horizontal très-près de l'aiguille. On observe alors, suivant le sens du courant, une attraction ou une répulsion.

Tous ces effets s'expliquent par l'action mutuelle entre les courants (830), lorsqu'on adopte l'hypothèse des courants magnétiques d'Ampère (848).

838. Action directrice des aimants sur les courants. — L'action directrice entre les courants et les aimants est réciproque. Dans l'expérience d'Ørsted (fig. 658), l'aiguille aimantée étant mobile, tandis que le courant est fixe, c'est elle qui se dirige et se met en croix avec le courant. Si, au contraire, l'aimant est fixe et le courant mobile, c'est celui-ci qui se dirige et vient se mettre en croix avec l'aimant, le pôle austral occupant toujours la gauche.

Pour le démontrer, on prend l'appareil de la figure 678, sur lequel on pose le circuit mobile de la figure 682. Approchant alors

un barreau aimanté (fig. 697), on voit le circuit tourner, et, après quelques oscillations, se mettre en croix avec le barreau. Ici encore ce sont les courants d'Ampère qui dirigent le courant mobile jusqu'à ce qu'il leur devienne parallèle et de même sens.

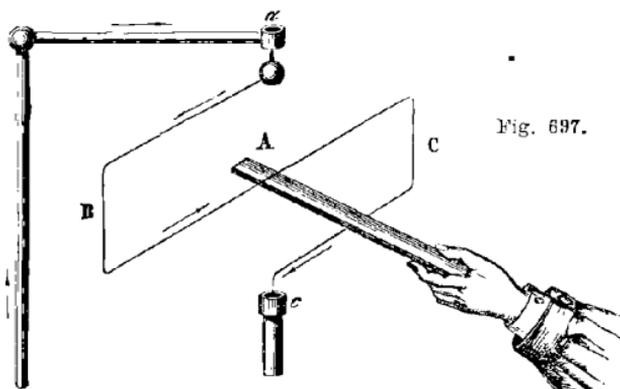


Fig. 697.

839. **Rotation des aimants par les courants.** — Les mêmes mouvements de rotation que les courants font prendre aux courants (835) se produisent entre les courants et les aimants, ce que Faraday, le premier, a démontré par l'expérience suivante (fig. 698). Au centre d'une large éprouvette remplie de mercure plonge un barreau aimanté A, de 20 centimètres de longueur environ, lesté à sa partie inférieure par un appendice de platine, et s'élevant de quelques millimètres au-dessus du niveau du mercure. A la partie supérieure du barreau est une cavité contenant du mercure. Un courant, montant par la colonne *m*, arrive au mercure et au barreau, d'où, rayonnant tout autour de celui-ci, il gagne une pièce annulaire de cuivre G, qui plonge dans le mercure le long de la paroi de l'éprouvette, gagne la colonne *n* et retourne à la pile. Or, dès que le courant passe, le barreau tourne autour de son axe avec une vitesse qui dépend de sa puissance magnétique et de l'intensité du courant. Quant au sens de la rotation, il dépend de celui du courant, et du pôle, austral ou boréal, qui flotte à la surface du mercure. Si c'est le pôle austral et si le courant est descendant, comme dans la figure 698, la rotation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre. Elle a lieu en sens contraire si l'on renverse le sens du courant, ou si l'on retourne le barreau de manière que ce soit le pôle boréal qui flotte à la surface.

Lorsqu'on dispose l'expérience comme dans la figure 699, le barreau ne tourne plus sur lui-même, mais autour de l'axe vertical passant par la tige C.

Les figures 700 et 701, correspondant, la première à l'expérience de la figure 698, la seconde à celle de la figure 699, donnent, sur une plus grande échelle et sur un plan horizontal pas-

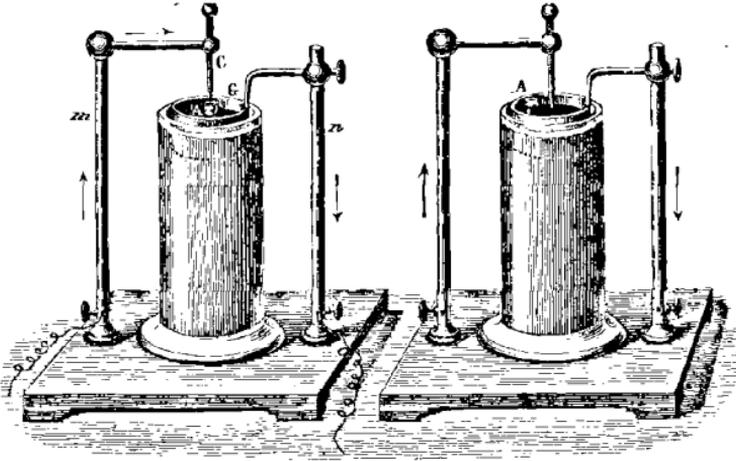


Fig. 698.

Fig. 699.

sant par la surface du mercure, la direction des courants auxquels est due la rotation. Dans la figure 700, le pôle austral étant en haut, les courants d'Amère autour du barreau marchent en sens

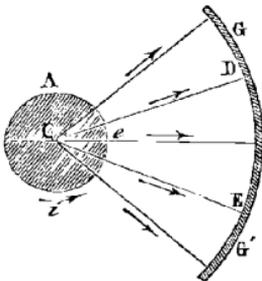


Fig. 700.

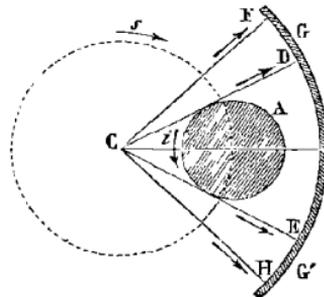


Fig. 701.

contraire des aiguilles d'une montre dans le sens de la flèche i (849), tandis que les courants qui rayonnent de la tige C vers l'anneau métallique G sont dirigés suivant les droites CD, CE... Par suite, d'après les effets des courants angulaires (831), un élément quelconque e du courant magnétique du barreau A est attiré par le courant CE et repoussé par le courant CD, ainsi qu'on

l'a déjà vu dans la figure 695 ; de là, rotation du barreau dans le sens des aiguilles d'une montre autour de son axe.

Dans la figure 701, les courants CD, CF, étant contraires à ceux du barreau A, les repoussent, tandis que les courants CE, CH, de même sens, les attirent. Le barreau est donc entraîné circulairement dans le sens de la flèche s autour de l'axe vertical qui passe par la tige C.

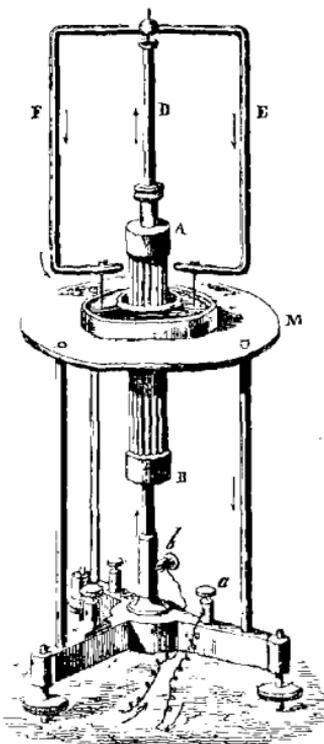


Fig. 702 (h. 44).

L'appareil ainsi disposé, on fait arriver le courant d'une pile de 4 ou 5 couples de Bunsen à la borne *b* ; de là il monte dans la colonne D, redescend par les deux branches E, F, gagne le mercure par les pointes d'acier, et se rend par le bâti, qui est de cuivre, à la borne *a*, d'où il revient à la pile. Or, si l'on élève alors le faisceau aimanté, comme le montre le dessin, le circuit mobile EF prend un mouvement de rotation rapide dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il est soumis à l'action du pôle austral ou du pôle boréal de l'aimant. Cette rotation est due aux courants circulaires d'Ampère autour des aimants, courants qui agissent sur les branches verticales E, F, de la même manière que le courant circulaire sur les branches *b, b*, dans la figure 696.

Dans cette expérience, on peut substituer au faisceau aimanté un solénoïde (843) ou un électro-aimant ; pour cela, deux bornes

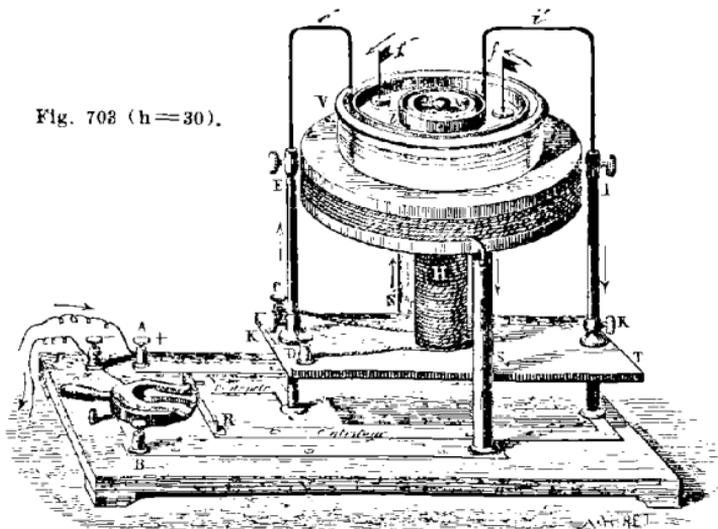
840. Rotation des courants par les aimants. — L'action rotative des courants sur les aimants est réciproque. On le vérifie par l'expérience suivante, due aussi à Faraday : sur un pied à vis calantes est fixée une colonne de cuivre *bd* isolée par un contact d'ivoire, le long de laquelle s'élève plus ou moins un tube métallique entouré d'un faisceau aimanté *AB* (fig. 702). Au haut de la colonne est un godet contenant du mercure dans lequel plonge une pointe d'acier. A celle-ci est fixé un circuit *EF*, de cuivre rouge, dont les bouts portent des pointes d'acier qui plongent dans un réservoir plein de mercure.

L'appareil ainsi disposé, on fait arriver le courant d'une pile de 4 ou 5 couples de Bunsen à la borne *b* ; de là il monte dans la colonne D, redescend par les deux branches E, F, gagne le mercure par les pointes d'acier, et se rend par le bâti, qui est de cuivre, à la borne *a*, d'où il revient à la pile.

placées sur le pied de l'appareil, à gauche, reçoivent le courant qui doit parcourir le solénoïde ou l'électro-aimant. On constate ainsi que l'action d'un solénoïde sur le circuit mobile EF est identiquement la même que celle d'un faisceau aimanté; d'où l'on voit que l'appareil qu'on vient de décrire peut servir à démontrer l'identité entre les solénoïdes et les aimants.

841. Rotation électro-dynamique et électro-magnétique des liquides. — Dans les expériences d'électro-dynamique décrites

Fig. 702 (h=30).



précédemment (835 et 836), la rotation s'obtient en faisant agir un courant fixe sur un courant linéaire mobile. Il en est de même dans la rotation électro-magnétique de la figure 702. Or cette condition d'un circuit linéaire n'est pas nécessaire. On a déjà vu (fig. 698 et 699) le mouvement de rotation transmis à une masse magnétique plus ou moins considérable; et dès la découverte de l'électro-dynamique, on observa la rotation du mercure et de l'eau par l'action des courants.

La figure 703 représente un appareil adopté par M. Bertin, pour démontrer la rotation électro-dynamique et électro-magnétique des liquides. Cet appareil, construit par M. Ducretet, se compose d'un vase de verre VV, annulaire, c'est-à-dire ouvert à son centre de manière à être traversé par une bobine H. Celle-ci est portée par une planchette T qu'on élève plus ou moins le long de deux colonnes E, I, et qu'on fixe à l'aide de vis de pression K, K. Dans l'intérieur de la bobine est un barreau de fer doux α ,

qui en fait un électro-aimant (856). Autour du vase V s'enroule une bobine G entre deux plateaux de bois, dont l'inférieur, qui sert de support au vase V, est fixé aux colonnes S, S'.

Le vase VV contient de l'eau acidulée de $\frac{1}{20}$ d'acide sulfurique et de $\frac{1}{20}$ d'acide azotique en volume; et dans le liquide plongent deux électrodes cylindriques de cuivre rouge *e* et *i*, soudées à des fils de cuivre *e'* et *i'*, qui reçoivent le courant d'une pile à charbon de 4 couples par les colonnes E, I.

Enfin, tout le système est monté sur une planchette plus grande, qui porte sur la gauche un commutateur représenté ci-après sur une plus grande échelle (fig. 704). Des pieds des quatre colonnes E, I, S, S', partent autant de lames de cuivre dont trois se rendent au commutateur, et la quatrième à une borne A, en communication avec le pôle positif de la pile.

Ces détails connus, on peut obtenir avec l'appareil trois effets : 1^o action de la bobine G seule; 2^o action de l'électro-aimant H seul; 3^o action simultanée de la bobine et de l'électro-aimant.

1^o La figure 703 représente l'appareil disposé pour le premier effet. Le courant, arrivant par la borne A, gagne la colonne S', qui le conduit à la bobine G, sur laquelle il est *gauche*, c'est-à-dire dirigé en sens contraire des aiguilles d'une montre. Puis, redescendant par la colonne S, il gagne le commutateur qui le conduit, par la lame marquée *centripète*, à la colonne E et à l'électrode *e*. Ici le courant traverse le liquide de la circonférence au centre, gagne l'électrode *i*, la colonne I et, par la lame *centrifuge*, la pièce centrale du commutateur. Celui-ci le transmet enfin à la borne négative, qui le ramène à la pile.

Le liquide prend alors un mouvement de rotation *directe*, c'est-à-dire de même sens que dans la bobine.

Si le courant, dans le liquide, est *centrifuge*, c'est-à-dire du centre à la circonférence, la rotation est *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire à celui de la bobine. Dans les deux cas, on rend la rotation apparente pour de nombreux observateurs à l'aide de petits pavillons *f*, *f'*, fixés sur des disques de liège qui plongent dans le liquide, et sont entraînés avec lui. On a soin de les noircir à la fumée d'essence de térébenthine pour empêcher l'adhérence capillaire entre les disques et les électrodes *e*, *i*.

2^o Si l'on veut expérimenter avec l'électro-aimant seul, on joint le fil positif de la pile à la borne C, et l'on réunit par un fil de cuivre les bornes D et B. Le courant passe d'abord dans l'électro-aimant H, puis gagne le commutateur par la borne B, se rend à la lame *centripète*, d'où il monte dans la colonne E, traverse le liquide dans le même sens que la première fois, redes-

cent par la colonne I, et de là au centre du commutateur et à la borne négative, qui le conduit à la pile.

Si le pôle austral de l'électro-aimant est à la hauteur du vase de verre, comme dans la figure, les courants d'Ampère (849) y sont dirigés en sens contraire à celui des aiguilles d'une montre, et les pavillons avancent alors dans la même direction que ci-dessus.

Si l'électro-aimant est soulevé jusqu'à ce que sa ligne neutre soit à la hauteur du vase, les pavillons s'arrêtent ; en l'élevant davantage, les pavillons recommencent à tourner, mais en sens contraire.

3^o Pour faire agir simultanément la bobine et l'électro-aimant, on attache le fil positif de la pile en C, et l'on joint par un conducteur les bornes D et A. Par suite, après avoir parcouru la bobine H, le courant arrive par D à la borne A, d'où il parcourt ensuite exactement le même circuit que dans la première expérience. Les effets sont donc les mêmes, seulement plus intenses, les actions de la bobine et de l'électro-aimant étant de même sens.

842. **Commutateur de Bertin.** — On a déjà vu (830) que les *commutateurs* sont de petits appareils qui servent à renverser à

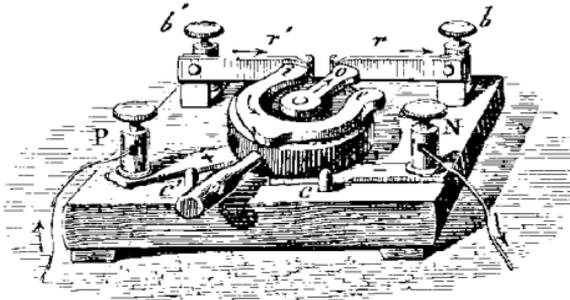


Fig. 704.

volonté le sens des courants, et à les ouvrir ou à les fermer. On en a construit un assez grand nombre ; celui de M. Bertin offre l'avantage de montrer immédiatement le sens du courant. Il consiste en une petite planchette sur laquelle est un disque de caoutchouc durci qu'on fait tourner sur un axe central à l'aide d'une poignée *m* (fig. 704), entre deux arrêts *c*, *c'*. Sur le disque sont fixées deux lames de cuivre dont l'une *o* est toujours positive, étant en communication par l'axe et par une lame + avec la borne P qui reçoit l'électrode positive de la pile ; l'autre *e*, recourbée en fer à cheval, est en communication par frottement au-dessous du disque avec une lame — qui se rend à la borne négative N. Sur le bord opposé de la planchette sont deux bornes *b*, *b'*, auxquelles sont adaptées deux lames élastiques de cuivre *r*, *r'*.

Ces détails connus, le disque étant tourné comme le montre la figure, le courant qui arrive à la borne P gagne la pièce o , la lame r et la borne b , qui, par une seconde lame ou par un fil de cuivre, le conduit à l'appareil de la figure 703 ou à tout autre. Puis, revenant à la borne b' , le courant gagne la lame r' , la pièce ie et enfin la borne N qui le ramène à la pile.

Si le disque est tourné de manière que la poignée m soit à égale distance de c et de c' , les pièces o et ie n'étant plus en contact avec les lames r , r' , le courant ne passe pas; et si m est tourné jusqu'en c , la lame o touchant r' , le courant se rend à la borne b' d'abord et revient par b ; il est donc renversé.

SOLÉNOÏDES

843. **Composition d'un solénoïde.** — On nomme *solénoïde* un système de courants circulaires égaux et parallèles, formés d'un même fil de cuivre recouvert de soie et replié sur lui-même en

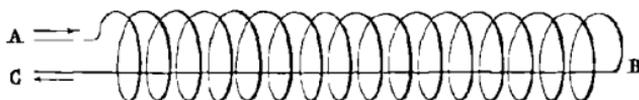


Fig. 705.

hélice, comme le montre la figure 705. Toutefois un solénoïde n'est complet qu'autant qu'une partie BC du fil est ramenée suivant l'axe dans l'intérieur de l'hélice. Avec cette disposition, lorsque le circuit est parcouru par un courant, il résulte de ce qui a été dit sur les courants sinueux (832) que l'action du solénoïde, dans le sens de la longueur AB, est compensée par celle du courant rectiligne BC. D'où, *l'effet d'un solénoïde équivaut rigoureusement à celui d'une série de courants circulaires égaux et parallèles.*

844. **Action des courants sur les solénoïdes.** — Ce qui a été dit de l'action des courants rectilignes fixes sur les courants finis, rectangulaires ou circulaires (834), s'appliquant évidemment à chacun des circuits d'un solénoïde, il en résulte qu'un courant rectiligne doit tendre à diriger ces circuits parallèlement à lui-même. Pour constater ce fait par l'expérience, on construit le solénoïde comme le montre la figure 706, de manière à pouvoir le suspendre sur l'appareil représenté dans la figure 678. Le solénoïde est alors très-mobile autour d'un axe vertical, et si l'on dirige en dessous, parallèlement à son axe, un courant rectiligne PQ, qui passe en même temps dans les fils du solénoïde, on voit celui-

ci tourner et se mettre en croix avec le courant, c'est-à-dire dans une position telle, que ses circuits se trouvent parallèles au courant fixe, et, de plus, dans la partie inférieure de chacun d'eux, le courant est de même sens que dans le fil rectiligne (834).

Si, au lieu de faire passer horizontalement un courant rectiligne au-dessous du solénoïde, on le fait passer verticalement sur le

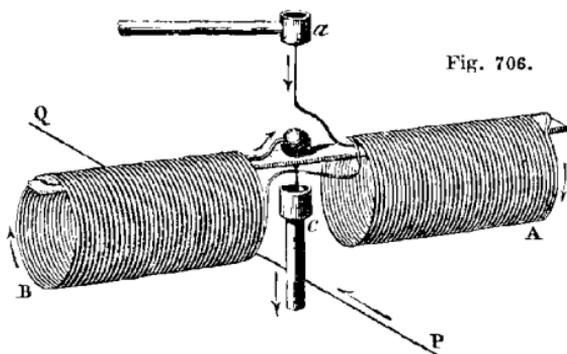


Fig. 706.

côté, on observe une attraction ou une répulsion, suivant que, dans le fil vertical et dans la partie du solénoïde la plus voisine, les deux courants sont de même sens ou de sens contraires (830).

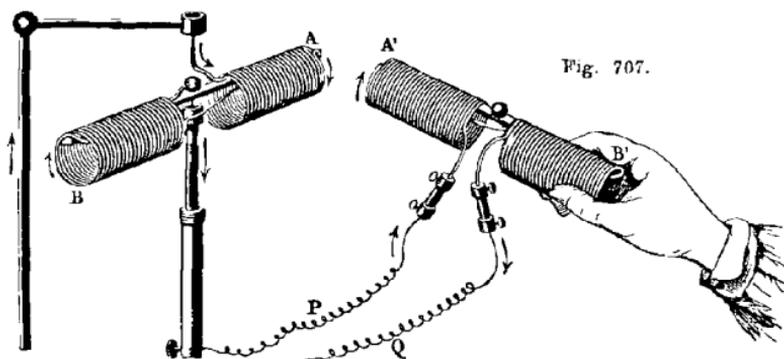
845. Action directrice de la terre sur les solénoïdes. — Si l'on pose sur l'appareil de la figure 678 le solénoïde à suspension ci-dessus, et qu'on le dirige d'abord hors du méridien magnétique, on observe qu'aussitôt qu'un courant assez énergique passe dans le solénoïde, celui-ci entre en mouvement et s'arrête dans une direction telle, que son axe est parallèle à la direction de l'aiguille de déclinaison (665). De plus, dans la partie inférieure de ses circuits, le courant est dirigé de l'est à l'ouest.

Dans cette expérience, le solénoïde se dirigeant, sous l'influence du magnétisme terrestre, comme une aiguille aimantée, on nomme *pôle austral*, de même que dans les aimants, l'extrémité qui se dirige vers le nord, et *pôle boréal* celle qui se dirige vers le sud. On verra ci-après (850) comment Ampère a expliqué l'action directrice de la terre sur les solénoïdes.

846. Action mutuelle des aimants et des solénoïdes. — On observe entre les solénoïdes et les aimants identiquement les mêmes phénomènes d'attraction et de répulsion qu'entre les aimants. En effet, si l'on présente à un solénoïde mobile et parcouru par un courant un des pôles d'un fort barreau aimanté, il y a répulsion ou attraction, suivant que les pôles de l'aimant et du solénoïde mis en présence sont de même nom ou de noms contraires.

Réciproquement, le même phénomène a lieu si l'on présente à une aiguille aimantée mobile un solénoïde qu'on tient à la main, tandis qu'il est traversé par un courant. La loi des attractions et des répulsions des aimants (654) s'applique donc exactement aux actions mutuelles entre les solénoïdes et les aimants.

847. Actions mutuelles des solénoïdes. — Lorsqu'on fait agir l'un sur l'autre deux solénoïdes parcourus par un courant assez



puissant, l'un qu'on tient à la main, l'autre mobile autour d'un axe vertical (fig. 707), on observe, entre les extrémités de ces deux solénoïdes, des phénomènes d'attraction et de répulsion identiques avec ceux que présentent entre eux les pôles des aimants; ces phénomènes s'expliquent par la direction relative des courants dans les extrémités mises en présence (830).

Ampère a trouvé par le calcul que les attractions et les répulsions entre les pôles de deux solénoïdes sont en raison inverse du carré de la distance.

848. Théorie d'Ampère sur le magnétisme. — Se fondant sur l'analogie qui existe entre les solénoïdes et les aimants, Ampère a donné une théorie à l'aide de laquelle les phénomènes magnétiques rentrent dans le domaine de l'électro-dynamique.

On a déjà vu qu'au lieu d'attribuer les phénomènes magnétiques à l'existence de deux fluides spéciaux (656), Ampère les a attribués à des courants circulaires préexistants autour des molécules des substances magnétiques. Quand ces substances ne sont pas aimantées, les courants moléculaires ont lieu dans toutes les directions, et la résultante de leurs actions électro-dynamiques est nulle; mais sous l'influence d'un aimant ou d'un courant puissant, ces courants s'orientent de manière à être non-seulement de même sens et dans des plans parallèles, mais à ce que leurs centres soient disposés en séries linéaires parallèles à l'axe du barreau qu'on

aimante, en sorte que celui-ci devient un véritable *faisceau de solénoïdes*, dont l'ensemble agit comme un solénoïde unique.

En effet, à l'inspection de la figure 708, dans laquelle les courants moléculaires sont représentés par une suite de petits cercles intérieurs dans les deux extrémités d'un barreau aimanté en fer à cheval, on reconnaît que dans les parties contiguës les courants sont de directions opposées, et se neutralisent. Or il n'en est plus ainsi à la sur-

face; là, les courants moléculaires en *a*, en *b*, en *c*, n'étant pas neutralisés par d'autres courants, et les points *a*, *b*, *c*... étant infiniment rapprochés, il en résulte une série d'éléments dynamiques de même sens, qui s'ajoutent

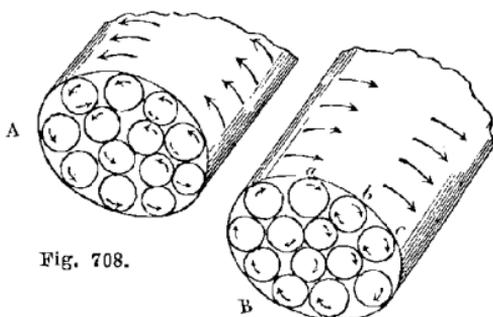


Fig. 708.

pour donner un courant circulaire unique à la surface du barreau. Or le même effet se produisant dans chaque section du barreau perpendiculaire à l'axe, il est bien un solénoïde complet.

Malgré l'identité entre les solénoïdes et les aimants, on remarque cette différence que, dans les premiers, les pôles sont aux extrémités mêmes, tandis que, dans les aimants, ils en sont à une certaine distance, qui augmente avec le diamètre des barreaux. En effet, dans un solénoïde proprement dit, qui est simple, la position des pôles est fixe et aux extrémités; mais dans les barreaux aimantés, qui sont des faisceaux de solénoïdes, ces derniers sont rectilignes dans la partie centrale, tandis que les solénoïdes placés près de la surface, repoussés par ceux du centre surtout à leurs pôles, se courbent en présentant leur convexité vers l'axe du barreau. Leurs pôles se rapprochant ainsi de la partie médiane de l'aimant, il en est de même des pôles de celui-ci, puisqu'ils ne sont autre chose que le point d'application de la résultante de toutes les forces appliquées aux pôles des solénoïdes.

849. **Direction des courants d'Ampère dans les aimants.** — Pour reconnaître dans quel sens sont dirigés les courants dans les aimants, soit le solénoïde à suspension de la figure 706 parcouru par un courant, et en équilibre dans le méridien magnétique, le pôle austral A dirigé vers le nord. D'après l'action directrice que la terre exerce sur les courants fermés (853), le courant, dans la

partie inférieure de chaque spire, est dirigé de l'est à l'ouest, ou, ce qui revient au même, de gauche à droite, pour l'observateur qui, placé dans le prolongement de l'axe du solénoïde, en regarde le pôle austral. S'il regarde le pôle boréal, c'est l'inverse qui a lieu : le courant, dans la partie inférieure de chaque spire, est alors dirigé de droite à gauche.

Par conséquent, tout aimant étant un solénoïde, on peut dire, avec Faraday, qu'à l'extrémité sud d'un aimant, c'est-à-dire au pôle boréal, les courants d'Ampère sont dirigés dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, et en sens contraire, au pôle austral, c'est-à-dire à l'extrémité qui regarde le nord.

850. **Courant terrestre.** — Pour compléter sa théorie sur les aimants, et expliquer le magnétisme terrestre, Ampère a admis l'existence de courants électriques circulant autour de notre globe, de l'est à l'ouest, perpendiculairement, en chaque lieu, au méridien magnétique. Ces courants, s'ajoutant, équivalent à un courant résultant unique, dirigé de l'est à l'ouest et parcourant l'équateur magnétique. Quant à leur nature, ce seraient des courants thermo-électriques dus aux variations de température qui résultent de la présence successive du soleil sur la surface du globe, de l'orient vers l'occident.

Ce sont ces courants qui dirigent les aiguilles des boussoles et les solénoïdes, et qui agissent sur les courants horizontaux et verticaux, comme on va le voir ci-après (851 et 852).

ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS

851. **Action directrice de la terre sur les courants verticaux.** — Le courant terrestre qui exerce une action directrice sur les aimants et sur les solénoïdes (845) agit aussi sur les courants, en leur imprimant tantôt une direction déterminée, tantôt un mouvement de rotation continu, suivant que ces courants sont disposés dans une direction verticale ou horizontale.

La première de ces deux actions, celle qui a pour effet de diriger les courants, peut se formuler ainsi : *Tout courant vertical, mobile autour d'un axe qui lui est parallèle, vient se placer, sous l'influence de l'action directrice de la terre, dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, et s'arrête, après quelques oscillations, à l'est de son axe de rotation, lorsqu'il est descendant, et à l'ouest, quand il est ascendant.*

Ce fait se constate au moyen d'un appareil formé de deux vases de cuivre rouge *a* et *K* (fig. 709), d'inégales grandeurs. Le plus grand, *a*, qui a environ 30 centimètres de diamètre, est percé à

son centre d'une ouverture au milieu de laquelle s'élève une colonne de laiton *b*, isolée du vase *a*, mais communiquant avec le vase *K*. Elle se termine par un godet dans lequel repose, par un pivot, une tige légère de bois. A l'une des extrémités de cette tige s'enroule un fil fin de platine *ce*, dont chaque bout plonge dans de l'eau acidulée qui remplit les deux vases.

Le courant d'une pile arrivant par le fil *m*, comme le montre la

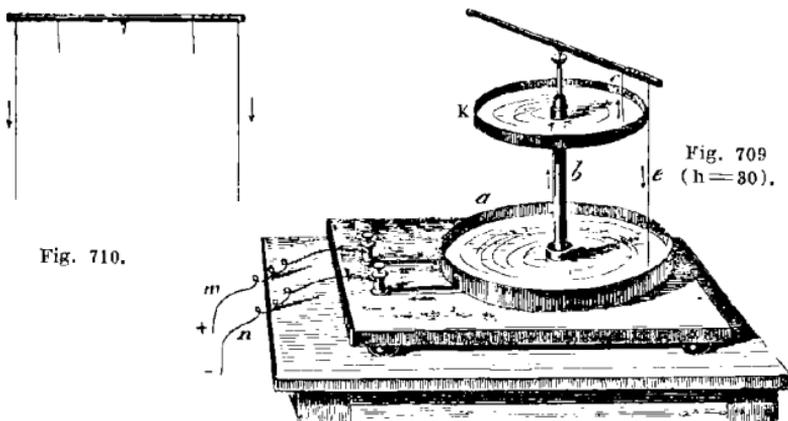


Fig. 710.

direction des flèches dans le dessin, passe dans une lame de cuivre qui, par-dessous la planchette de bois qui porte tout l'appareil, va se souder au pied de la colonne *b*. S'élevant alors dans cette colonne, le courant gagne le vase *K* et l'eau acidulée qu'il contient; de là il monte dans le fil *c*, redescend par le fil *e*, et se rendant aux parois du vase *a* au travers de l'eau acidulée que celui-ci contient, il atteint le fil *n*, qui le ramène à la pile. Le courant se trouvant ainsi fermé, on voit le fil *e* se mouvoir autour de la colonne *b* et s'arrêter à l'est de cette colonne, lorsqu'il est descendant, comme cela a lieu dans le dessin; mais s'il est ascendant, ce qu'on obtient en faisant arriver le courant de la pile par le fil *n*, le fil *e* s'arrête à l'ouest dans une position diamétralement opposée à celle qu'il prend lorsqu'il est descendant.

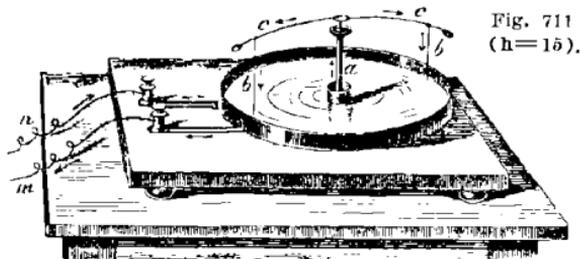
Si à la tige à un seul fil de la figure 709 on substitue celle à deux fils de la figure 710, cette tige ne se dirige plus; car chaque fil tendant à se placer à l'est de la colonne *b*, il se produit deux effets égaux et de directions contraires, qui se font équilibre.

Dans l'hypothèse du courant terrestre, ces phénomènes s'expliquent par l'action d'un courant indéfini sur un courant perpendiculaire à sa direction (833).

852. **Action de la terre sur les courants horizontaux mobiles au-**

tour d'un axe vertical. — L'action de la terre sur les courants horizontaux ne consiste plus à les diriger, mais à leur imprimer un mouvement de rotation continu de l'est à l'ouest, en passant par le nord, quand le courant horizontal s'éloigne de l'axe de rotation, et de l'ouest à l'est, quand il s'en rapproche.

Cette action sur les courants horizontaux se démontre au moyen



de l'appareil représenté dans la figure 711, lequel ne diffère de celui de la figure 709 que parce qu'il n'a qu'un seul vase. Le courant montant par la colonne *a* passe dans les deux fils *cc* et descend par les fils *bb*, d'où il revient à la pile. C'est alors que le circuit *bccb* se met à tourner d'un mouvement continu, de l'est à l'ouest ou de l'ouest à l'est, suivant que dans les fils *cc* le courant s'écarte du centre, comme cela a lieu dans le dessin, ou suivant qu'il s'en rapproche, ce qu'on obtient en faisant arriver le courant de la pile par le fil *m*, au lieu de le faire arriver par le fil *n*.

Or on a vu (851) que l'action de la terre sur les fils verticaux *bb* est détruite; c'est donc bien par son action sur les branches horizontales *cc* que la rotation se produit.

Cette action rotative du courant terrestre sur les courants horizontaux est la conséquence de la rotation d'un courant horizontal fini par un courant horizontal indéfini (835).

853. Action directrice de la terre sur les courants fermés, mobiles autour d'un axe vertical. — Si le circuit sur lequel agit la terre est fermé, qu'il soit rectangulaire ou circulaire, ce n'est plus un mouvement de rotation continu qui se produit, mais une action directrice comme dans le cas des courants verticaux (851), en vertu de laquelle le courant vient se placer dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, de manière qu'il soit descendant à l'est de son axe de rotation, pour un observateur qui regarde le nord, et ascendant à l'ouest.

Cette propriété est une conséquence de ce qui a été dit sur les courants horizontaux et sur les courants verticaux. En effet, il en découle que, dans le circuit fermé (fig. 712), le courant, dans les

parties supérieure et inférieure, tend à tourner en sens contraires, d'après la loi des courants horizontaux (852), et que par conséquent il y a équilibre; tandis que, dans les parties latérales, le courant tend à se placer d'un côté à l'est, de l'autre à l'ouest, d'après la loi des courants verticaux (851).

C'est cette action directrice de la terre sur les courants circulaires qui, répétée sur chacune des spires des solénoïdes, dirige l'axe de ceux-ci suivant le méridien magnétique (845).

854. Courants astatiques. — Dans les expériences d'électro-dynamique, il est nécessaire de soustraire les circuits mobiles à

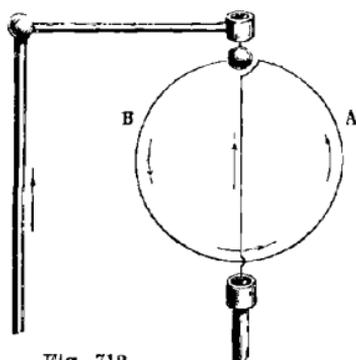


Fig. 712.

l'action directrice de la terre. Pour cela, on leur donne une forme symétrique des deux côtés de leur axe de suspension, de manière que les actions directrices de la terre sur les deux parties du circuit tendent à les faire tourner en sens contraires, et, par suite, se détruisent. Cette condition est remplie dans les circuits représentés dans les figures 681 et 682. C'est pourquoi on donne aux courants qui les parcourent le nom de *courants astatiques*.

CHAPITRE IX

AIMANTATION PAR LES COURANTS, ÉLECTRO-AIMANTS, TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES

855. Aimantation par les courants. — D'après l'influence que les courants exercent sur les aimants, en tournant le pôle austral à gauche et le pôle boréal à droite (796), il est naturel de penser qu'en agissant sur les substances magnétiques à l'état neutre, les courants doivent tendre à orienter les courants d'Ampère. On observe, en effet, qu'en plongeant un fil de cuivre parcouru par un courant dans de la limaille de fer, celle-ci s'y attache abondamment, et retombe aussitôt que le courant cesse, tandis que l'action est nulle sur la limaille de tout autre métal non magnétique.

L'action des courants sur les substances magnétiques est surtout sensible quand on enroule en hélice, comme l'a fait Ampère, un fil de cuivre recouvert de soie autour d'un tube de verre, et qu'on place dans celui-ci un barreau d'acier non aimanté. On ob-

serve qu'il suffit qu'un courant traverse le fil, même instantanément, pour que le barreau soit fortement aimanté.

Si, au lieu de faire traverser le fil par le courant de la pile, on y fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde, en mettant en communication l'un des bouts avec l'armature extérieure, et l'autre avec l'armature intérieure, on trouve encore que le barreau s'aimante. On peut donc aimanter également par l'électricité voltaïque et par l'électricité des machines.

L'enroulement du fil peut avoir lieu de gauche à droite en dessus, et alors on a une *hélice dextrorsum* (fig. 713); s'il se fait de

Fig. 713.

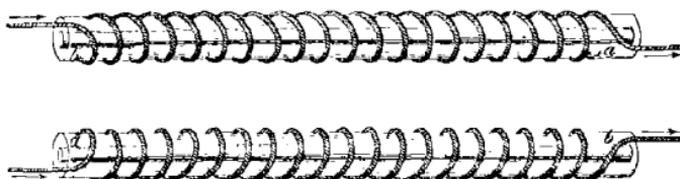


Fig. 714.

gauche à droite en dessous, on a une *hélice sinistrorsum* (fig. 714). Dans la première, le pôle boréal du barreau est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant; c'est le contraire qui a lieu dans l'hélice sinistrorsum.

La nature du tube sur lequel s'enroule l'hélice n'est pas sans influence. Le bois et le verre sont sans effet; mais un cylindre de cuivre épais peut détruire complètement l'effet du courant. Il en est de même avec le fer, l'argent et l'étain. On verra que ce phénomène est dû à des courants d'induction qui sont développés dans le métal sur lequel est enroulée l'hélice (883).

Du reste, pour aimanter un barreau d'acier par l'électricité, il n'est pas nécessaire de le placer dans un tube, comme le montrent les figures 713 et 714. Il suffit de l'entourer, dans toute sa longueur, d'un fil de cuivre recouvert de soie, afin d'isoler les uns des autres les circuits du fil; puis de faire passer le courant.

Un barreau d'acier acquiert ainsi, avec un courant assez puissant, une intensité magnétique très-grande, laquelle persiste après le passage du courant, en décroissant toutefois lentement jusqu'à ce que le barreau arrive à un état de saturation stable (672).

836. **Électro-aimants.** — On nomme *électro-aimants* des barreaux de fer doux, sur lesquels s'enroule un grand nombre de fois, en hélices superposées, un fil de cuivre recouvert de soie. De même que dans les hélices ci-dessus, dès qu'un courant parcourt

le fil, le barreau s'aimante fortement et reste aimanté tout le temps que le courant passe; mais la force coercitive du fer doux étant nulle (659), aussitôt que le courant est interrompu, toute aimantation disparaît. Toutefois, si le fer n'est pas parfaitement pur, il conserve des traces d'aimantation plus ou moins sensibles.

Les hélices superposées qui s'enroulent autour d'un électro-aimant sont alternativement dextrorsum et sinistrorsum; mais le courant s'y propageant en sens contraires de deux en deux, toutes concourent pour développer respectivement un pôle austral à une même extrémité de la bobine magnétisante et un pôle boréal à l'autre.

Lorsque les électro-aimants sont rectilignes, on enroule le fil dans toute la longueur des barreaux; ou seulement aux extrémités, en deux bobines distinctes, le fil allant de l'une à l'autre et s'enroulant dans le même sens;

ou bien les barreaux sont recourbés en fer à cheval (fig. 715). Le fil s'enroule alors seulement sur les deux branches, en deux bobines A et B, de manière que chacune soit la continuation de l'autre, afin que les extrémités possèdent deux pôles de noms contraires.

On construit aussi des électro-aimants de trois pièces : deux bobines, l'une dextrorsum, l'autre sinistrorsum, enroulées chacune autour d'un noyau de fer doux, et une armature de même métal, qui relie entre eux les deux noyaux à l'aide de fortes vis. Ce sont des électro-aimants de cette sorte qui sont représentés ci-après dans les figures 722 et 726. Ces électro-aimants sont plus faciles à construire que ceux d'une seule pièce, et sont aussi puissants.

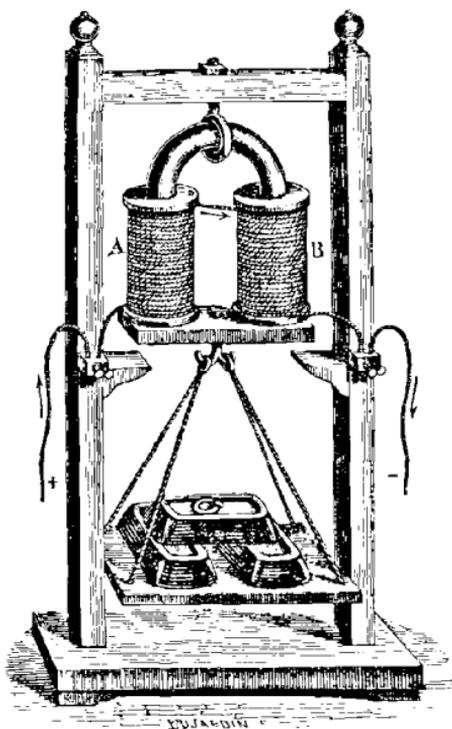


Fig. 715.

La puissance d'un électro-aimant dépend : 1^o de l'intensité du courant; 2^o du nombre des tours du fil; 3^o du diamètre du cylindre de fer sur lequel sont enroulées les bobines.

Lenz et Jacobi ont donné sur les électro-aimants les lois suivantes, qui ne sont qu'approchées :

1^o *La puissance d'un électro-aimant est proportionnelle à l'intensité du courant.*

2^o *Elle est proportionnelle au nombre des tours de l'hélice magnétisante.*

3^o *Elle est proportionnelle à la racine carrée du diamètre du barreau.*

La première et la deuxième loi ont une limite; car le barreau, en s'aimantant davantage, approche de plus en plus d'un état de saturation (672) au delà duquel la force de l'aimant reste constante, quoique l'intensité du courant et le nombre des tours du fil augmentent.

Une seconde cause limite encore la deuxième loi, c'est que les spires de l'hélice, en s'enroulant les unes sur les autres, s'écartent du fer, et que par suite leur action magnétisante décroît.

Le calcul fait voir que la troisième loi n'est plus applicable quand le courant est très-intense, parce qu'alors la puissance de l'électro-aimant croît beaucoup plus vite que la racine carrée du diamètre du fer.

On a aussi cherché l'influence de la longueur du barreau, mais les expériences ont été peu concordantes. Cependant on peut dire que la longueur est sans influence dans les électro-aimants en fer à cheval, mais que dans les électro-aimants droits, la puissance augmente, jusqu'à une certaine limite, avec la longueur.

Enfin, le calcul et l'expérience montrent que, *pour obtenir le maximum d'effet d'un électro-aimant, la résistance de la bobine doit égaler la somme totale des résistances extérieures.* Il importe donc de combiner la longueur et le diamètre du fil de façon que cette condition soit satisfaite. Si le circuit extérieur présente une grande résistance, comme dans les lignes télégraphiques, on fera usage d'un fil fin et très-long; ce sera l'inverse si la résistance extérieure est faible.

On verra bientôt les applications qu'on a faites des électro-aimants dans les télégraphes électriques, dans les moteurs électromagnétiques et dans l'étude des phénomènes diamagnétiques.

857. Magnétisme rémanent. — On nomme *magnétisme rémanent* une aimantation faible que conserve souvent le fer des électro-aimants après la rupture du courant. En effet, si le fer n'est pas parfaitement pur, on a vu qu'il est doué d'une certaine force

coercitive (659), et c'est celle-ci qui donne lieu à l'aimantation qui persiste après le passage du courant.

Toutefois le magnétisme rémanent se manifeste aussi dans le fer parfaitement pur d'un électro-aimant; c'est lorsque celui-ci est en contact avec son armature. Dans ce cas, l'armature étant aimantée par influence, ses deux pôles, au moment de la rupture du courant, réagissent sur le fer de l'électro-aimant pour y maintenir deux pôles de noms contraires; de là une aimantation qui persiste ensuite tant que dure le contact, et cesse avec lui.

Dans les appareils où les électro-aimants fonctionnent par intermittences, le magnétisme rémanent produit un effet nuisible. Pour l'éviter, on est obligé de ne pas laisser s'établir un contact parfait entre les électro-aimants et leurs armatures.

* 858. **Mouvements vibratoires et sons produits pendant l'aimantation.** — Lorsqu'une tige de fer doux s'aimante par l'influence d'un fort courant électrique, elle rend un son très-prononcé, qui varie suivant que la tige est plus ou moins allongée, mais qui ne se produit qu'à l'instant où le courant est fermé et à l'instant où il est interrompu. Ce phénomène, qui a d'abord été observé par Page, puis par Delezenne, a surtout été étudié par de la Rive, qui l'attribue à un mouvement vibratoire des molécules du fer par l'effet d'une succession rapide d'aimantations et de désaimantations.

En interrompant et en rétablissant le courant à des intervalles très-rapprochés, ce savant a observé que, quelles que soient la forme et la grandeur des tiges de fer doux, on distingue toujours deux sons : l'un, qui est musical, correspond à celui que donnerait la barre en vibrant transversalement; l'autre, qui consiste en une suite de coups secs, correspondant aux alternatives du courant, est comparé par de la Rive au bruit de la pluie tombant sur un toit de métal. Le son le plus éclatant, dit-il, est celui qu'on obtient en tendant, sur une table d'harmonie, des fils de fer doux de 1 à 2 millimètres de diamètre, bien recuits et longs de 1 à 2 mètres. Ces fils, étant placés dans l'axe d'une ou plusieurs bobines traversées par des courants puissants, produisent un ensemble de sons dont l'effet est surprenant et ressemble beaucoup à celui de plusieurs cloches d'église vibrant ensemble dans le lointain.

De la Rive a encore obtenu les mêmes sons en faisant passer le courant discontinu, non plus dans des bobines entourant des fils de fer, mais dans les fils de fer eux-mêmes. Le son musical est même alors plus fort et plus sonore que dans la première expérience.

L'hypothèse d'un mouvement moléculaire dans les fils de fer, au moment de leur aimantation et de leur désaimantation, est confirmée par les recherches de Wertheim, qui a trouvé que les fils perdent de leur élasticité, et par celles de M. Joule, qui a constaté que le diamètre des fils diminue, mais que leur longueur augmente.

TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES

859. **Principe général des télégraphes électriques.** — Les *télégraphes électriques* sont des appareils qui servent à transmettre des signaux à de grandes distances, au moyen de courants qui se propagent dans de longs fils métalliques. Dès le siècle dernier, plusieurs physiciens avaient proposé de correspondre à distance au

moyen de l'électricité des machines électriques, lorsqu'elle se propage dans des fils conducteurs isolés.

En 1811, Sømmering imagina un télégraphe fondé sur l'emploi, comme moyen indicateur, de la décomposition de l'eau par la pile. En 1820, à une époque où l'électro-aimant n'était pas connu, Ampère, s'appuyant sur l'expérience d'Oersted (796), proposa de correspondre au moyen d'aiguilles aimantées au-dessus desquelles on dirigerait un courant, en faisant usage d'autant d'aiguilles et de fils qu'il y a de lettres. En 1837, Steinheil, à Munich, et Wheatstone, à Londres, construisaient des télégraphes à plusieurs fils agissant chacun sur une aiguille aimantée, la source du courant étant un appareil électro-magnétique de Clarke, ou une pile. Mais le télégraphe électrique ne pouvait acquérir toute la simplicité qu'il a aujourd'hui que par l'emploi d'électro-aimants. C'est ce système qu'adopta Wheatstone en 1840.

On a varié beaucoup la forme des télégraphes électriques, mais on peut tous les rapporter aux trois suivants : le *télégraphe à cadran*, le *télégraphe imprimant* et le *télégraphe électro-chimique*, fondés tous sur le même principe : la transmission, par intermittences, d'un courant à un électro-aimant plus ou moins éloigné. Lorsque le courant passe dans l'électro-aimant, celui-ci attire une armature de fer doux, qui, par un ressort antagoniste, revient à sa position première toutes les fois que le courant ne passe plus. On transmet ainsi à volonté, à de grandes distances et avec une extrême vitesse, un mouvement de va-et-vient à l'armature de l'électro-aimant. C'est ensuite le mouvement de cette armature qui se transmet à d'autres pièces pour faire marcher une aiguille sur un cadran, ou pour tracer les dépêches sur une bande de papier.

860. **Parties constituantes d'un télégraphe électrique.** — Les parties essentielles de tout télégraphe électrique sont : 1^o la *pile*, qui engendre le courant ; 2^o le *fil de ligne*, qui le transmet d'une station à l'autre ; 3^o le *manipulateur*, qui règle les intermittences du courant à la station de départ ; 4^o le *récepteur*, qui enregistre les dépêches à la station d'arrivée.

Les piles étant déjà décrites, nous passons au fil de ligne.

861. **Fil de ligne.** — On distingue les lignes *aériennes*, *souterraines* et *sous-marines*.

La ligne aérienne consiste en un fil de fer galvanisé qui unit entre elles les stations télégraphiques. Ce fil, qui a 4 millimètres de diamètre, est isolé sur des supports de porcelaine fixés eux-mêmes à des poteaux de sapin (fig. 716).

La ligne souterraine est formée d'un fil de fer semblable, mais

recouvert d'un enduit de gutta-percha ou de bitume, qui l'isole du sol dans lequel il est enfoui.

La ligne sous-marine est destinée à relier entre eux les continents, par exemple l'Europe à l'Amérique à travers l'Océan. On ne fait plus ici usage d'un simple fil, mais d'un véritable câble possédant une grande solidité. Il est formé de trois parties : le conducteur, l'enveloppe isolante et l'armature protectrice. Le conducteur, ou *âme du câble*, est un faisceau de 7 fils de cuivre rouge, de 1 millimètre de diamètre chacun et tordus ensemble. Autour de ce faisceau

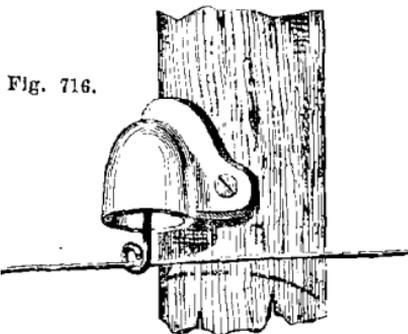


Fig. 716.

est l'enveloppe isolante, qui consiste en quatre couches de gutta-percha ou de caoutchouc, alternant avec un nombre égal de couches d'un enduit formé d'un mélange de sciure de bois, de résine de goudron et de gutta-percha, appliqué à chaud. Enfin, sur l'enveloppe isolante on ajoute une couche de filin goudronné, et sur celui-ci un revêtement de 10 fils d'acier de 2 millimètres de diamètre, garnis eux-mêmes de chanvre goudronné, qui les protège contre l'action corrosive de l'eau de mer. Les fils d'acier s'enroulent en hélice très-allongée sur l'enveloppe isolante, comme

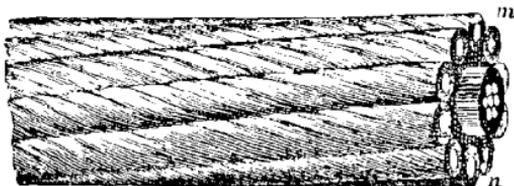


Fig. 717.



Fig. 718.

on le voit dans la figure 717, qui représente le câble dans le sens de sa longueur, tandis que la figure 718 en donne une coupe transversale, qui, en vraie grandeur, a 26 millimètres de diamètre. Son poids est de 620 kilogrammes par kilomètre. C'est un câble semblable qui, posé en 1869, unit Brest à Saint-Pierre, dans l'île de Terre-Neuve.

Dans tous ces systèmes de lignes, on fixe au pôle négatif de la pile, à la station de départ, un fil de cuivre terminé par une plaque de même métal, qu'on fait plonger dans l'eau d'un puits. Le pôle positif communiquant avec le fil de ligne, celui-ci, à la

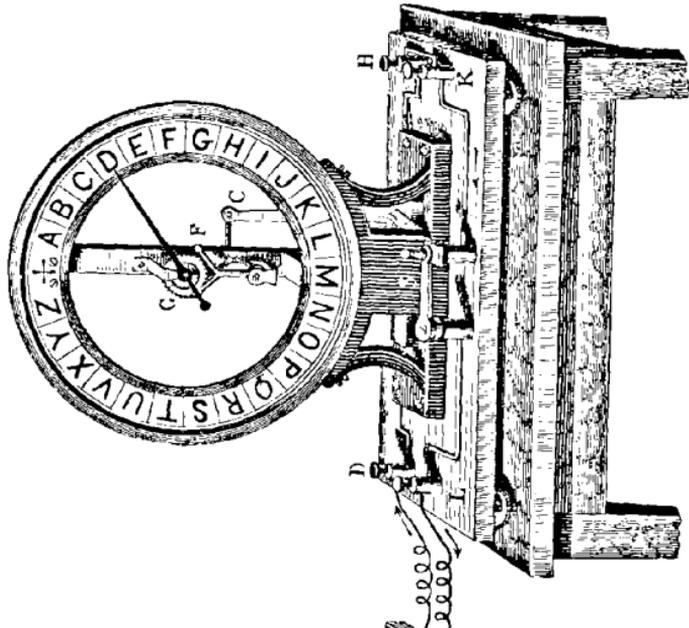


Fig. 720.

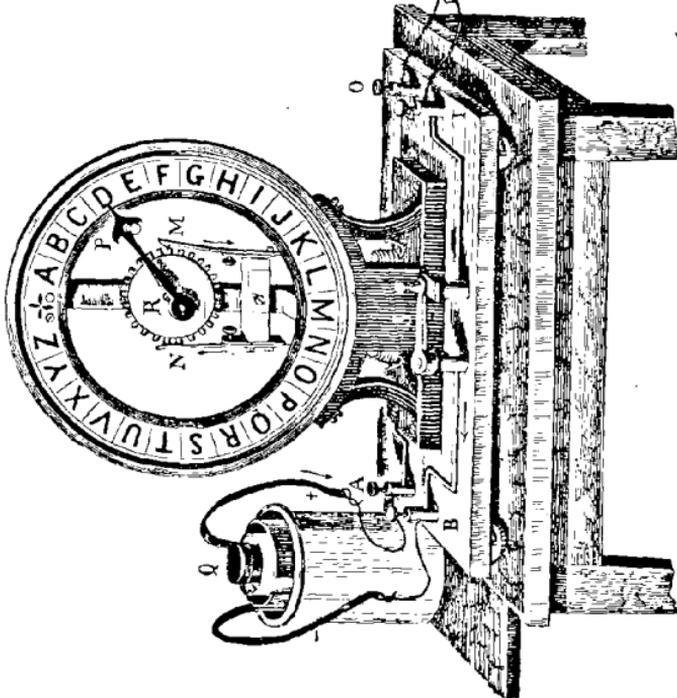


Fig. 719.

station d'arrivée, se termine par une plaque semblable à la première et plongeant aussi dans l'eau d'un puits. Les deux électricités s'écoulant ainsi dans le sol, comme réservoir commun, il se produit dans le fil de ligne la même circulation électrique que si le circuit était fermé par un fil de retour. Cette disposition offre donc le double avantage d'éviter l'emploi de ce fil, et de rendre la résistance deux fois moindre.

Les manipulateurs et les récepteurs variant dans les différents télégraphes, la description de chacun d'eux va se trouver dans celle du télégraphe correspondant.

862. **Télégraphe à cadran ou à lettres.** — Il existe plusieurs sortes de télégraphes à cadran. Celui qui est représenté dans les figures 719 et 720 est destiné à la démonstration; mais son principe est le même que celui des télégraphes électriques établis le long des voies de fer. La figure 719 en représente le manipulateur, et la figure 720 le récepteur. Le premier appareil communique avec une pile à charbon Q, et les deux appareils sont en communication par deux fils métalliques, qui vont, l'un, AOD (fig. 719), de la station de départ à la station d'arrivée, et l'autre, HKLI (fig. 720), de celle-ci à la première. Enfin, les deux appareils sont munis chacun d'un cadran portant les 25 lettres de l'alphabet, sur lequel se meut une aiguille. C'est la main de l'expérimentateur qui fait tourner l'aiguille de la station de départ; mais c'est l'électricité qui fait marcher celle de la station d'arrivée.

De la pile le courant se rend par un fil de cuivre A (fig. 719) à une lame de laiton N en contact avec une roue métallique R, passe dans une seconde lame M, puis dans le fil O, qui joint l'autre station. Là, le courant se rend dans la bobine d'un électro-aimant *b*, masqué dans la figure 720, mais représenté à part dans la figure 721, qui montre la partie postérieure de l'appareil. Cet électro-aimant est fixé horizontalement à une extrémité, et à l'autre il attire une armature de fer doux *a*, qui fait partie d'un levier coudé mobile autour de son point d'appui *o*, tandis qu'un ressort à boudin *r* sollicite le même levier en sens contraire.

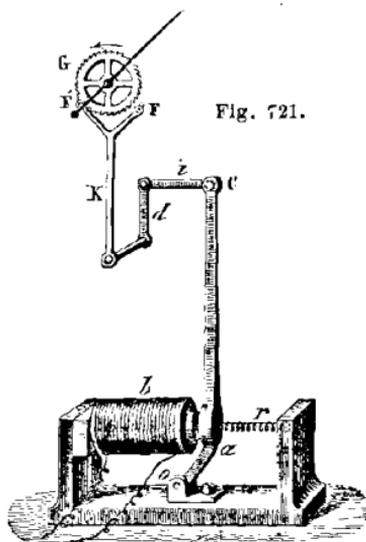


Fig. 721.

Lorsque le courant passe, l'électro-aimant attire le levier aC , qui, par une tige i , vient agir sur un second levier d , fixé à un axe horizontal, lié lui-même à une fourchette FF' . Lorsque le courant est interrompu, le ressort r ramène le levier aC , et avec lui toutes les pièces qui en dépendent; de là résulte un mouvement de va-et-vient qui se communique à la fourchette, laquelle le transmet à une roue à rochet G , qui a 26 dents et dont l'axe porte l'aiguille indicatrice. D'après l'inclinaison de ses dents, à chaque oscillation double du levier aC , la roue G est entraînée d'une dent, toujours dans le même sens, par une des branches de la fourchette au moyen de boulons qui s'engagent dans les dents.

Pour se rendre compte des intermittences de l'électro-aimant, il faut se porter à la figure 719. La roue R porte 26 dents, dont 25 correspondent aux lettres de l'alphabet, et la dernière à un intervalle réservé entre les lettres A et Z . Quand, tenant le bouton P à la main, on fait tourner la roue R , l'extrémité de la lame N , d'après sa courbure, est toujours en contact avec les dents; la lame M , au contraire, se termine par une came taillée de manière qu'il y a successivement contact et solution de continuité. Par conséquent, les communications avec la pile étant établies, si l'on fait avancer l'aiguille P de 4 lettres, par exemple, le courant passe quatre fois de N en Q , et quatre fois il est interrompu. L'électro-aimant de la station d'arrivée devient donc quatre fois attractif, et quatre fois il cesse de l'être. Donc la roue G a tourné de 4 dents, et comme chaque dent correspond à une lettre, l'aiguille de la station d'arrivée marche exactement d'un même nombre de lettres que celle de la station de départ. La pièce S , dans les deux figures, est une lame de cuivre, mobile sur une charnière, et servant à interrompre ou à fermer le courant.

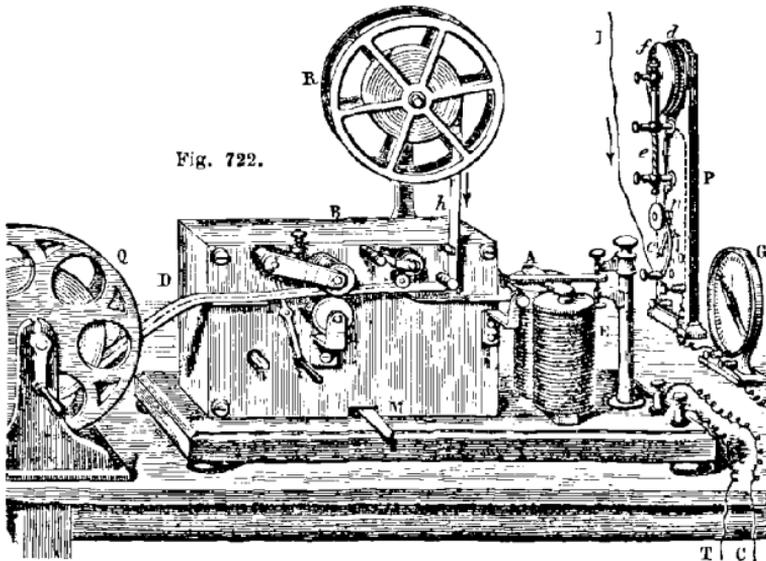
D'après ce qui précède, il est facile de se rendre compte comment on correspond d'un lieu à un autre. Supposons, par exemple, que le premier appareil (fig. 719) étant à Paris, le second au Havre, et la communication entre les deux stations étant établie par deux fils métalliques, on veuille transmettre dans la dernière ville le mot SIGNAL. Les aiguilles correspondant, sur chaque appareil, à l'intervalle réservé entre les lettres A et Z , la personne qui envoie la dépêche fait avancer l'aiguille P jusqu'à la lettre S , où elle l'arrête pendant un temps très-court; l'aiguille de l'appareil qui est au Havre, reproduisant fidèlement les mouvements de l'aiguille de Paris, s'arrête à la même lettre, et alors la personne qui reçoit la dépêche note cette lettre. Celle qui est à Paris, continuant à tourner toujours dans le même sens, arrête l'aiguille à la lettre I , instantanément la seconde aiguille se fixe devant la

même lettre; continuant de la même manière pour les lettres G, N, A, L, tout le mot est bientôt transmis au Havre.

Pour appeler l'attention de celui à qui l'on écrit, on adapte à la station d'arrivée une sonnerie qui doit être introduite dans le courant toutes les fois que la correspondance est suspendue. Une détente, mue par un électro-aimant, fait partir cette sonnerie aussitôt que le courant passe, ce qui donne le signal qu'une dépêche va être transmise. Cette sonnerie sera décrite ci-après (869). Enfin, chaque station est pourvue des deux appareils ci-dessus.

863. **Télégraphe électrique écrivant de Morse.** — On a imaginé un assez grand nombre de télégraphes électriques écrivants ou imprimants. Celui qu'a inventé Morse, à New-York, en 1837, fut d'abord adopté dans l'Amérique du Nord, puis successivement dans toute l'Europe. Comme tous les télégraphes électriques, celui de Morse se compose de deux appareils distincts, le *manipulateur* et le *récepteur*, réunis par un fil métallique qui conduit le courant d'une pile, du premier appareil au second.

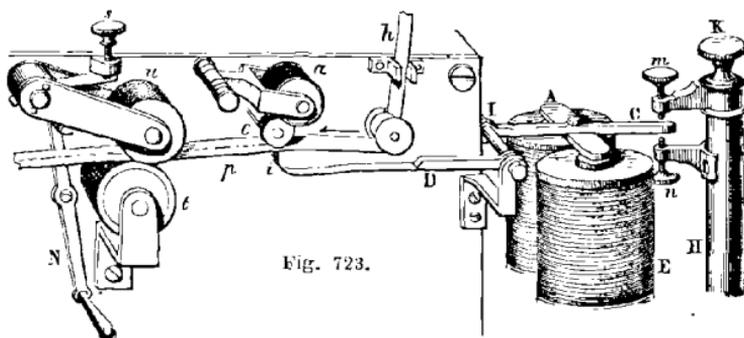
864. **Récepteur de Morse.** — Cet appareil est muni d'un mou-



vement d'horlogerie, renfermé dans une boîte BD (fig. 722). Au-dessus est un rouet R, sur lequel s'enroule une longue bande de papier *h*; celle-ci, prise comme dans un laminoir par deux cylindres que fait marcher le mouvement d'horlogerie, est entraînée dans le sens des flèches sur un second rouet Q, qu'on fait tourner avec la main gauche à l'aide d'une manivelle. Sur la droite

de la boîte est un électro-aimant *E*, dans lequel passe le courant qui vient du poste attaquant. Enfin, la paroi antérieure de la boîte porte différents organes destinés à écrire les dépêches sur la bande de papier.

La figure 723 représente ces organes sur une plus grande échelle. Au-dessus de l'électro-aimant est une armature de fer doux *A*, liée à un bras de levier *C* fixé à un axe horizontal *I*, qui tourne



entre deux pivots. A l'extrémité antérieure de cet axe est un second bras de levier *D*, terminé par une lame d'acier recourbée en *i*. Cette lame sert à soulever la bande de papier *hp* entraînée par les rouleaux *t* et *u*, dont le premier est mù par le mouvement d'horlogerie. Enfin, au-dessus de la bande de papier est un tampon *a*, recouvert d'une flanelle imbibée d'encre oléique, et au-dessous du tampon une molette de cuivre *c*, qui, s'encrent au contact du tampon, cède son encre au papier à mesure qu'il avance.

Tant que le courant ne passe pas dans l'électro-aimant, il n'y a pas contact entre la molette et le papier, le bras de levier *D* étant abaissé par la tension d'une lame élastique fixée à l'axe *I* et appuyant sur la paroi du mouvement d'horlogerie; cette lame n'est pas visible dans le dessin. Mais dès que le courant arrive, l'armature *A* est attirée, et le bras *C* s'abaissant, le bras *D* remonte et soulève le papier. C'est alors que la molette trace sur celui-ci un trait ou un point, suivant la durée du contact. Si le courant ne passe que pendant un temps très-court, il ne se produit qu'un point (\cdot); mais si le contact a une certaine durée, il se produit un trait ($-$). On peut donc, en faisant, à la station de départ, passer le courant pendant un intervalle plus ou moins long, produire à volonté, à la station d'arrivée, un trait ou un point, et, par suite, des combinaisons de traits et de points. Il restait à donner à ces combinaisons une signification déterminée.

C'est ce qu'a fait Morse en représentant les lettres de l'alphabet par les combinaisons suivantes, qui donnent le moyen d'écrire des mots et des phrases, en laissant un blanc entre chaque lettre.

Alphabet de Morse.

· —	a	..	i	· — ·	r
· — —	â	· — — —	j	· · ·	s
· · · ·	b	— · —	k	—	t
— · — ·	c	· — · ·	l	· · —	u
— · ·	d	—	m	· — — —	û
·	e	· ·	n	· · · —	v
· · · · ·	é	— — —	o	· — —	w
· · — ·	f	— — — ·	ô	· · · —	x
— · · ·	g	· — · · ·	p	— · — —	y
· · · ·	h	— · — · —	q	— · · ·	z

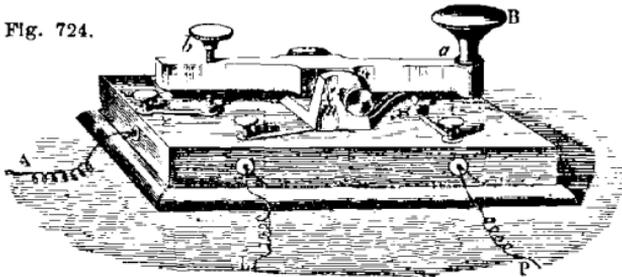
L'amplitude des oscillations des bras de levier C et D est réglée par deux vis de rappel *m* et *n*. Le bouton *s* sert à serrer le rouleau *u* sur le rouleau *t*, et le levier N à le soulever lorsqu'on veut retirer la bande de papier. La colonne H est creuse, et dans son intérieur est une longue vis qu'on fait tourner à l'aide d'un bouton K, et au moyen de laquelle on élève ou on abaisse tout l'électro-aimant, de manière à faire varier sa distance à l'armature suivant l'intensité du courant. Enfin, la pièce M (fig. 722) sert à arrêter le mouvement d'horlogerie.

Les dessins ci-dessus sont pris dans les ateliers de MM. Digney, constructeurs à Paris. Pour les grandes lignes, les bobines présentent chacune une résistance de 25 kilomètres, résistance qui équivaut à 250 unités Siemens (816).

865. **Manipulateur de Morse.** — Il se compose d'une planchette sur laquelle est fixé un levier métallique *ab* (fig. 724), mobile en son milieu sur un axe horizontal. L'extrémité *a* de ce levier tend toujours à être soulevée par un ressort placé au-dessous; en sorte que ce n'est qu'en appuyant avec le doigt sur la touche B que le levier s'abaisse et vient frapper le bouton α . Enfin, sur la planchette sont trois bornes en communication, l'une avec le fil P, qui vient du pôle positif de la pile du poste, la seconde avec le fil de ligne L, et la troisième avec le fil A, qui se rend au récepteur du poste; car il est bien entendu que les deux postes qui correspondent sont chacun pourvus d'un manipulateur et d'un récepteur.

Ces détails connus, il y a deux cas à considérer : 1^o le manipulateur est disposé pour recevoir une dépêche d'un poste éloigné; l'extrémité *b* est alors abaissée comme dans le dessin ci-après, en sorte que le courant qui arrive par le fil de ligne L et monte dans

la pièce métallique m , redescend dans le fil A, qui le mène au récepteur du poste où est placé l'appareil. 2° Il s'agit de transmettre une dépêche; dans ce cas, on appuie sur la touche B de manière que le levier vienne en contact avec le bouton x . Le courant de la pile du poste, qui arrive par le fil P, montant alors dans le levier, en redescend par la pièce m et va gagner le fil de ligne L, qui le conduit au poste auquel est adressée la dépêche. Or c'est d'après le temps qu'on appuie sur la touche B qu'il se produit, au récep-



teur où va le courant, un point ou un trait. Si l'on n'opère qu'un simple choc sur le bouton x , il se forme un point; mais si le contact se prolonge pendant un intervalle de temps très-petit du reste, il se produit un trait.

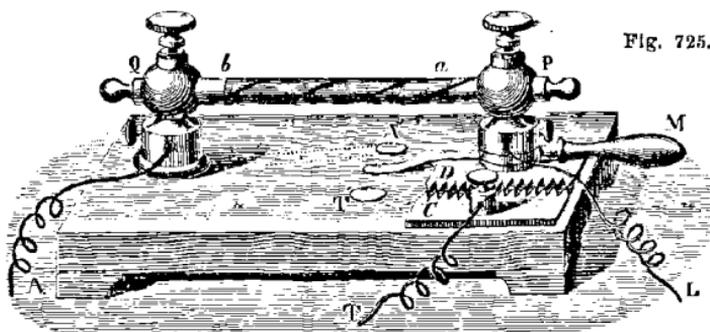
866. **Parafoudre.** — Le *parafoudre* est un appareil destiné à préserver l'employé qui fait marcher le télégraphe, dans le cas où par l'influence de l'électricité atmosphérique, en temps d'orage, les fils conducteurs se chargeraient d'une quantité d'électricité suffisante pour donner des étincelles dangereuses. La figure 722 montre le parafoudre fixé sur une planchette verticale P, à côté du galvanomètre G. Il est représenté, sur une plus grande échelle, sur une planchette horizontale, dans la figure 725.

Deux bornes de laiton P et Q sont en communication, la première avec le fil de ligne L, la seconde avec les appareils par le fil A. D'une borne à l'autre est un tube de caoutchouc durci ab , sur lequel s'enroule un fil de fer très-fin, qui conduit le courant de P à Q. Au pied de la borne P est une plaque de cuivre D, dentelée dans toute sa longueur; latéralement et très-rapprochée, est une plaque identique C, en communication avec la terre par le fil T.

Par cette disposition, lorsque, sous l'influence d'orages atmosphériques, la tension électrique devient assez grande sur le fil de ligne pour donner des étincelles redoutables, la plaque D, qui est dans le courant, donne écoulement par ses pointes à l'électricité vers la lame C et de là dans le sol, sans danger pour les employés qui sont auprès. Si, malgré cette décharge continue, le

courant devient trop intense, le fil de fer enroulé de *a* en *b* s'échauffe et fond, et dès lors toute communication électrique est interrompue entre les appareils et la ligne.

Sur la planchette sont deux boutons de cuivre *A'* et *T'* respectivement en communication avec la borne *Q* et avec la plaque dentelée *C*, et au moyen d'une manette *M* on peut amener une



lame mobile, qui lui est liée, sur *A'* ou sur *T'*, et faire arriver à volonté le courant au récepteur ou à la terre, sans qu'il passe par le fil fin *ab*. L'effet de l'appareil est alors suspendu, car il n'agit comme parafoudre que lorsqu'il est disposé comme ci-dessus.

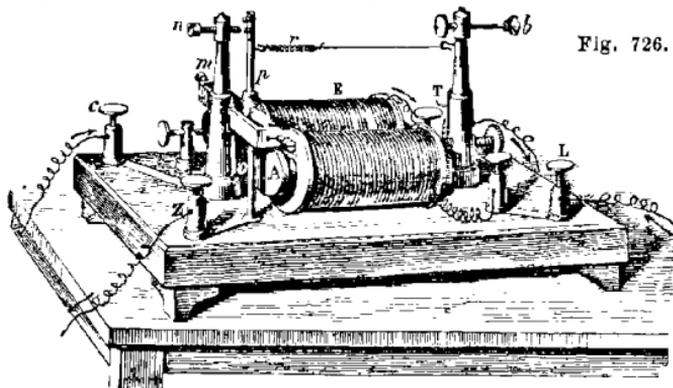
Les parafoudres, qui suffisent pour préserver les employés, sont insuffisants pour prévenir les courants accidentels que les aurores boréales, les orages magnétiques, les courants terrestres excitent dans les fils; courants qui parfois deviennent assez intenses pour troubler tout à fait la transmission des dépêches, comme il est arrivé pendant plusieurs jours en octobre 1872.

867. **Marche générale des courants dans le télégraphe de Morse.** — En résumant ce qui précède, on voit que le courant qui vient du poste attaquant, arrivant par le fil de ligne *L* (fig. 722), traverse d'abord le parafoudre *P*, puis le galvanomètre *G*. De là, il ne va pas directement au récepteur, mais se rend d'abord au manipulateur (fig. 724), où il entre en *L*, et dont il sort en *A* pour se rendre au récepteur, dans lequel il arrive par le fil *C* (fig. 722). Là, il passe dans l'électro-aimant *E*, fait osciller le levier *CD* (fig. 723), et va enfin se perdre dans la terre par le fil *T*.

Si, au contraire, on considère le cas, non plus où l'on reçoit une dépêche, mais où l'on en expédie une, le courant se transmet de la manière suivante. La touche *B* (fig. 724) étant alors abaissée, et le levier *ab* en contact avec le bouton *x*, le courant qui arrive de la pile du poste par le fil *P*, sort du manipulateur par le fil *L*;

puis passant dans le galvanomètre et dans le parafoudre, il s'en va enfin par le fil de ligne au poste auquel on expédie.

868. **Relais.** — On sait (818) que l'intensité des courants est en raison inverse de la longueur du circuit qu'ils parcourent. De plus, par les poteaux qui portent les fils et par l'air humide, il se produit une dérivation (828) d'autant plus grande, que la ligne est plus longue. De ces différentes causes il résulte que, si les deux postes qui correspondent sont très-éloignés l'un de l'autre, il peut arriver que le courant ne soit plus assez fort pour faire fonctionner les pièces qui inscrivent la dépêche. On a recours alors à un



relais. On nomme ainsi un appareil très-sensible parcouru par le courant de ligne, et servant à introduire dans le récepteur le courant d'une *pile locale* de 4 ou 5 éléments, située dans le poste, et n'ayant d'autre usage que d'imprimer les signaux transmis par le fil de ligne. Pour cela, le courant de ligne, entrant dans le relais par la borne L (fig. 726), se rend dans un électro-aimant E, d'où il va se perdre dans la terre par la borne T. Or, chaque fois que le courant de ligne passe dans le relais, l'électro-aimant attire une armature A fixée à la partie inférieure d'un levier vertical *p*, lié à un axe horizontal qui tourne entre deux vis à pivot.

A chaque oscillation, le levier *p* vient buter à sa partie supérieure contre un bouton *n*, et à cet instant le courant de la pile locale, qui arrive par la borne *c*, monte dans la colonne *m*, passe dans le levier *p*, descend par la tige *o*, qui le conduit à la borne Z; de là il se rend à l'électro-aimant du récepteur, d'où il sort par le fil T (fig. 722), pour revenir à la même pile locale d'où il est parti. Puis, quand le courant du fil de ligne s'interrompt, l'électro-aimant du relais n'étant plus attractif, le levier *p*, entraîné par un ressort à boudin *r*, s'écarte du bouton *n*, comme le montre le dessin, et le courant de la pile locale ne passe plus. On voit donc

que le relais transmet au récepteur exactement les mêmes phases de passage et d'intermittence que celles qui sont opérées par le manipulateur dans le poste qui envoie la dépêche.

869. **Sonnerie électrique.** — La *sonnerie électrique* est un petit appareil qui sert à prévenir le poste auquel on expédie. On en construit de plusieurs sortes ; celle représentée dans la figure 727 est la *sonnerie à trembleur*. Elle se compose d'une planchette disposée verticalement, sur laquelle est fixé un électro-aimant E, dans lequel arrive, par une borne *m*, le courant de ligne, ou le courant d'une pile locale. De l'électro-aimant, le courant gagne une lame élastique d'acier *c*, qui porte l'armature *a* de l'électro-aimant, puis une lame de laiton C en contact avec l'armature, et enfin revient à la pile par la borne *n*.

Ces détails connus, chaque fois que le courant passe dans l'électro-aimant, l'armature est attirée et entraîne avec elle un marteau P, qui frappe un timbre T et le fait résonner. Or, au moment du choc, le contact cesse entre l'armature *a* et la lame C, et le courant étant ouvert, l'électro-aimant devient

inactif ; mais la lame d'acier *c* ramenant aussitôt, en vertu de son élasticité, l'armature en contact avec la lame C, le courant passe de nouveau, et ainsi de suite avec une grande rapidité, tant que le courant arrive à la sonnerie.

* 870. **Télégraphe imprimant de Hughes.** — M. Hughes, à New-York, a inventé un télégraphe imprimant qui donne des résultats remarquables de fidélité et de rapidité, cette dernière étant double de celle du télégraphe Morse. L'appareil de Hughes, compliqué dans ses détails, est fondé sur deux principes simples et ingénieux, qu'on n'avait pas appliqués jusqu'ici aux télégraphes électriques. Le premier, c'est que la force motrice n'est plus empruntée au courant, mais à un poids de 60 kilogrammes environ, qui tend à faire marcher tout l'appareil d'une manière continue, et qu'on remonte au moyen d'une pédale quand il est au bas de sa course. En sorte que le courant n'a d'autres fonctions que de

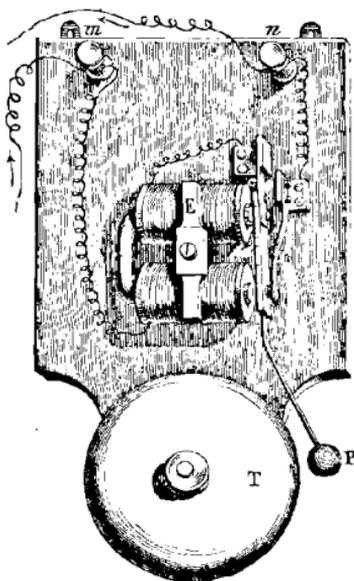
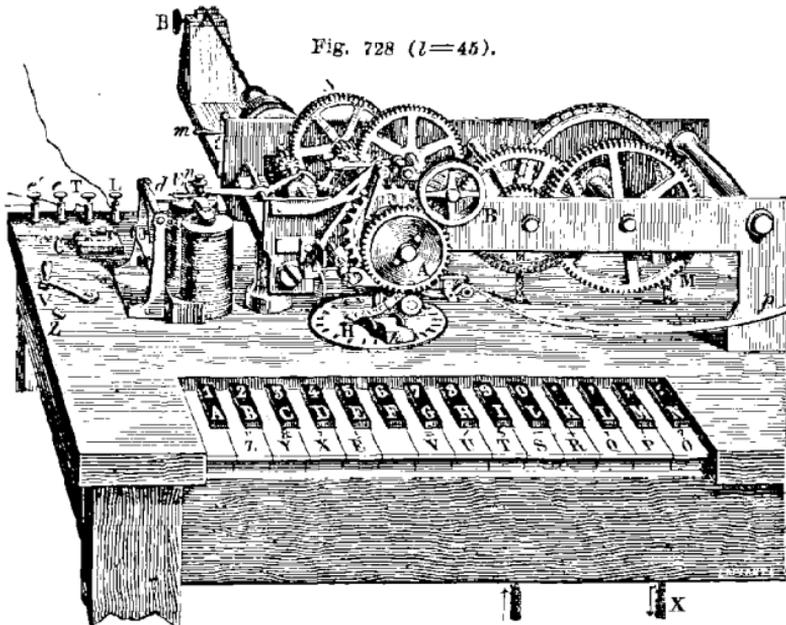


Fig. 727.

faire embrayer et déembrayer une roue dont l'arbre porte un excentrique qui, au moment voulu, soulève la bande de papier sur laquelle on veut imprimer telle ou telle lettre. Le second principe est que l'électro-aimant agit à l'inverse de ceux des autres télégraphes électriques, c'est-à-dire que ce n'est pas quand le courant passe qu'il tient son armature en contact, mais quand il ne



peut pas. Pour cela, le fer doux de l'électro-aimant est en contact, à sa partie inférieure, avec un aimant en fer à cheval. Aimanté par l'influence de celui-ci, l'électro-aimant retient son armature ; mais le sens du courant qui parcourt le fil de l'électro-aimant étant tel, qu'il l'aimante en sens contraire de l'aimantation qu'il possède déjà, le plus faible courant qui passe dans le fil désaimante l'électro-aimant. Celui-ci lâche donc son armature, qui est sollicitée par un ressort, et c'est alors que l'embrayage se produit, comme on va le voir ci-après.

Sur le devant de la table qui porte l'appareil est un clavier à 28 touches, dont 14 noires et 14 blanches (fig. 728). Les 14 touches noires portent les lettres de A à N ; des 14 touches blanches, 12 portent les autres lettres de l'alphabet, et la première et la sixième, à partir de la gauche, ne portent aucune lettre. Chaque touche qui porte une lettre, porte en outre un chiffre, ou un signe de ponctuation, ou un signe algébrique.

Au delà du clavier est un disque de cuivre H fixe et portant à son centre un axe vertical J (fig. 729), qui tourne avec une vitesse de deux tours par seconde, entraînant avec lui un chariot *h* qui y est fixé et dont on verra bientôt la fonction. Après le disque H est un bâti de cuivre portant une série de roues mues par un poids de 60 kilogrammes, qui agit sur une chaîne sans fin X; cette chaîne transmet le mouvement à la roue M, et de celle-ci, par une suite de pignons et de roues, à la roue N. A l'axe de cette dernière est fixé un tore de laiton, agissant comme volant pour régulariser le mouvement. C'est ce tore qui sert à arrêter l'appareil au moyen d'un frein qu'on fait marcher avec la poignée *m*. En appuyant sur celle-ci, toutes les pièces s'arrêtent presque instantanément. La roue N, dont nous parlions ci-dessus, mène, à gauche et un peu au-dessous, un pignon qui donne le mouvement à la roue *g* (fig. 730), aux excentriques *o* et *i*, et au rouleau *c* (fig. 731), qui sert à soulever la bande de papier. En un mot, c'est l'axe mù par ce pignon qui porte les pièces principales de l'appareil.

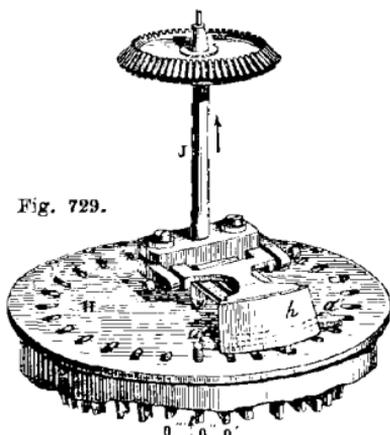


Fig. 729.

Sur le devant du bâti est un rouleau B, qui est le distributeur d'encre. A cet effet, il est entouré d'une étoffe épaisse de laine qu'on entretient toujours imbibée d'encre grasse, comme dans le télégraphe de Morse. Tangentiellement à ce rouleau est une roue A, qu'on nomme *roue des types*, parce qu'elle porte sur son pourtour les types qui servent à imprimer les dépêches. Pour cela, elle est munie de 26 dents et de 2 blancs, c'est-à-dire deux intervalles sans dents. Chaque dent porte en relief une lettre et un signe, savoir : 26 lettres, 10 chiffres, 7 signes de ponctuation et 9 signes algébriques ou autres; ce qui fait en tout 52 signes, c'est-à-dire un nombre égal à celui des signes inscrits sur les touches du clavier (les deux touches blanches déduites).

Sur la table (fig 728) sont quatre bornes : L qui reçoit le courant de ligne, T qui conduit le même courant à la terre, *e* qui reçoit le courant de la pile du poste. La borne L transmet le courant de ligne à un commutateur C, et de là à l'électro-aimant; la borne *e'* conduit le courant local au clavier. Le commutateur C est destiné à diriger le courant de ligne dans l'électro-aimant de façon

à l'aimanter en sens contraire de l'aimantation que lui communique l'aimant qui est au-dessous. Sur la gauche de la même table sont deux boutons métalliques V et Z destinés, le premier à recevoir la dépêche, le second à la transmettre. Pour cela, un petit contact métallique est mobile sur une charnière et muni d'une poignée d'ivoire. En prenant celle-ci à la main, on met le contact en prise avec le bouton V ou Z, suivant qu'on veut re-

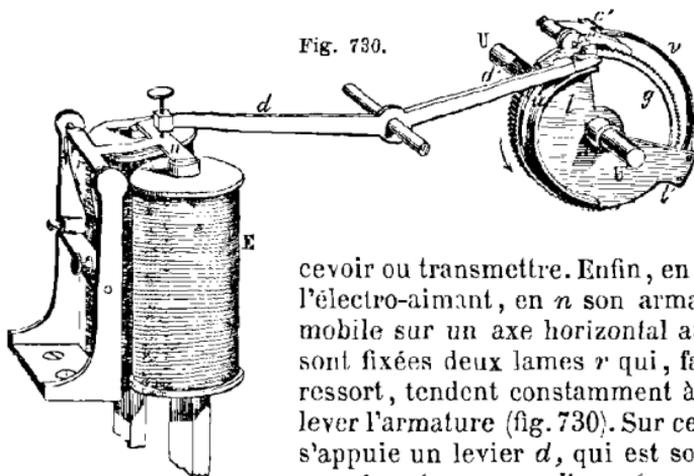


Fig. 730.

cevoir ou transmettre. Enfin, en E est l'électro-aimant, en *n* son armature, mobile sur un axe horizontal auquel sont fixées deux lames *r* qui, faisant ressort, tendent constamment à soulever l'armature (fig. 730). Sur celle-ci s'appuie un levier *d*, qui est soulevé en même temps que l'armature. C'est

ce levier *d* prolongé qui va agir sur la roue *g* et *y* produire l'embrayage. L'ensemble de l'appareil connu, le premier détail à étudier est celui représenté dans la figure 729.

Le disque H est percé sur son pourtour de 28 trous, dans chacun desquels passe un goujon d'acier vertical *o'*, *o''*, *o'''*..., mû par un levier qui reçoit son mouvement de l'une des touches du clavier. En sorte qu'à chaque trou du disque H correspond une lettre du clavier, et que si l'on appuie sur la touche F, par exemple, immédiatement le goujon correspondant s'élève au-dessus du disque H de deux millimètres environ. On a déjà vu que l'arbre J et le chariot *h*, qui *y* est fixé, tournent avec une vitesse de deux tours par seconde. D'où résulte qu'à peine le goujon *o''*, par exemple, est soulevé, il est rencontré par une plaque d'acier *a' a''*, isolée du reste de l'appareil par des plaques d'ivoire, mais en communication métallique avec l'arbre J. Le courant, qui du clavier s'est rendu au goujon *o''*, passe donc actuellement dans l'arbre J, et de là dans tout le bâti. De celui-ci, il se rend au bouton Z (fig. 728), et si le contact pour transmettre est établi, il va passer dans l'électro-aimant E, et enfin dans le fil de ligne L, qui le conduit

à l'électro-aimant du poste auquel est destinée la dépêche, et où il fait imprimer la lettre de la touche qu'on a abaissée.

Au départ comme à l'arrivée, le courant passe dans l'électro-aimant du poste attaquant et dans celui du poste qui reçoit. Il résulte de là que la dépêche s'imprime en même temps dans les

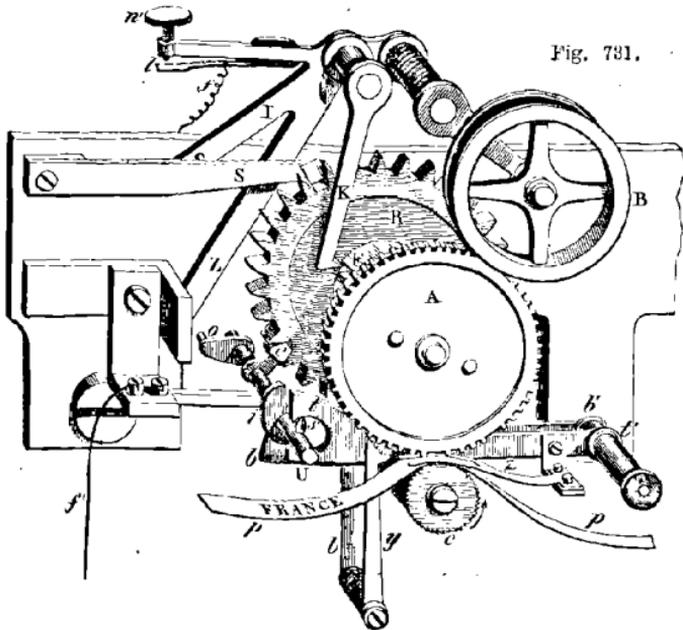


Fig. 731.

deux postes, ce qui donne le moyen de la vérifier constamment et d'entretenir un accord parfait entre les deux appareils.

A son passage dans l'électro-aimant, on a déjà vu que le courant le désaimante, et que les lames *r* (fig. 730) font lâcher l'armature *n*. Or, le bras de levier *d* étant alors soulevé par l'armature, le bras *d* s'abaisse, et c'est ce mouvement qui fait imprimer une lettre. Pour comprendre l'effet qui se produit ici, observons d'abord que les deux arbres *U*, *U'*, qui paraissent n'en faire qu'un, sont indépendants l'un de l'autre : l'arbre *U*, auquel est fixée la roue à rochet *g*, tourne toujours ; mais l'arbre *U'*, auquel est fixé le rochet *c'*, ne peut tourner que lorsque ce rochet est en prise avec les dents de la roue *g*. Or, tant que le bras de levier *d* est soulevé, il soulève lui-même un petit taquet *c''*, et avec lui le rochet *c'* ; il n'y a donc pas embrayage, et l'arbre *U* tourne seul. Mais aussitôt que le bras *d* s'abaisse, le rochet *c'*, qui n'est plus soutenu, est rabattu par un ressort *v* qui le presse de haut en bas, embrayé avec la roue *g*, et, entraîné par elle, transmet son

mouvement au secteur plein ll' et à l'arbre U' . Or c'est cet arbre qui porte les excentriques o et i (fig. 731), et qui soulève la bande de papier pendant son impression. On voit donc combien le mécanisme que nous venons de décrire joue un rôle important dans l'appareil. Ne l'abandonnons pas sans faire connaître la fonction de la lame courbe u (fig. 730), agissant comme excentrique sur le levier d' . A mesure que la roue g tourne dans le sens marqué par la flèche, l'excentrique u soulève le bras d' , et avec lui le taquet c'' et le rochet c' . En sorte qu'après un tour complet du secteur ll' , il y a de nouveau désembrayage. Le secteur ll' s'arrête donc, et avec lui l'arbre U' ; d'où celui-ci ne tourne jamais que d'un tour. Il est encore à remarquer que l'excentrique u ne sert pas seulement à faire désembrayer le rochet c' , mais qu'en soulevant le bras d' , il abaisse d . Or celui-ci, s'appuyant sur l'armature n , la rabat et la met en prise avec l'électro-aimant, jusqu'à ce que, le courant passant de nouveau, l'embrayage se reproduise.

* 871. **Récepteur du télégraphe de Hughes.** — Ce mécanisme est compliqué, et il nous est impossible de le décrire ici dans tous ses détails. La roue des types A , qui s'encre constamment sur le rouleau B (fig. 731), est animée d'un mouvement de rotation continu, soit qu'elle imprime ou qu'elle n'imprime pas. Le point important ici est que cette roue soit toujours d'accord avec le chariot h de la figure 729; c'est-à-dire qu'à l'instant où celui-ci est en prise avec une des touches du clavier, la touche F par exemple, il faut que la même lettre se trouve exactement au bas de la roue des types; car c'est à ce moment que la bande de papier va être soulevée, et que l'impression va se faire. En effet, c'est alors que l'arbre U' embrayant avec U (fig. 730), les excentriques et les cames placés sur U' commencent à agir. Une came aiguë s (fig. 731) placée à l'extrémité antérieure de U' soulève le levier ll' . C'est ce levier qui porte le rouleau c sur lequel est la bande de papier, maintenue par une double lame élastique z . Le rouleau étant soulevé brusquement, le papier vient frapper un coup sec sur la lettre F , que nous avons supposée au bas de la roue A , et cette lettre est imprimée. Aussitôt, l'excentrique i vient agir sur l'extrémité du levier bb' , auquel est fixée une tige y . Celle-ci, à son extrémité supérieure, porte un encliquetage qui fait marcher une roue à rochet fixée à l'axe du rouleau c . D'où il résulte qu'en s'abaissant, y fait tourner le rouleau et avancer la bande de papier, juste d'une quantité égale à l'intervalle entre deux lettres; en sorte que le papier est prêt à recevoir l'impression d'une nouvelle lettre. Si l'on abaisse, par exemple, la tou-

che R sur le clavier, le chariot *h* (fig. 729) est en prise avec le goujon soulevé à l'instant précis où la lettre R est au bas de la roue des types. Or le papier venant la frapper au même moment, la lettre R s'imprime, et ainsi de suite de tout le mot FRANCE inscrit sur la bande de papier.

La came *e* fixée sur l'axe U a un rôle important : elle sert à régler le mouvement entre le poste qui transmet et celui qui reçoit. Pour cela, cette came s'engage entre les dents de la roue R, qu'on nomme la *roue correctrice*, et lorsqu'il n'y a pas concordance, elle presse les dents ou leur résiste, de manière à rectifier la position de cette roue et en même temps de la roue A, car ces deux roues ne sont pas invariablement fixées sur leur arbre.

Le bouton *n'*, lorsqu'on appuie dessus, s'abaisse, et en même temps les bras de levier I, Z, K ; ce dernier porte une dent qui s'engage dans un cran F, lié aux roues R et A. Lorsque cette dent est en prise avec le cran, un des blancs de la roue A se trouve juste en bas de la roue. On a donc un moyen de *mettre au blanc*, ce qu'on fait toujours quand on arrête, ou quand on s'aperçoit qu'aux deux postes les appareils sont en désaccord. La pièce I, en s'abaissant, écarte une lame S, qui, au moyen d'une roue à rochet non visible dans le dessin, fait désembrayer les roues R et A, lesquelles cessent aussitôt de tourner, quoique le mouvement des autres roues M, N (fig. 728) se continue. Mais dès que le courant arrive, l'arbre U' faisant une révolution, l'excentrique *o* soulève le bras Z, et avec lui les pièces I, K ; en sorte que les roues R et A recommencent aussitôt à tourner.

On a vu ci-dessus que la dent du levier K étant en prise avec le cran F, *un des blancs* de la roue des types se trouve au bas, au-dessus de la bande de papier. Il importe de fixer lequel des deux blancs, l'un servant à imprimer les 26 lettres, l'autre les chiffres et les différents signes du clavier. De plus, on a vu que chaque dent de la roue des types porte une lettre et un chiffre, ou une lettre et un signe. Or, sur chaque dent, l'intervalle entre la lettre et le signe est juste d'un demi-intervalle entre les dents, soit $\frac{1}{8}$ de la circonférence de la roue. Si donc on imprime à celle-ci, qui n'est pas invariablement liée à son axe, un déplacement de $\frac{1}{8}$ de tour dans un sens ou dans l'autre, les chiffres et les signes prennent la place des lettres, et réciproquement. Ce résultat s'obtient au moyen du mécanisme suivant (fig. 732).

Sur la face postérieure de la roue correctrice est une plaque de laiton *mn* oscillant autour d'un axe *i'*, et percée d'un trou dans lequel s'engage l'extrémité d'un levier *a* lié à l'arbre de la roue des types. Par suite, toutes les fois que la pièce *mn* incline à

droite ou à gauche, elle entraîne le levier *a* et avec lui la roue des types, qui tourne alors d'une demi-division, son déplacement étant réglé par deux crans sur la plaque *mn* dans lesquels s'engage alternativement la dent d'une lame élastique *a'*. Ces détails connus, lorsqu'on abaisse la première touche blanche du clavier, la came

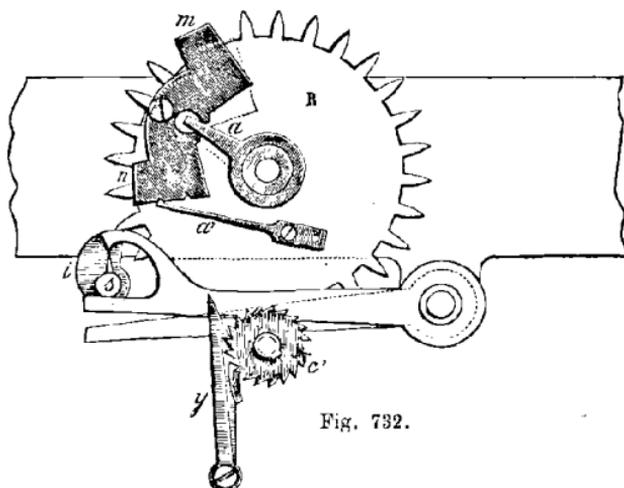


Fig. 732.

e pressant sur l'extrémité *m* de la plaque *mn* lui fait prendre la position représentée en ligne ponctuée, et, le levier *a* la suivant dans son mouvement, la roue des types tourne d'une demi-division : elle est alors disposée pour imprimer les lettres. Puis, lorsqu'on veut imprimer un chiffre ou un signe, on appuie sur la seconde touche blanche du clavier (la sixième) ; la came *e*, se trouvant alors en prise avec l'extrémité *n*, la presse et fait reprendre à la plaque *mn* sa première position. La roue des types, revenue alors sur elle-même d'une demi-division, est disposée pour imprimer les chiffres et les signes. D'où l'on voit qu'il faut toujours, à l'aide des deux touches blanches du clavier, commencer par mettre au blanc des lettres quand on veut imprimer une lettre, et au blanc des chiffres quand on veut imprimer un chiffre.

* 872. **Régulateur du télégraphe de Hughes.** — Le réglage du synchronisme entre les deux postes s'obtient de la manière suivante : ayant donné aux appareils une vitesse telle, que le chariot *h* (fig. 729) fasse sensiblement deux tours par seconde, un des correspondants transmet une lettre quelconque, qu'il répète à chaque tour du chariot. Si la même lettre se reproduit constamment à l'autre poste, le synchronisme est suffisant ; mais si la même lettre ne se reproduit pas, et que les caractères imprimi-

més aillent en avançant de A à B, de B à C, cela indique qu'au poste qui reçoit, le mouvement est plus rapide qu'à celui qui expédie. Alors, au premier poste, on ralentit le mouvement à l'aide d'un régulateur à mouvement isochrone plus ou moins rapide. Il se compose d'une verge de laiton P, légèrement conique et solidement encastrée par son gros bout dans un support fixé à l'appareil (fig. 733). A son autre extrémité, elle s'engage dans une

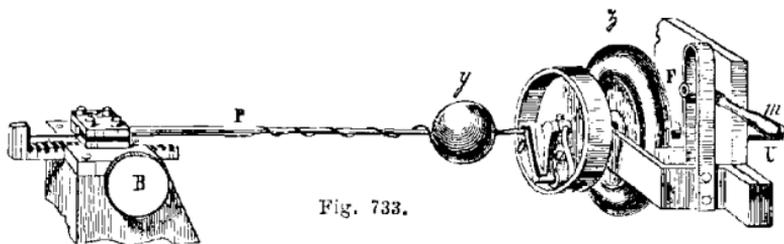


Fig. 733.

tige *o* articulée elle-même sur une manivelle *q*, qui termine postérieurement l'arbre *U* qui porte les cames. A la même extrémité, la verge traverse une boule de cuivre *y*, à laquelle est adapté un fil d'acier qui, à son autre bout, est lié à une crémaillère qu'on fait marcher par un bouton *B*, ce qui permet de faire glisser la boule le long de la verge.

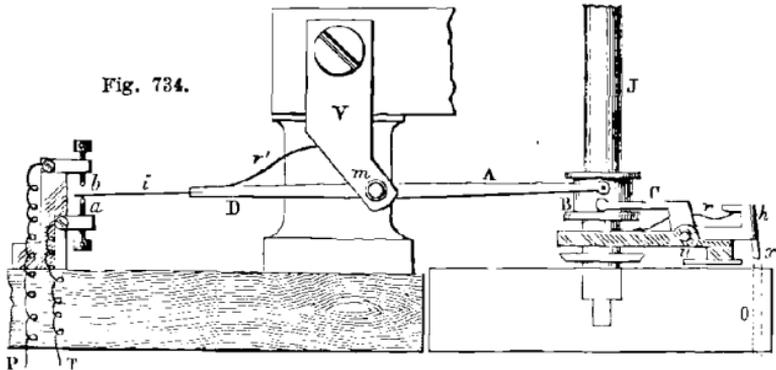
Ainsi liées à l'arbre, l'extrémité de la verge et la boule prennent avec lui un mouvement de rotation qui, par un effet de force centrifuge, les écarte de leur position d'équilibre. De là, pour la verge et la boule, un mouvement vibratoire auquel correspond une vibration complète par tour. Tant que la position de la boule sur la verge est fixe, ses oscillations sont isochrones et d'une certaine durée; mais si on la déplace, les vibrations deviennent plus lentes ou plus rapides, suivant que la boule a été rapprochée ou écartée de l'extrémité *o*; et comme le mouvement de rotation est lié au mouvement vibratoire, il se ralentit ou s'accélère avec lui. On conçoit donc que par le déplacement de la boule on arrive à donner à l'appareil la vitesse de rotation à laquelle correspond le synchronisme avec l'autre appareil.

* 873. **Modification du chariot de Hughes.** — M. Hughes a remplacé récemment le chariot de la figure 729 par le chariot suivant, dans lequel le courant ne passe plus, et qui, au lieu de 28 contacts différents, n'en présente qu'un seul.

Sur l'arbre *J* du chariot est une douille *B*, qui peut s'élever et s'abaisser, et dans laquelle l'arbre tourne librement. A la paroi de cette douille est liée par une goupille l'extrémité d'un levier *AD*, dont le point d'appui est en *m*, sur une pièce *V* fixée au

bâti du télégraphe. Le bras D de ce levier porte une lame élastique d'acier i , et lorsqu'il oscille, celle-ci vient buter alternativement sur deux vis a et b , isolées sur un support d'ébonite, et en communication, la première avec la terre, la seconde avec la pile. Sur le chariot proprement dit est une pièce coudée Ch , mobile autour de deux vis à pivot u .

Ces détails connus, tant que le bras h de la pièce coudée n'est



pas soulevé par un goujon, tout le système est disposé comme le montre la figure, et la lame i est en communication avec la terre; mais dès qu'un goujon O appuie sur la dent x du chariot, le bras de levier h est soulevé, tandis que le bras C , s'abaissant, fait descendre la douille B en appuyant sur un rebord saillant réservé à sa partie inférieure. La douille entraînant avec elle le levier A , le bras D s'élève et avec lui la lame i , qui arrive en contact avec la vis b . C'est alors que le courant qui vient de la pile gagne la lame i , le bras D et tout le bâti par la pièce V . Les goujons et le chariot ne remplissent donc ici qu'un rôle purement mécanique, celui d'établir les contacts. Lorsque le goujon redescend, un ressort r maintient la pièce h , et un second ressort r' ramène la lame i sur la terre.

* 874. **Télégraphes électro-chimiques.** — Les *télégraphes électro-chimiques* inscrivent les dépêches en signes colorés sur un papier imprégné de cyanure jaune de fer et de potassium, ce sel étant décomposé par le courant d'une pile locale, dans le poste qui reçoit, toutes les fois qu'il passe au travers du papier.

Le premier télégraphe de ce genre est dû à M. Bain, Écossais. Les lettres y sont représentées à l'aide des mêmes signes que dans le télégraphe de Morse, c'est-à-dire par des combinaisons de traits et de points; mais la dépêche est d'abord *composée*, dans le poste

expéditeur, sur une longue bande de papier ordinaire. Pour cela, celle-ci est percée, à l'emporte-pièce, successivement de petits trous ronds qui représentent les points de Morse, et de trous allongés qui correspondent aux traits. Cela fait, la bande de papier est interposée entre une petite roulette métallique et une lame élastique également métallique, qui font partie l'une et l'autre du courant de la pile du poste. Or la roulette, en tournant, entraîne avec elle la bande de papier, dont toutes les parties viennent successivement passer entre la roulette et la lame. Par suite, si la bande de papier n'était pas trouée, elle s'opposerait constamment au passage du courant, n'étant pas conductrice; mais en vertu des trous qu'on y a pratiqués, chaque fois que l'un d'eux passe, il y a contact entre la roulette et la lame, et le courant se continue pour aller faire marcher le relais du poste auquel on expédie, et tracer en bleu, sur un papier imprégné de cyanure, la même série de points et de traits que sur la bande de papier découpée.

* 875. **Télégraphe transatlantique.** — On a déjà vu le câble sous-marin qui sert à la transmission dans le télégraphe transatlantique (861); or de la composition de ce câble et de son immense développement il résulte des effets qui ne permettent pas d'appliquer les télégraphes qui viennent d'être décrits. En effet, le câble sous-marin, formé de deux parties métalliques séparées par une couche isolante, n'est autre chose qu'un énorme condensateur (724). Par suite, lorsqu'on lance dans l'âme du câble un courant positif, par exemple, celui-ci agissant par influence sur les fils d'acier qui forment l'armature du câble, ces fils se chargent d'électricité négative, tandis que la positive est repoussée. De là des contre-courants qui non-seulement prolongent considérablement la durée de l'état variable (827) dans l'âme du câble, mais aussi la durée de son retour à l'état neutre lorsqu'on interrompt le courant.

Pour démontrer l'effet nuisible de la condensation dans les câbles sous-marins, M. Varley, à Londres, a construit une ligne artificielle formée de tubes de verre remplis d'une dissolution de sulfate de zinc et reliés entre eux par des lames de zinc plongeant dans des tubes. Le long du circuit sont interposés alternativement des galvanomètres très-sensibles, et des condensateurs dont une armature communique avec le circuit, et l'autre avec la terre. Par la grande résistance des parties liquides et par la surface des condensateurs, cette ligne artificielle rentre dans la condition d'une ligne sous-marine. Lorsqu'on y fait passer un courant, on observe que le dernier galvanomètre n'atteint son maximum de déviation que plusieurs secondes après les premiers; mais si l'on supprime les condensateurs, tous les galvanomètres atteignent sensiblement

dans le même temps la même déviation, ce qui prouve que c'est bien à la condensation qu'est dû le ralentissement du courant.

Pour combattre l'effet nuisible de la condensation, les physiciens anglais ont adopté deux systèmes. Dans le premier, dû à Witehouse, au moyen d'un manipulateur inverseur à deux touches, on fait passer alternativement dans le câble un courant positif, puis un courant négatif. Un second flux, contraire au premier, vient ainsi le neutraliser aussitôt qu'il a agi sur le récepteur du poste auquel on expédie, et le câble, revenu à l'état neutre, est prêt à recevoir un second flux.

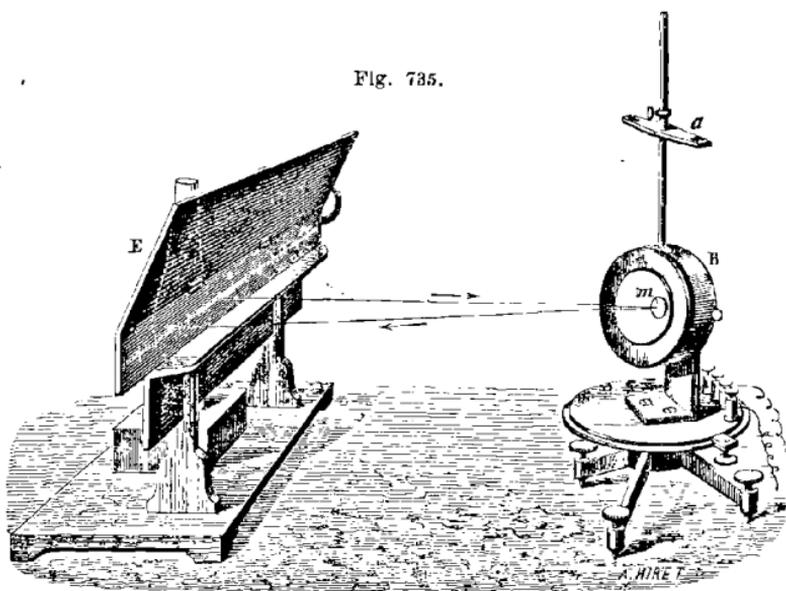
Dans le second système, dû à M. Varley, on établit dans chaque poste, entre la ligne et les appareils, un immense condensateur, d'environ 4500 mètres carrés de superficie, qui établit une solution de continuité entre la ligne et les appareils. Il suit de là que lorsque Brest, par exemple, expédie à Terre-Neuve, ce n'est pas le courant de la pile de Brest qui fait marcher le récepteur de Terre-Neuve, mais le condensateur. En effet, supposons qu'à Brest on appuie sur la touche positive du manipulateur, le flux positif qui s'élançe dans le câble charge d'électricité de nom contraire l'armature du condensateur qui ne communique pas avec la pile, et repousse l'électricité de même nom que la sienne dans le récepteur de Terre-Neuve, et de là dans le sol. Or les appareils sont disposés de manière que la touche qu'on a abaissée à Brest, en se relevant, fait communiquer avec la terre l'armature du condensateur déjà en communication avec la ligne, les deux armatures se déchargent donc dans le sol aux deux extrémités de la ligne. C'est alors qu'appuyant sur la touche négative, un flux de même nom s'élançe dans le câble, et le ramène instantanément à l'état neutre, ce qui permet de faire passer aussitôt un flux nouveau, positif ou négatif.

Dans ce mode d'opérer, le flux qui arrive au récepteur est extrêmement faible, $\frac{1}{100}$ environ du flux lancé dans le câble. De là la nécessité de n'employer pour récepteurs que des appareils extrêmement sensibles, condition qui est remplie par le galvanomètre de M. W. Thomson, lequel est tellement sensible qu'il permet de télégraphier de Brest à Terre-Neuve avec une pile de cinq couples de Daniell; car il est indispensable ici de ne faire usage que d'un courant de ligne très-faible pour réduire l'effet induisant.

* 876. **Galvanomètre récepteur à réflexion de W. Thomson.** — L'appareil récepteur du télégraphe transatlantique est un galvanomètre circulaire de W. Thomson modifié par M. Varley. Son circuit est formé d'un fil de cuivre recouvert de soie, n'ayant qu'un dixième de millimètre de diamètre et faisant près de 20 000

tours; d'où résulte une résistance considérable, en rapport avec celle que présente le câble sous-marin. Au centre est un miroir de verre *m* (fig. 735), concave et suspendu à trois fils de cocon. Derrière le miroir est fixé un petit barreau aimanté, le tout si léger, que miroir et barreau ne pèsent pas ensemble plus d'un décigramme. Un aimant *a*, qui peut se rapprocher plus ou

Fig. 735.



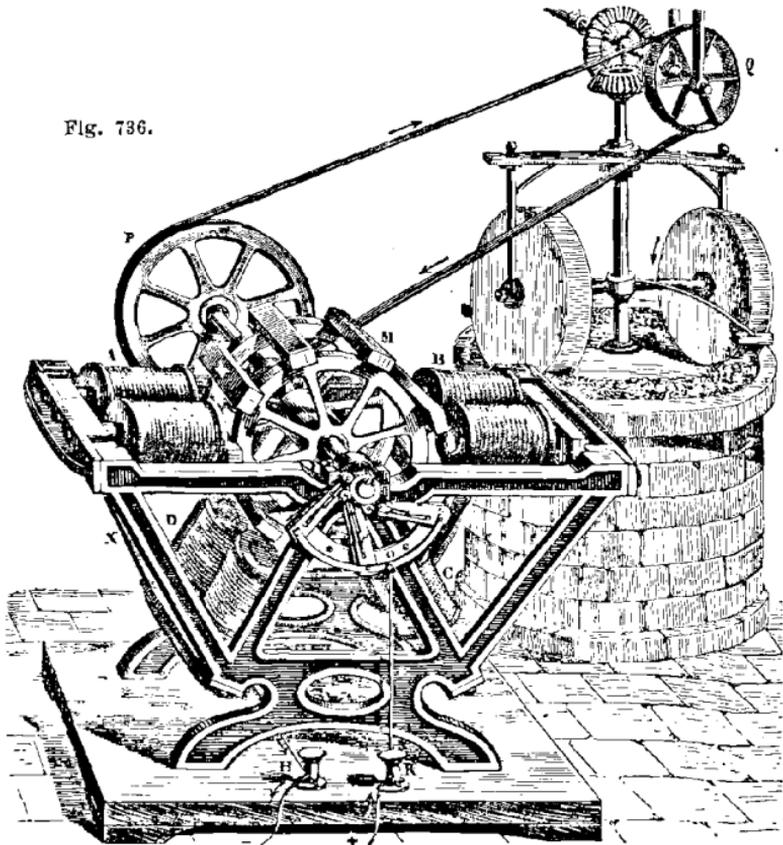
moins, sert à maintenir le miroir dans une position déterminée tant que le courant ne passe pas; de plus, il sert à faire équilibre à l'action directrice de la terre afin de rendre le barreau du miroir presque astatique.

A un mètre environ en avant du miroir est un écran *E*, derrière lequel est une lampe. Par une petite ouverture pratiquée dans l'écran passe un faisceau lumineux qui tombe sur le miroir, s'y réfléchit et vient projeter une image de l'ouverture sur des divisions tracées le long d'une bande de papier collée sur l'écran. Cette image revient vers l'ouverture tant que le courant ne passe pas dans le galvanomètre; mais, dès qu'il arrive, le barreau et le miroir dévient à droite ou à gauche suivant le sens du courant, et avec eux l'image. On est convenu que les déviations à gauche donnent les *points*, et les déviations à droite les *traits* de l'alphabet de Morse (864). D'après la distance à laquelle est placé l'écran, les plus légères déviations sont appréciables dans l'obs-

curité pour l'employé qui les observe et les inscrit; et par ce système appliqué à la ligne décrite ci-dessus (875), on atteint aujourd'hui la même vitesse qu'avec les télégraphes terrestres.

Nous donnons plus loin un autre électromètre de M. W. Thomson, aussi à réflexion, mais destiné à mesurer l'électricité de tension (968).

* 877. **Moteurs electro-magnétiques.** — On a fait de nombreuses



tentatives pour utiliser la force attractive des électro-aimants comme force motrice dans les machines. La figure 736 représente une machine de ce genre construite par Froment. Elle se compose de quatre électro-aimants puissants A, B, C, D, fixés sur un bâti de fonte X. Entre ces électro-aimants est un système de deux roues de fonte, fixées sur un même axe horizontal, et portant sur leur contour huit armatures de fer doux M.

Le courant de la pile arrive en K, monte dans le fil E, et gagne un arc métallique O, qui sert à faire passer le courant successivement dans chaque électro-aimant, de manière que les attractions sur les armatures M ne se contrarient pas, mais soient toutes de même sens. Or cette condition ne peut être satisfaite qu'autant que le courant s'interrompt, dans chaque électro-aimant, au moment même où une armature passe devant ses bobines. Pour obtenir cette interruption, l'arc O porte trois pièces *e* à chacune desquelles est fixée une lame d'acier terminée par un petit galet. Deux de ces galets établissent la communication respectivement avec un électro-aimant, le troisième avec deux. Une garniture d'ivoire *a* porte des cames de métal sur lesquelles s'appuient alternativement les galets. Quand l'un d'eux porte sur une came, le courant passe dans l'électro-aimant correspondant, mais cesse de passer aussitôt que le contact n'a plus lieu. A sa sortie des électro-aimants, le courant revient à la pile par le fil H.

Par cette disposition, les armatures M étant successivement attirées par les quatre électro-aimants, le système de roues qui les porte prend un mouvement de rotation rapide, qui, par la roue P et une courroie sans fin, se transmet à la poulie Q, laquelle le communique enfin à une machine quelconque.

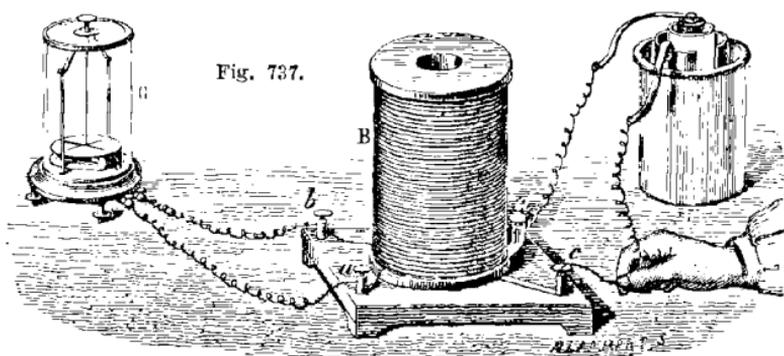
CHAPITRE X

INDUCTION

878. **Induction par les courants discontinus.** — On a vu (701) qu'on nomme *induction* l'action qu'exercent à distance les corps électrisés sur les corps à l'état neutre; mais c'est surtout quand il s'agit des effets produits par l'électricité dynamique que cette dénomination est usitée. Faraday, qui, le premier, en 1832, a fait connaître cette classe de phénomènes, a appelé *courants d'induction*, ou *courants induits*, des courants qui se développent dans les conducteurs métalliques, sous l'influence des courants électriques, et aussi sous l'influence des aimants puissants, ou même sous celle de l'action magnétique de la terre, et il a nommé *courants inducteurs* les courants qui agissent par induction.

L'induction ne se produit qu'au moment où le courant inducteur commence ou finit, ou qu'autant que sa puissance inductive varie, soit parce que l'intensité du courant croît ou décroît, soit parce que la distance augmente ou diminue.

On constate l'induction des courants, au moment de la fermeture et de l'ouverture du circuit qu'ils parcourent, au moyen d'une bobine à deux fils (fig. 737). On nomme ainsi un cylindre de carton ou de bois, sur lequel s'enroulent en hélice, d'abord un gros fil de cuivre, puis un plus fin, tous les deux recouverts de soie ou de coton. Le gros fil, qui ne fait qu'un petit nombre de tours, vient se terminer à deux bornes *c* et *d* fixées sur une planchette qui porte la bobine; tandis que le fil fin, qui recouvre le premier et qui fait un grand nombre de tours, aboutit à deux bornes *a* et *b*.



Ayant mis celles-ci en communication avec un galvanomètre, on fixe à la borne *d* une des électrodes d'une pile, et tenant à la main l'autre électrode, on la met en contact avec la borne *c*, ce qui fait passer le courant dans le gros fil, mais dans le gros fil seulement. Or on observe alors les phénomènes suivants :

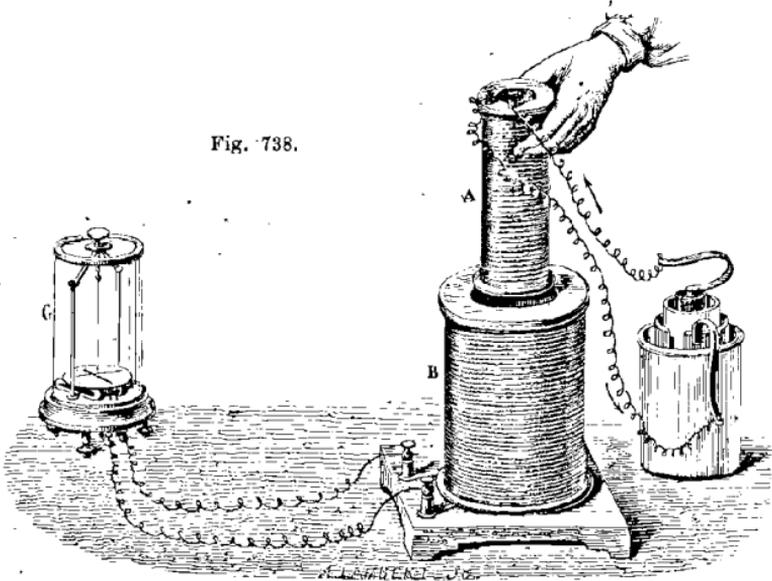
1° Au moment où le gros fil commence à être traversé par le courant, le galvanomètre indique dans le fil fin un courant *inverse* du premier, c'est-à-dire de sens contraire, lequel n'est qu'instantané, car l'aiguille revient aussitôt au zéro, et y reste tout le temps que le gros fil est parcouru par le courant inducteur.

2° A l'instant où le gros fil cesse d'être traversé par le courant, il se produit de nouveau, dans le fil fin, un courant induit, instantané comme le premier, mais *direct*, c'est-à-dire de même sens que le courant inducteur.

Ces phénomènes peuvent être assimilés à ceux qui ont été étudiés dans l'électricité statique sous le nom d'électrisation par influence (701); on peut, en effet, les considérer comme le résultat de la décomposition et de la recombinaison, molécule à molécule, de l'électricité neutre du fil induit par l'influence de l'électricité qui se propage dans le fil inducteur. Cette théorie de la production des courants induits est celle adoptée par de la Rive.

879. **Induction par les courants continus.** — Ce n'est pas seulement à la fermeture et à l'ouverture du courant inducteur qu'un courant induit se développe. Il suffit qu'un courant s'approche ou s'éloigne d'un circuit métallique fermé pour y faire naître un courant induit. Pour le démontrer, soient une bobine creuse B à

Fig. 738.



un seul fil fin et long (fig. 738), et une seconde bobine A à un seul fil aussi, mais gros et court, laquelle est de dimension telle, qu'elle peut se placer dans la première. La bobine A étant parcourue par un courant, si on la plonge brusquement dans la bobine B, un galvanomètre relié à cette dernière indique, par le sens de sa déviation, qu'il se produit instantanément dans la grosse bobine un courant *inverse*, qui cesse aussitôt, le galvanomètre revenant au zéro et y restant tout le temps que la petite bobine est dans la grosse. Mais si on la retire rapidement, le galvanomètre accuse dans le fil fin un courant induit *direct*.

Lorsque, au lieu d'introduire ou de retirer brusquement la bobine à gros fil, on l'approche ou on l'éloigne lentement, le galvanomètre n'indique qu'un courant faible, et d'autant plus faible, que le mouvement est plus lent, c'est-à-dire que l'action induisante a plus de durée.

Si, au lieu de faire varier la distance du courant inducteur, on fait varier son intensité, en augmentant ou en diminuant la résis-

tance du circuit, on remarque encore qu'il se produit dans le fil fin un courant induit, inverse si l'intensité du courant inducteur augmente, direct si elle diminue.

880. **Conditions pour qu'il y ait induction, loi de Lenz.** — En résumant les deux paragraphes qui précèdent, on en déduit ces lois :

1° *Un courant qui commence fait naître un courant induit inverse, c'est-à-dire de sens contraire.*

2° *Un courant qui finit produit un courant induit direct, ou de même sens.*

3° *Un courant qui se rapproche, ou dont l'intensité augmente, donne lieu à un courant induit inverse.*

4° *Un courant qui s'éloigne, ou dont l'intensité diminue, donne naissance à un courant induit direct.*

5° *La distance restant la même, un courant continu et constant ne développe pas d'induction dans un circuit voisin.*

6° Sur l'induction qui se produit entre un circuit fermé et un courant en activité, quand leur distance varie, Lenz a posé la loi suivante, connue sous le nom de *loi de Lenz*, laquelle comprend les lois 3 et 4 ci-dessus :

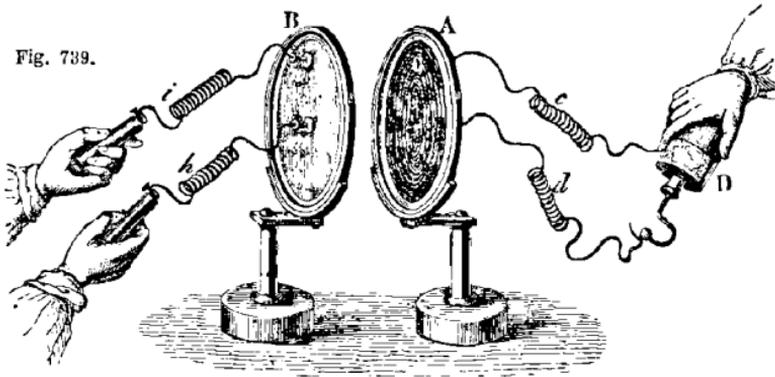
Lorsqu'un courant s'approche ou s'éloigne d'un circuit fermé, il se développe dans celui-ci un courant induit de sens tel, qu'en agissant suivant les lois de l'électro-dynamique (830) sur le courant inducteur, il lui ferait prendre un mouvement inverse de celui en vertu duquel il exerce son induction. Dans la théorie d'Ampère (848), cette loi s'applique également aux aimants.

On verra plus tard (906) que les courants induits direct et inverse sont égaux en quantité, mais ils ne le sont pas en durée et en tension; c'est le courant direct qui a le moins de durée et le plus de tension.

881. **Induction par l'électricité de frottement.** — L'électricité des machines électriques développe aussi des phénomènes d'induction. Avec l'appareil suivant, dû à Matteucci, on constate très-bien l'induction produite par la décharge d'une bouteille de Leyde. Il se compose de deux plateaux de verre, de 33 centimètres de diamètre, fixés dans deux cadres de laiton A et B (fig. 739) portés sur des pieds mobiles, qu'on approche ou écarte à volonté. Sur la face antérieure du plateau A est enroulé, en spirale, un fil de cuivre C, d'un millimètre de diamètre et de 25 à 30 mètres de longueur. Les deux bouts de ce fil passent au travers du plateau, l'un au centre, l'autre à la partie supérieure, et se terminent à deux pinces semblables à celles qui sont représentées en *m* et en *n* sur le plateau B. Dans ces pinces s'engagent deux fils de cuivre *c* et *d* recouverts de soie, destinés à recevoir le courant inducteur.

Sur la face du plateau B, en regard de A, s'enroule un fil de cuivre, aussi en spirale, mais plus fin que le fil C. Ses extrémités aboutissent aux pinces *m* et *n*, qui reçoivent deux fils *h* et *i* destinés à transmettre le courant induit. Les fils enroulés sur les plateaux A et B sont non-seulement recouverts de soie, mais chaque circuit est isolé du suivant par une couche épaisse de vernis à la

Fig. 739.



gomme laque, condition indispensable avec l'électricité des machines électriques, laquelle est toujours beaucoup plus difficile à isoler que celle des piles, à cause de sa plus grande tension.

Pour démontrer la production du courant induit par la décharge d'une bouteille de Leyde, on fait communiquer l'un des bouts du fil C avec l'armature extérieure de la bouteille, et l'autre avec le crochet; à l'instant où l'étincelle part, l'électricité qui passe dans le fil C agissant par influence sur l'électricité neutre du fil enroulé sur le plateau B, un courant instantané prend naissance dans ce fil. En effet, une personne qui tient dans les mains deux cylindres de cuivre en communication avec les fils *i* et *h*, reçoit une commotion dont l'intensité est d'autant plus forte, que les plateaux sont plus rapprochés; ce qui montre que l'électricité des machines électriques peut, aussi bien que celle de la pile, donner naissance à des courants d'induction.

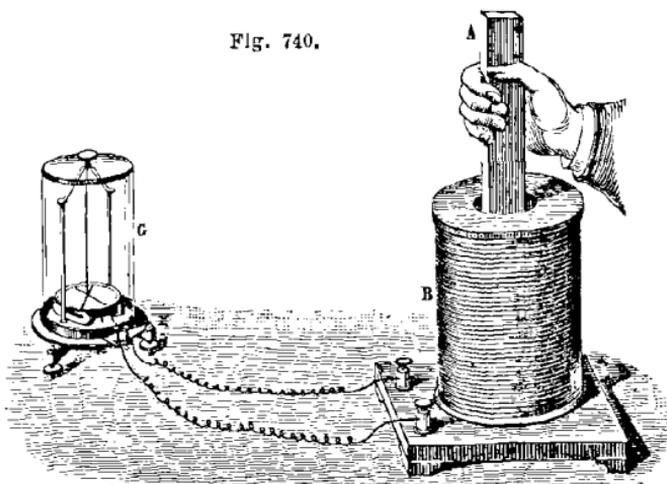
L'appareil de Matteucci peut aussi servir à démontrer l'induction par la variation de distance. Pour cela, on fait communiquer les fils *c* et *d* avec les pôles d'une pile, et les fils *i* et *h* avec un galvanomètre. Approchant alors ou écartant les plateaux, le galvanomètre fait voir qu'il y a courant induit sur le plateau B.

882. Induction par les aimants. — On a vu que l'influence d'un courant aimante un barreau d'acier (855); réciproquement un aimant peut faire naître, dans les circuits métalliques, des courants

d'induction. Faraday l'a démontré au moyen d'une bobine à un seul fil de 200 à 300 mètres de longueur, ouverte à l'intérieur et fixée sur une planchette (fig. 740). En dessous de celle-ci les deux bouts du fil arrivent à deux bornes, desquelles partent deux fils de cuivre qui établissent la communication avec un galvanomètre. Lorsqu'on introduit brusquement un fort barreau aimanté dans la bobine, on observe les phénomènes suivants :

1° Au moment où l'on introduit le barreau, le galvanomètre indique, dans le fil, un courant induit instantané, inverse de celui qui existe autour du barreau, en assimilant celui-ci à un solénoïde, comme on l'a fait dans la théorie d'Ampère (848).

Fig. 740.



2° Aussitôt qu'on retire le barreau, l'aiguille du galvanomètre, qui était revenue au zéro, indique un courant induit direct.

On peut encore constater l'influence inductrice des aimants par l'expérience suivante. On place dans la bobine à un seul fil un barreau de fer doux, et l'on approche brusquement un fort aimant; l'aiguille du galvanomètre dévie, revient au zéro aussitôt que l'aimant est fixe, puis dévie en sens contraire quand on l'éloigne. L'induction est ici produite par l'aimantation du fer doux, dans l'intérieur de la bobine, sous l'influence du barreau aimanté.

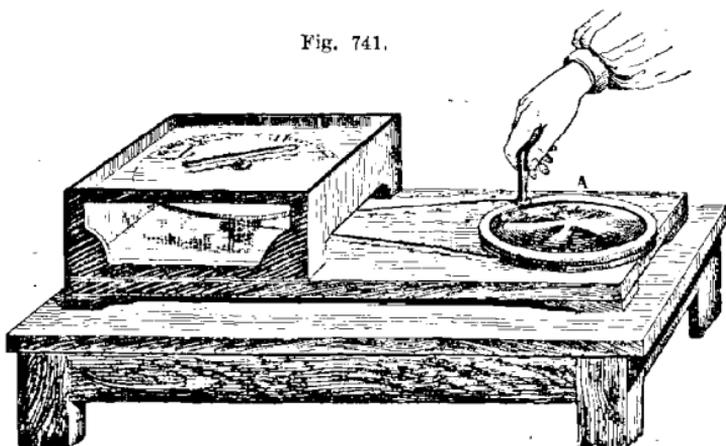
On obtient les mêmes effets d'induction dans le fil d'un électro-aimant, si, en avant des pôles de celui-ci, on fait tourner rapidement un fort barreau aimanté, de manière que ses pôles agissent successivement par influence sur ceux de l'électro-aimant; ou bien encore, en formant deux bobines autour d'un aimant en fer

à cheval, et en faisant tourner une plaque de fer doux avec rapidité devant les pôles de l'aimant; le fer doux, en s'aimantant par influence, réagit sur l'aimant, et il en résulte dans le fil des courants induits successivement de sens contraires.

L'induction par les aimants est une confirmation de la théorie d'Ampère sur le magnétisme. En effet, dans cette théorie, les aimants étant de véritables solénoïdes, toutes les expériences ci-dessus s'expliquent par l'induction des courants qui parcourent la surface des aimants. En un mot, l'induction par les aimants devient une induction par les courants.

883. **Induction par les aimants dans les corps en mouvement.** — Arago observa, le premier, en 1824, que le nombre d'oscillations

Fig. 741.



que fait une aiguille aimantée, dans des temps égaux, quand on l'écarte de sa position d'équilibre, est très-affaibli par le voisinage de certaines masses métalliques, et notamment du cuivre rouge, qui peut réduire le nombre des oscillations de 300 à 4. Cette observation conduisit le même physicien, en 1825, à un fait non moins inattendu : celui de l'action rotative qu'un disque de cuivre en mouvement exerce sur une aiguille aimantée.

On constate ce phénomène au moyen d'un disque de cuivre rouge M, mobile autour d'un axe vertical (fig. 741). Sur cet axe est une poulie B, autour de laquelle s'enroule un cordon sans fin qui va passer sur une poulie plus grande A. En faisant tourner celle-ci avec la main, on imprime au disque M un mouvement de rotation rapide. Au-dessus du disque est un carreau de verre fixe, auquel est adapté un pivot qui porte une aiguille aimantée *ab*. Or, si le disque tourne d'un mouvement lent et uniforme, l'ai-

guille dévie dans le sens du mouvement, et s'arrête à 20 ou 30 degrés du méridien magnétique, selon la vitesse de rotation du disque. Mais si cette vitesse augmente, l'aiguille finit par dévier de plus de 90 degrés : alors elle est entraînée, décrit une révolution entière, et suit le mouvement du disque jusqu'à ce qu'il s'arrête.

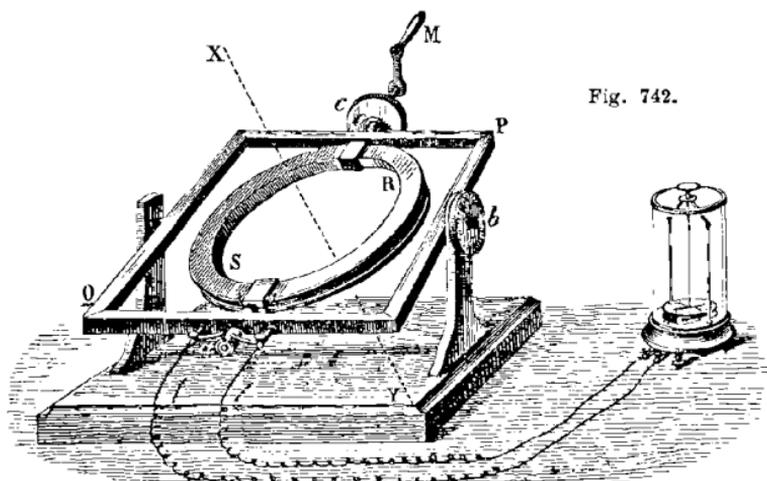
L'effet décroît à mesure que l'aiguille s'éloigne du disque, et varie beaucoup avec la nature de celui-ci. Le maximum a lieu avec les métaux ; avec le bois, le verre, l'eau, il est nul. Babbage et Herschel, en Angleterre, ont trouvé qu'en représentant par 100 l'action d'un aimant sur le cuivre, cette action, sur les autres métaux, l'est par les nombres suivants : zinc, 95 ; étain, 46 ; plomb, 25 ; antimoine, 9 ; bismuth, 2. Enfin, l'effet est très-affaibli si le disque présente des solutions de continuité, surtout dans le sens de ses rayons ; mais il reprend sensiblement la même intensité si l'on soude les solutions de continuité avec un métal quelconque.

Arago a reconnu que la force qui fait tourner l'aiguille est la résultante de trois autres forces : l'une, perpendiculaire au plan du disque, agit par répulsion sur l'aiguille ; la seconde, dirigée dans le sens du rayon du disque, agit d'abord par répulsion sur l'aiguille à partir de la circonférence du disque, puis décroît en s'approchant du centre, pour se changer en force attractive près de ce point, et devenir nulle en ce point même ; enfin, la troisième force, parallèle au plan du disque, est perpendiculaire en chaque point au rayon, et son action est attractive ; c'est donc cette dernière force qui fait tourner l'aiguille. Arago ne découvrit point l'origine de ces différentes forces ; c'est Faraday qui, en 1832, a fait voir qu'elles sont dues à des courants d'induction développés dans les disques par l'influence de l'aiguille aimantée (909).

884. Induction par l'action de la terre. — Faraday a reconnu, le premier, que le magnétisme terrestre peut développer des courants induits dans les corps métalliques en mouvement, en agissant comme un puissant aimant placé dans l'intérieur du globe, dans la direction de l'aiguille d'inclinaison ; ou plutôt, conformément à la théorie d'Ampère, comme un circuit de courants électriques dirigés de l'est à l'ouest parallèlement à l'équateur magnétique. Il le constata en plaçant une longue hélice de fil de cuivre recouvert de soie dans le plan du méridien magnétique parallèlement à l'aiguille d'inclinaison ; en faisant tourner cette hélice de 180 degrés autour d'un axe qui la traversait en son milieu, il observa qu'à chaque demi-révolution, un galvanomètre en communication avec les deux bouts de l'hélice indiquait un courant.

Pour démontrer les courants induits développés par l'action de la terre, Delezenne a construit l'appareil suivant, connu sous le

nom de *cerceau de Delezenne* (fig. 742). Il se compose d'un cerceau de bois RS, de près d'un mètre de diamètre, fixé à un axe oa , auquel on peut imprimer un mouvement de rotation plus ou moins rapide au moyen d'une manivelle M. L'axe oa est porté par un cadre PQ, mobile lui-même autour d'un axe horizontal. A l'aide d'aiguilles fixées à ces deux axes, un premier cercle gradué b indique l'obliquité du cadre PQ, et, par suite, de l'axe oa par rapport

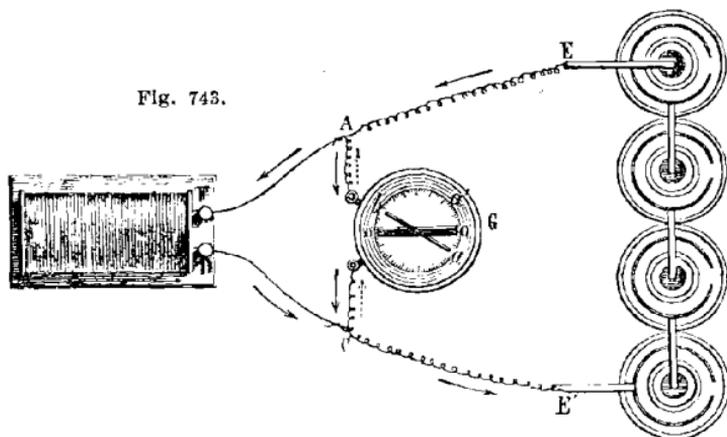


à l'horizon, et un deuxième cercle gradué c marque le déplacement angulaire imprimé au cerceau. Autour de celui-ci s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie, dont les deux bouts arrivent aux deux anneaux métalliques d'un commutateur α , analogue à celui de l'appareil de Clarke ci-après (900), et dont l'usage est de ramener le courant à être toujours de même sens, quoique sa direction change à chaque demi-révolution du cerceau. Enfin, sur les anneaux du commutateur s'appuient deux lames de laiton qui transmettent le courant à deux fils en communication avec un galvanomètre.

L'axe oa étant dans le méridien magnétique, et le cerceau RS perpendiculaire à la direction XY de l'aiguille d'inclinaison, si on lui imprime un mouvement de rotation lent, l'aiguille du galvanomètre dévie, et par l'angle de sa déviation indique, dans le fil qui entoure le cerceau, un courant induit dont l'intensité augmente jusqu'à ce qu'on ait tourné de 90 degrés; puis la déviation décroît et devient nulle quand le cerceau a fait une demi-révolution. Si le mouvement continue, le courant reparaît, mais en sens contraire, atteint un second maximum à 270 degrés, et de-

vient nul de nouveau après un tour complet. Si l'axe oa est parallèle à l'aiguille d'inclinaison, il ne se produit pas de courant.

885. **Induction d'un courant sur lui-même, extra-courant d'ouverture.** — Lorsqu'on ouvre un circuit fermé, parcouru par un courant, on n'obtient qu'une étincelle à peine sensible, si le fil qui réunit les deux pôles est court. Si l'on fait partie du circuit



en tenant dans chaque main une électrode, on ne ressent aucune commotion, à moins que le courant ne soit très-intense. Mais si le fil est long, et surtout s'il est enroulé un grand nombre de fois sur lui-même, de manière à former une bobine à plis serrés, l'étincelle, nulle à la fermeture du courant, acquiert, quand on l'ouvre, une grande intensité, et on reçoit alors une commotion d'autant plus forte, que le nombre des spires est plus grand.

Faraday a expliqué ce renforcement du courant au moment de la rupture, par une action inductrice que le courant, dans chaque spire, exerce sur les spires voisines, action en vertu de laquelle il se produit, dans toute la bobine, un courant induit direct, c'est-à-dire de même sens que le courant principal. C'est ce courant induit qu'on désigne sous le nom d'*extra-courant d'ouverture*.

Pour constater l'existence de l'*extra-courant* au moment de l'ouverture, Faraday a disposé l'expérience comme le montre la figure 743. Des pôles d'une pile partent deux fils de cuivre qui se rendent à deux bornes D et F, auxquelles aboutissent les bouts d'une bobine à fil fin B. Sur le parcours des fils, des points A et C, partent deux autres fils qui se rendent à un galvanomètre G. Par suite, le courant parti du pôle E se bifurque en A en deux courants, l'un qui traverse le galvanomètre, l'autre la bobine, pour revenir tous les deux au pôle négatif E'.

L'aiguille étant écartée de G en a' par le courant qui va de A en C, on la ramène au zéro, et on l'y maintient par un arrêt qui l'empêche de tourner dans le sens Ga' , mais la laisse libre dans le sens opposé. En rompant la communication en E, on remarque qu'à l'instant où le circuit est ouvert, l'aiguille dévie dans le sens Ga ; ce qui indique un courant contraire à celui qui avait lieu pendant l'établissement du courant, et allant par conséquent de C vers A. Or, le courant de la pile ayant cessé, le seul circuit fermé qui persiste est le circuit AFBDC, et puisque, dans la partie CA, un courant va de C en A, il faut donc qu'il parcoure tout le circuit dans le sens AFBDC, c'est-à-dire dans le même sens que le courant principal. Le courant qui apparaît ainsi au moment de l'ouverture du circuit est un extra-courant.

886. **Extra-courant de fermeture.** — Ce n'est pas seulement à l'instant où le courant finit que les spires d'une bobine, réagissant les unes sur les autres, donnent naissance à un extra-courant; il en est encore ainsi lorsqu'on ferme le circuit; seulement ici, d'après la loi générale de l'induction (878), le courant qui se développe est inverse, c'est-à-dire de sens contraire au courant principal. Il y a donc deux extra-courants: l'*extra-courant de fermeture*, ou *extra-courant inverse*, et l'*extra-courant d'ouverture*, ou *extra-courant direct*.

Les deux extra-courants sont de véritables courants induits, mais qui diffèrent des courants induits proprement dits, en ce que ceux-ci prennent naissance dans un fil voisin du fil inducteur, tandis que les extra-courants se développent dans le fil inducteur même.

L'extra-courant d'ouverture, de même sens que le courant principal, s'ajoute à lui et augmente l'étincelle de rupture; au contraire, l'extra-courant inverse, de sens contraire à celui du courant principal, en diminue l'intensité et annule l'étincelle au moment de la fermeture. C'est donc seulement à la rupture que l'extra-courant peut donner des effets puissants.

Pour recueillir l'extra-courant direct, on soude sur chacun des bouts du fil d'une bobine simple, c'est-à-dire à un seul fil, un second fil terminé par une plaque de cuivre; puis, tenant une plaque dans chaque main, ou les mettant en communication avec le conducteur qu'on veut soumettre à l'extra-courant, on fait passer dans le fil de la bobine le courant d'une pile. Or, à chaque interruption de celui-ci, il passe par les plaques un extra-courant qui donne de violentes commotions, de vives étincelles, décompose l'eau, fond le platine, et fait dévier l'aiguille aimantée.

Ces effets acquièrent une intensité encore plus énergique, si

l'on introduit dans la bobine un barreau de fer doux, ou, ce qui revient au même, si l'on fait passer le courant dans les bobines d'un électro-aimant. C'est encore là un phénomène d'induction dû à l'aimantation du fer doux dans l'intérieur de la bobine (882). En effet, à chaque désaimantation du fer, les courants d'Ampère développés à la surface réagissent sur la bobine, et y font naître un courant de même sens que l'extra-courant.

887. Induction dans les circuits non fermés. — Jusqu'ici, le courant inducteur a agi sur un circuit fermé. Avec un circuit ouvert, il y a encore induction; toutefois elle ne se manifeste plus par des courants, mais par une accumulation d'électricités contraires aux deux extrémités du circuit, *avec des tensions proportionnelles à l'intensité du courant inducteur et au produit des longueurs des circuits inducteur et induit.*

Par suite, si l'on rapproche les deux extrémités du fil induit, on observe identiquement les mêmes effets de tension que lorsqu'on rapproche les deux conducteurs d'une machine de Holtz. C'est-à-dire que les effets obtenus sont alors plutôt du domaine de l'électricité statique que de l'électricité voltaïque.

888. Courants induits de différents ordres. — Malgré leur instantanéité, les courants induits peuvent eux-mêmes, par leur influence sur les circuits fermés, donner naissance à de nouveaux courants induits, puis ceux-ci à d'autres, et ainsi de suite, de manière à produire des *courants induits de différents ordres.*

Ces courants, découverts par Henry, à New-Jersey, se constatent en faisant réagir les unes sur les autres une suite de bobines cylindriques à deux fils, comme celles de la figure 737, de manière que le courant induit de la première se rende dans le fil inducteur de la seconde, et ainsi de suite; ou bien à l'aide de bobines en spirale à un seul fil, comme celles de la figure 739, disposées de manière que le courant de la première induise la seconde, puis que le courant de celle-ci, se rendant à la troisième, induise la suivante, et ainsi successivement. Les courants qui se produisent alors sont alternativement de sens contraires, et leur intensité décroît à mesure qu'ils sont d'un ordre plus élevé.

CHAPITRE XI

BOBINE DE RUHMKORFF, SES EFFETS

889. Bobine d'induction de Ruhmkorff. — Ruhmkorff a construit pour la première fois, en 1851, des bobines à deux fils, de très-

grandes dimensions, à l'aide desquelles on parvient à faire produire aux courants d'induction, avec six à huit éléments de Bunsen, des effets physiques, chimiques et physiologiques équivalents et même supérieurs à ceux qu'on obtient avec les machines électriques et les batteries les plus puissantes.

Les dimensions de ces bobines sont variables ; les plus grandes que Ruhmkorff ait construites jusqu'ici ont 65 centimètres de long et 24 de diamètre. Toutes sont formées de deux fils : un gros, de 2 à 2,5 millimètres de diamètre, et un fin, d'un quart ou d'un

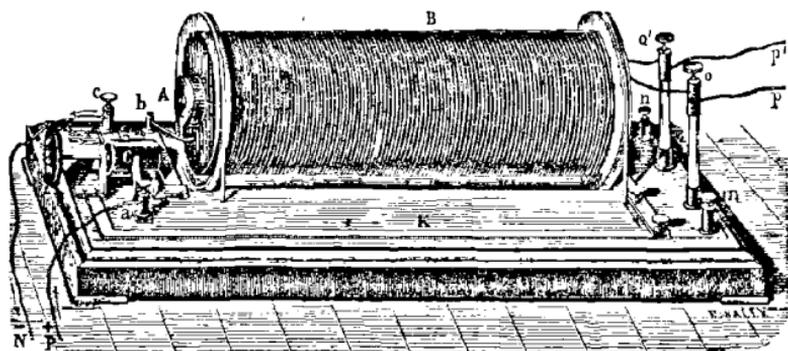


Fig. 744.

tiers de millimètre. Ces fils, qui sont de cuivre rouge, sont non-seulement recouverts de soie, mais chaque spire est isolée de la suivante par une couche de gomme laque fondue (fig. 744). C'est le gros fil qui est le fil inducteur, c'est-à-dire dans lequel passe le courant de la pile; sa longueur est de 40 à 50 mètres. C'est lui qui est enroulé le premier sur un cylindre creux de bois ou de carton, qui forme le noyau de la bobine. Le tout est renfermé dans un manchon de verre ou de caoutchouc isolant, et c'est sur cette enveloppe qu'on enroule le fil fin, qui est le fil induit, et dont la longueur varie avec les dimensions des bobines. Dans les grandes, le fil fin a jusqu'à 120 000 mètres de long; son diamètre est alors moindre que dans les petites bobines : $\frac{1}{3}$ de millimètre au lieu de $\frac{1}{2}$. En augmentant la longueur du fil fin, on gagne en tension; en augmentant son diamètre, on gagne en quantité. Pour faire marcher les petites bobines de 30 à 35 centimètres de longueur, il faut trois ou quatre éléments de Bunsen, grand modèle; pour les grandes bobines, Ruhmkorff estime qu'on doit adopter une surface de pile quatre fois plus grande que pour les petites.

Interrupteur à marteau. — Ces détails connus, voici comment marche l'appareil. Le courant de la pile, arrivant par le fil P à une

borne *a* (fig. 744), gagne de là le commutateur *C*, qui sera décrit ci-après; puis la borne *b*, d'où il entre enfin dans la bobine. Là, il parcourt le gros fil, où il agit par induction sur le fil fin. C'est ensuite à l'autre bout de la bobine, par le fil *s* (fig. 745), que le courant sort pour gagner l'interrupteur. En suivant la direction des flèches, on voit que le courant monte dans la borne *i*, gagne une pièce de fer oscillante *o*, qu'on appelle le *marteau*, descend par l'enclume *h*, et gagne une plaque de cuivre rouge *K*, qui le ramène au commutateur *C* (fig. 744). De là il se rend à la borne *c*,

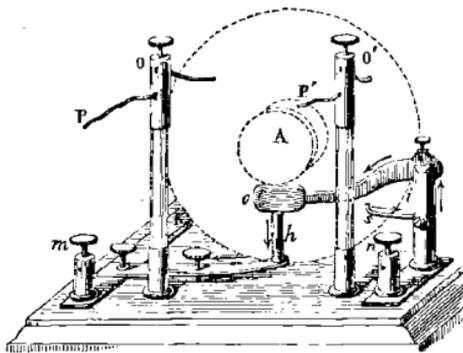


Fig. 745.

et enfin au pôle négatif de la pile par le fil *N*.

Or on sait (878) que le courant qui passe dans le gros fil n'agit par induction sur le fil fin que lorsqu'il commence ou qu'il finit. Il faut donc que ce courant soit constamment interrompu. C'est au moyen du marteau oscillant *o* (fig. 745) que ces interruptions s'ob-

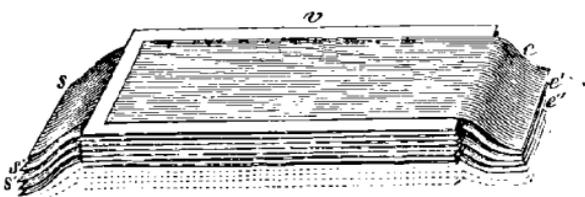
tiennent. En effet, au centre de la bobine, d'un bout à l'autre, est un faisceau de gros fils de fer doux, formant par leur ensemble un cylindre un peu plus long que la bobine, comme on le voit en *A*, aux deux extrémités. Ce faisceau s'aimantant dès que le courant de la pile passe dans le gros fil, le marteau *o* est attiré; mais aussitôt, le contact n'ayant plus lieu entre *o* et *h*, le courant se trouve interrompu, l'aimantation cesse et le marteau retombe; puis le courant passant de nouveau, la même série de phénomènes recommence; en sorte que le marteau se met à osciller avec une grande rapidité, ce qui produit les interruptions du courant. A mesure que le courant de la pile passe ainsi par intermittences dans le gros fil de la bobine, à chaque interruption un courant d'induction, successivement direct et inverse, se produit dans le fil fin. On a vu ci-dessus que ces courants ont d'autant plus de tension, que la bobine présente plus de résistance, et que, quoiqu'ils contiennent des quantités égales d'électricité, le courant direct l'emporte toujours en tension sur le courant inverse (886).

Par suite, si l'on met en contact les bouts *p*, *p'* du fil fin (fig. 744), des quantités égales et contraires d'électricité circulant dans le fil, les deux courants tendent à s'annuler. En effet, si l'on place

un galvanomètre dans le circuit, on ne remarque qu'une déviation extrêmement faible dans le sens du courant direct. Il n'en est plus de même si l'on écarte les deux extrémités p , p' , du fil. La résistance de l'air s'opposant au passage des courants, c'est celui qui a le plus de tension, c'est-à-dire le courant direct, qui passe en excès, et plus l'intervalle de p à p' augmente, plus le courant direct tend à passer seul, jusqu'à une limite où ni le courant inverse ni le courant direct ne passent. Il y a seulement alors en p et en p' des tensions alternatives de sens contraires.

Condensateur. — M. Fizeau a encore augmenté cette tension en interposant un condensateur dans le circuit inducteur. Ce con-

Fig. 746.



densateur se compose de feuilles d'étain superposées et isolées les unes des autres par des feuilles de fort papier v (fig. 746), plus larges que l'étain et trempées dans une dissolution de résine. De deux en deux, les feuilles d'étain débordent à un bout le papier en e , e' , e'' ..., et de l'autre en s , s' , s'' ...; de manière que, réunis par une pince, les étains de rang impair forment une armature du condensateur, et ceux de rang pair l'autre. Dans les grandes bobines, la surface de chaque armature atteint ainsi 20 mètres carrés. Le tout étant renfermé dans le socle de bois qui supporte la bobine, l'armature positive est en communication avec la borne i , qui reçoit le courant à sa sortie de la bobine, et la négative est en communication avec la borne m , qui communique elle-même par la lame K avec le commutateur C et avec la pile.

Pour comprendre l'effet du condensateur, observons qu'à chaque interruption du courant inducteur, il se produit un extra-courant de même sens que lui (885), lequel, le continuant en quelque sorte, prolonge sa durée, et, par suite, affaiblit la tension. C'est à cet extra-courant qu'est due l'étincelle qui éclate à chaque interruption entre le marteau et l'enclume, étincelle qui, lorsque le courant est fort, altère rapidement les surfaces de contact du marteau et de l'enclume, quoiqu'on ait soin que ces surfaces soient de platine. Au contraire, par l'interposition du condensateur dans le courant inducteur, l'extra-courant, au lieu de jaillir en étincelles

aussi fortes, s'élanche dans le condensateur, l'électricité positive sur l'armature qui communique avec i , et la négative sur l'armature qui communique avec m . Or les électricités contraires des deux armatures, se recombinaut aussitôt par le gros fil, par la pile et par le circuit CKm , donnent naissance à un courant contraire à celui de la pile, lequel désaimante instantanément le faisceau de fer doux; le courant induit est donc d'une plus courte durée (906), et par suite plus intense. Les bornes m et n placées à l'extrémité de la planchette servent à recueillir l'extra-courant.

Commutateur. — Le commutateur, représenté en coupe horizontale dans la figure 747, est tout

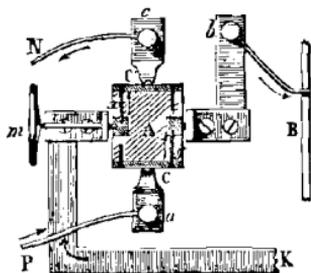


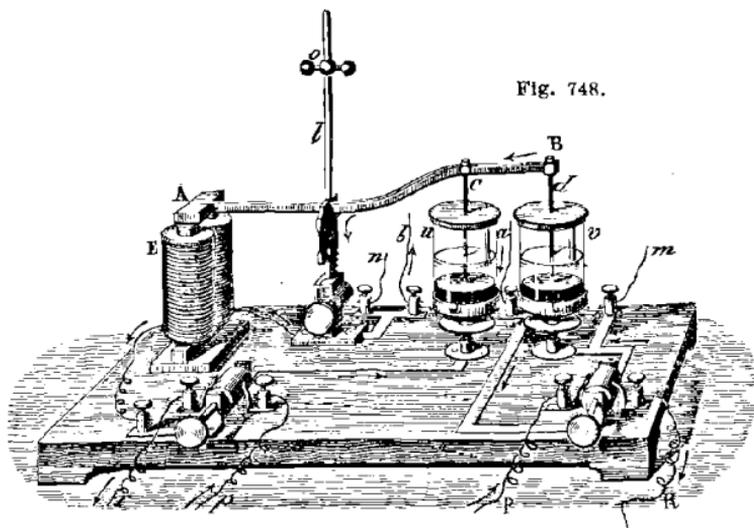
Fig. 747.

de cuivre, sauf le noyau central A, qui est un cylindre de bois; sur les deux côtés sont fixés deux contacts de cuivre C, C'. Sur ceux-ci s'appuient deux lames élastiques de laiton, liées aux deux bornes a et c , qui reçoivent les électrodes de la pile. Le courant de celle-ci arrivant en a , monte en C; de là, par une vis y , gagne la borne b et la bobine; puis, revenant par la lame K, qui communique avec le marteau, le courant va jusqu'en C' par la vis x , descend en c et retourne à la pile par le fil N. Si à l'aide du bouton m on tourne le commutateur de 180 degrés, il est facile de voir que c'est l'inverse qui a lieu: le courant gagne alors le marteau par la lame K et sort en b . Enfin, si l'on ne tourne que de 90 degrés, les lames élastiques ne s'appuient plus sur les contacts C, C', mais sur le cylindre de bois A, et le courant est interrompu.

Les deux fils qu'on voit sortir de la bobine en o , o' (fig. 745), sont les deux bouts du fil fin. Ils sont en communication avec deux fils plus gros P, P', qui servent à recueillir le courant induit et à le diriger où l'on veut. Avec de fortes bobines l'interrupteur à marteau oscillant est insuffisant, les surfaces de contact s'échauffant jusqu'à se souder. Foucault a remplacé l'interrupteur à marteau par un interrupteur à mercure qui ne présente pas cet inconvénient, et qui est un important perfectionnement à la bobine de Ruhmkorff.

890. **Interrupteur à mercure de Foucault.** — Cet appareil se compose de deux godets de verre u et v , dont le fond contient du mercure et au-dessus de celui-ci de l'alcool (fig. 748). Dans ces godets plongent deux tiges de platine c et d , fixées à un bras de levier B. A l'autre bras du même levier est une armature de

fer doux A, sollicitée par un électro-aimant E. Le levier AB est porté par une tige *l* montée elle-même sur une lame élastique d'acier, qui peut osciller librement à droite et à gauche, en transmettant son mouvement au levier et aux tiges *c* et *d*. Enfin, la lame et le levier peuvent être soulevés plus ou moins à l'aide



d'une crémaillère et d'un pignon, et le tout est monté sur une planchette avec deux commutateurs et différents conducteurs.

Ces détails connus, les tiges de platine plongeant dans le mercure, lorsqu'on fait arriver par le fil *p*, au commutateur correspondant, le courant d'une petite pile distincte de celle qui fait marcher la bobine, ce courant gagne le godet *u*, le levier BA, la lame d'acier, et de là le fil de l'électro-aimant, d'où il revient au même commutateur, puis à la pile, par le fil *r*. L'armature A étant alors attirée, la lame oscille vers A, les tiges *c* et *d* ne sont plus en contact avec le mercure, et le courant ne passant plus, l'électro-aimant devient inactif. La lame élastique oscillant aussitôt en sens contraire, les tiges de platine s'abaissent et le courant passe de nouveau. Les mêmes effets se reproduisent avec une rapidité de 50 à 60 oscillations par seconde, vitesse qu'on retarde ou qu'on accélère, en élevant ou en abaissant une masse *o*, qu'on peut faire glisser le long de la tige *l*.

Pour utiliser ces oscillations, le courant qui doit passer dans la bobine arrive, en P, au second commutateur, gagne le godet *v*, la tige *d*, le levier, la lame d'acier, et de là le fil *b*, qui le conduit

au gros fil de la bobine. Il en sort ensuite par le fil *a*, revient à son commutateur, et enfin à sa pile par le fil R.

Quant aux fils *m* et *n*, ils sont en communication avec les bornes *m* et *n* de la bobine (fig. 744), c'est-à-dire avec les deux armatures du condensateur.

L'alcool, dans l'interrupteur de Foucault, n'a pas seulement pour effet de s'opposer à l'échauffement par l'étincelle de rupture; il sert encore à s'opposer à l'oxydation aux points où elle éclate, en supprimant le contact avec l'oxygène de l'air.

891. Effets de la bobine de Ruhmkorff. — Ces effets, comme ceux des batteries et des piles, se divisent en effets *physiologiques*, *calorifiques*, *chimiques*, *lumineux* et *mécaniques*, mais avec cette différence qu'ils sont beaucoup plus intenses.

Effets physiologiques. — Ils sont tellement intenses, que les commotions que donnent les bobines moyennes, quand le gros fil est parcouru par le courant d'un seul couple de Bunsen, sont déjà insupportables. Avec deux couples de Bunsen on tue un lapin, et avec un nombre de couples peu considérable un homme serait foudroyé.

Effets calorifiques. — Pour les constater, on interpose entre les extrémités *p* et *p'* du fil induit (fig. 744) un fil de fer très-fin : celui-ci est fondu et brûlé avec une vive lumière. Si l'on termine chacun des fils *p* et *p'* par un fil de fer très-fin, lorsqu'on met les deux fils de fer en contact, il n'y a que celui qui correspond au pôle négatif qui se fonde; ce qui montre que la densité électrique est plus grande au pôle négatif qu'au pôle positif.

Effets lumineux. — Ces effets sont très-variés, suivant qu'ils ont lieu à la pression ordinaire, ou dans des gaz très-raréfiés, ou dans des vapeurs à très-faible tension. Dans l'air, ils consistent en une série d'étincelles vives et bruyantes, dont la longueur va jusqu'à 45 centimètres avec la grande bobine de 65 centimètres de longueur; dans l'air très-raréfié, les effets sont fort remarquables. Pour faire l'expérience, on fait communiquer les deux fils *p* et *p'* de la bobine avec les deux tiges de l'œuf électrique déjà décrit (735). Le vide étant fait dans le globe, à un ou deux millimètres au moins, on voit une belle traînée lumineuse se produire d'une boule à l'autre, d'une manière sensiblement continue et avec la même intensité que celle qu'on obtient avec une puissante machine électrique dont on tourne rapidement le plateau (fig. 756, page 837). La figure 754 représente la déviation par influence que subit la lumière électrique quand on approche la main de l'œuf.

C'est le pôle positif du courant induit qui présente le plus d'éclat; sa lumière est rouge de feu, tandis que celle du pôle négatif est

faible et violacée; de plus, cette dernière se prolonge tout le long de la tige négative, phénomène qui ne se produit pas au pôle positif.

Effets mécaniques. — La bobine de Ruhmkorff produit des effets mécaniques si puissants, qu'avec le grand appareil de 65 centimètres on perce une masse de verre de 5 centimètres d'épaisseur. L'expérience est alors disposée comme le montre la figure 749.

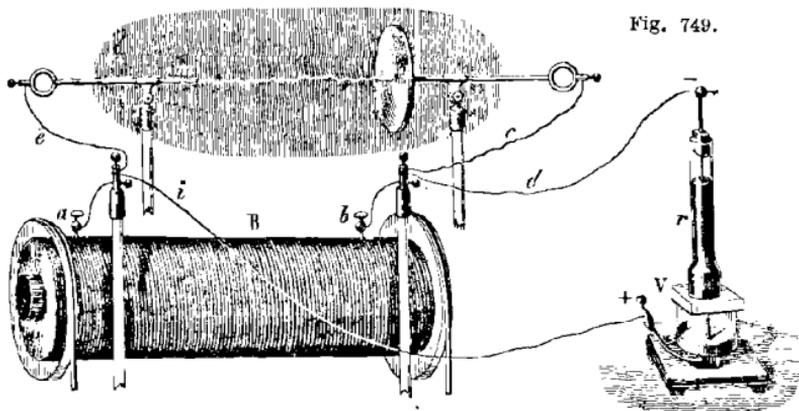


Fig. 749.

Les deux pôles du courant induit correspondant aux boutons *a* et *b*, on fait communiquer par un fil de cuivre *i* le bouton *a* avec le conducteur inférieur d'un perce-verre analogue à celui déjà décrit (fig. 620), puis le pôle *b* par le fil *d* avec le conducteur supérieur. Celui-ci est isolé dans un gros tube de verre *r* rempli de gomme laque qu'on y a coulée à l'état de fusion. Entre les deux conducteurs est la plaque de verre à percer *V*. Dans le cas où celle-ci présenterait une trop grande résistance, il est à craindre que l'étincelle n'éclate dans la bobine même en trouant la couche isolante qui sépare les fils, et alors la bobine serait mise hors d'usage. Pour éviter cet accident, deux fils *e* et *c* mettent les pôles de la bobine en communication avec deux tiges métalliques horizontales, plus ou moins espacées l'une de l'autre. Alors si l'étincelle ne peut trouer le verre, elle éclate de *m* en *n*, et la bobine est préservée.

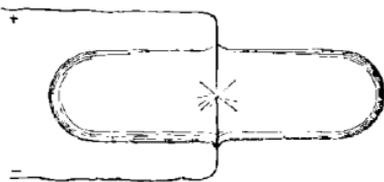


Fig. 750.

Effets chimiques. — MM. Ed. Becquerel et Freymy ont constaté les effets chimiques de la bobine de Ruhmkorff en en faisant éclater les étincelles entre les extrémités de deux fils de platine traversant les parois d'un tube de verre plein d'air et hermétiquement fermé (fig. 750). On trouve

ainsi que l'azote et l'oxygène de l'air se combinent lentement, en donnant naissance à de l'acide nitreux; mais les effets chimiques de l'étincelle présentent l'inconvénient d'être compliqués d'effets calorifiques et d'effets mécaniques. Ces effets nuisibles disparaissent dans l'*effluve électrique*, décrite ci-après (892).

Charge des batteries. — La bobine de Ruhmkorff peut aussi

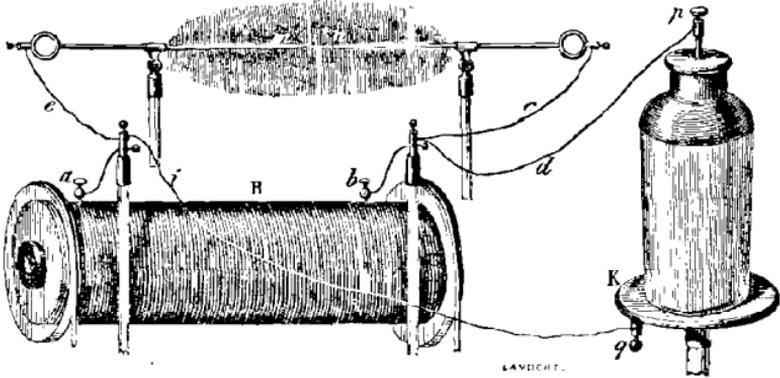


Fig. 751.

être appliquée à charger des bouteilles de Leyde, et même des batteries de plusieurs jarres. La figure 751 fait voir comment on dispose l'expérience avec la bouteille. Les armatures de celle-ci

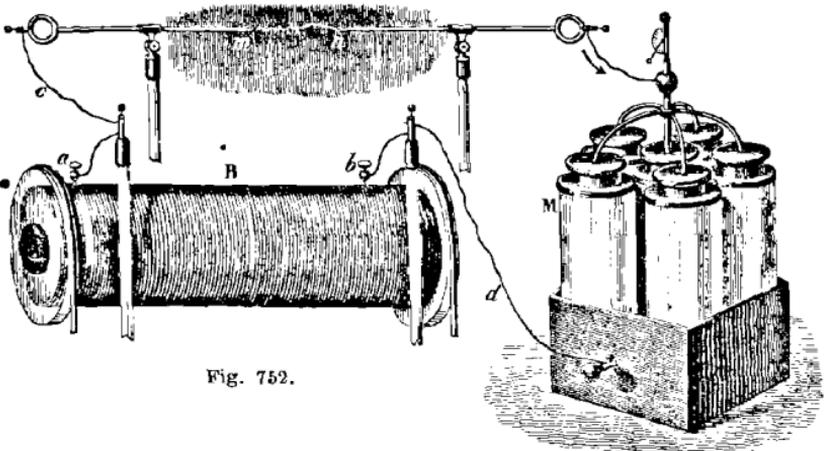


Fig. 752.

sont respectivement en communication avec les pôles de la bobine par les fils *d* et *i*, tandis que ces mêmes pôles communiquent par les fils *e* et *c* avec deux tiges horizontales d'un excitateur universel (fig. 611). La bouteille se chargeant constamment par

les fils i et d , tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, elle se décharge au fur et à mesure par les fils e et c , la décharge ayant lieu de m en n sous la forme d'une étincelle de 6 centimètres de longueur, très-éclatante et d'un bruit assourdissant; car ce ne sont plus là des étincelles comparables à celles des machines électriques, mais plutôt à des coups de foudre.

Pour la charge de la batterie, l'expérience est disposée autrement, l'armature extérieure étant en communication avec un des pôles de la bobine par le fil d (fig. 752), et l'armature intérieure avec l'autre, par les tiges m , n , et par le fil c . Toutefois les tiges m et n ne sont pas en contact. Si elles l'étaient, les deux courants inverse et direct passant également, la batterie ne se chargerait pas; tandis qu'à cause de l'intervalle entre m et n , le courant direct, ou d'ouverture, qui a plus de tension, passe seul, et c'est lui qui charge la batterie. Avec la grande bobine, une batterie de 6 jarres, de 30 décimètres carrés d'armature chacune, se charge pour ainsi dire instantanément.

* 892. **Effluve électrique.** — On nomme *effluve électrique* le passage silencieux et sans chaleur apparente de l'électricité à travers un milieu gazeux. Cette effluve, à l'aide de laquelle des effets chimiques remarquables ont été obtenus récemment, a été découverte par M. du Moncel, en 1853, de la manière suivante.

Ce savant fixe, l'une en face de l'autre, à la distance de 2 à 3 millimètres, deux feuilles de verre à vitre, recouvertes extérieurement chacune d'une feuille d'étain, de manière à former un condensateur dont les armatures sont séparées par une double feuille de verre et par la couche d'air interposée, laquelle doit être parfaitement desséchée. Mettant les deux feuilles d'étain respectivement en communication avec les pôles o , o' de la bobine de Ruhmkorff (fig. 744), un flux lumineux, bleuâtre, remplit tout l'espace compris entre les deux feuilles de verre : c'est l'*effluve électrique*.

M. du Moncel explique ce phénomène en admettant que, sous l'influence de la condensation, les molécules du verre et de l'air interposé se polarisent à la manière des molécules liquides dans l'électrolyse (791), et conduisent ainsi la décharge d'une face à l'autre des feuilles de verre.

M. Jean a fait voir que, soumis à l'effluve électrique, l'acide carbonique se dédouble en oxygène ozoné et en oxyde de carbone.

MM. Thénard, père et fils, en expérimentant sur un mélange de 3 volumes d'hydrogène et 1 d'azote, ont obtenu, après une effluve de deux heures, une production d'ammoniaque assez abondante pour être sensible à l'odorat. De plus, d'après les mêmes

savants, non-seulement la réaction par l'effluve, entre l'hydrogène et l'oxyde de carbone, et celle entre l'acide carbonique et le protocarbure d'hydrogène sont d'ordre organique, mais d'ordre organique avancé.

893. **Expérience de Hittorf.** — On a vu (700) que la question de savoir si l'électricité se propage dans le vide absolu a été débattue depuis longtemps entre les physiciens. On admet généralement aujourd'hui, d'après les expériences de Masson en 1851, et plus tard celles de M. Grove, puis de M. Gassiot, que la présence d'un milieu pondérable est nécessaire à la propagation de l'électricité. Hittorf a confirmé cette opinion au moyen de la bobine de Ruhmkorff. Il soude aux extrémités d'un petit tube de verre deux fils de platine, dont les bouts, à l'intérieur, ne sont distants que d'un demi-millimètre; puis il fait dans le tube le vide le plus parfait possible, soit par l'absorption de l'acide carbonique, soit

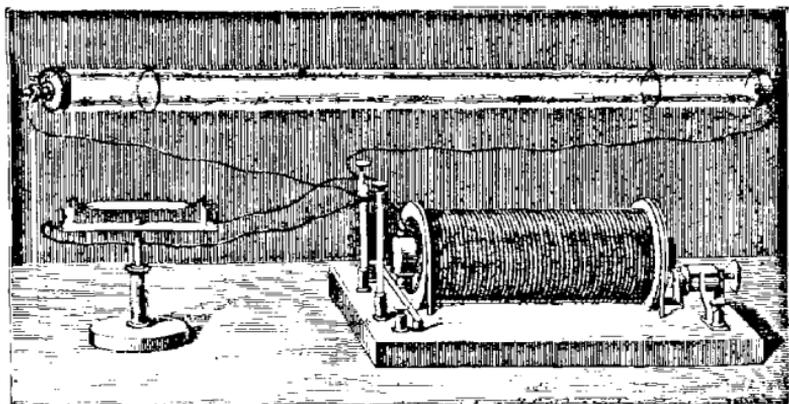


Fig. 753.

par la condensation de la vapeur de soufre, soit par d'autres procédés. Mettant ensuite les deux fils de platine en communication avec les deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff de 25 à 30 centimètres de longueur, il fait communiquer les mêmes pôles avec les extrémités d'un tube de verre de 3 mètres de longueur, dans lequel le vide a été fait à deux millimètres (fig. 753). Or, lorsqu'on fait marcher la bobine, l'étincelle n'éclate pas entre les deux fils de platine du petit tube; mais une longue trainée lumineuse apparaît d'un bout à l'autre du grand, ce qui fait voir la grande résistance que le vide présente au passage de l'électricité, et encore n'est-ce sans doute pas le vide absolu. En effet, avec une bobine plus forte l'étincelle éclate entre les fils de platine, ce qui,

du reste, peut avoir pour cause la vaporisation du métal. On ne peut donc pas dire, jusqu'ici, que la non-conductibilité du vide soit absolue, puisque des tubes qu'on regarde comme vides résistent à une certaine étincelle, mais en laissent passer une plus forte.

Les recherches sur la non-conductibilité du vide ont conduit à ce fait que les gaz qui conduisent mal l'électricité à la pression ordinaire, la conduisent mal encore si elle est trop faible, et qu'il y a un degré de raréfaction pour lequel la conductibilité est maximum. Pour l'hydrogène, de tous les gaz le meilleur conducteur, ce maximum a lieu à une pression voisine de 2 millimètres.

* 894. **Stratification de la lumière électrique.** — En étudiant la

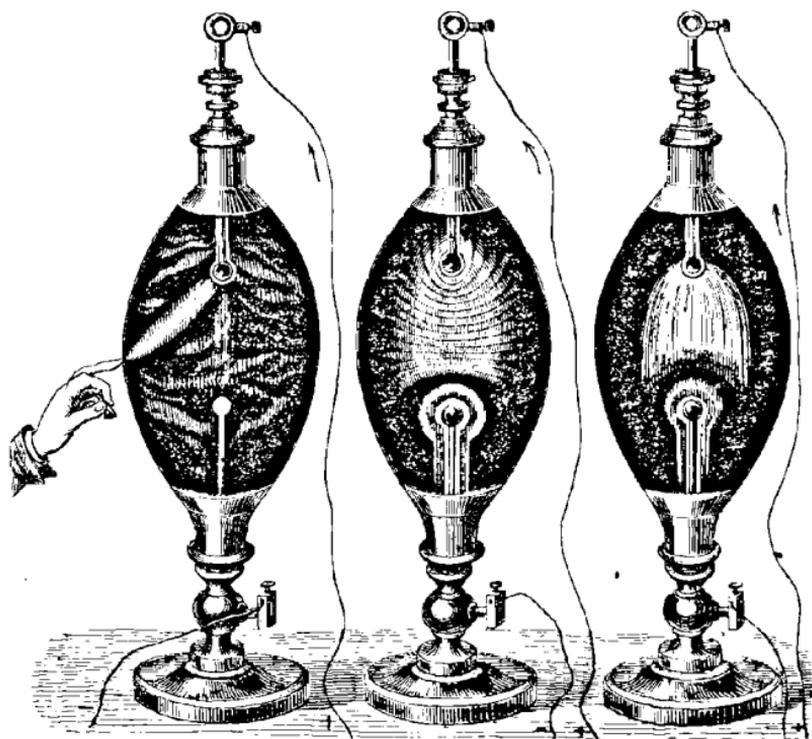


Fig. 754.

Fig. 755.

Fig. 756.

lumière électrique que donne la bobine de Ruhmkorff, M. Quet a observé que si l'on ne fait le vide dans l'œuf électrique qu'après y avoir introduit de la vapeur d'essence de térébenthine ou d'esprit de bois, d'alcool, de sulfure de carbone, etc., l'aspect de la lumière est complètement modifié. Elle apparaît alors sous la forme

de zones alternativement brillantes et obscures, formant comme une pile de lumière électrique entre les deux pôles (fig. 755).

Dans cette expérience, il résulte de la discontinuité du courant d'induction que la lumière n'est pas continue, mais consiste en une suite de décharges d'autant plus rapprochées, que le marteau *o* (fig. 745) oscille plus rapidement. Les zones lumineuses paraissent alors animées d'un double mouvement giratoire et ondulatoire rapide. M. Quet regarde ce mouvement comme une illusion d'optique, se fondant sur ce que, si l'on fait osciller lentement le marteau avec la main, les zones apparaissent très-nettes et fixes.

De la Rive admettait que la stratification de la lumière électrique est un phénomène analogue à la production des ondes sonores; c'est-à-dire un phénomène mécanique provenant d'une succession d'impulsions isochrones, exercées par les décharges successives sur la colonne gazeuse raréfiée.

La lumière du pôle positif est plus souvent rouge, et celle du pôle négatif violette. Toutefois la teinte varie avec la vapeur ou le gaz qui se trouve dans le globe.

Despretz a observé que les phénomènes constatés par Ruhmkorff et par M. Quet avec un courant discontinu se reproduisent avec un courant continu, mais avec cette différence, que le courant continu exige un nombre de couples de Bunsen assez considérable, tandis que le courant discontinu de la bobine de Ruhmkorff n'en exige qu'un petit nombre. C'est même un fait constaté par l'expérience, que l'intensité des effets lumineux de cette bobine augmente peu quand on multiplie le nombre des couples de la pile.

* 895. **Tubes de Geissler.** — C'est surtout lorsqu'on fait passer la décharge de la bobine dans des tubes de verre contenant une vapeur ou un gaz très-raréfiés, que la stratification de la lumière électrique présente un éclat remarquable. Ces phénomènes, qui ont été étudiés par Masson, Grove, Gassiot, Plücker, etc., se produisent dans des tubes fermés, de verre ou de cristal, construits pour la première fois par Geissler. On y introduit un gaz ou une vapeur; puis, avant de les fermer, on y fait le vide à un demi-millimètre au moyen d'une machine pneumatique à mercure (186). Enfin, aux deux extrémités des tubes sont soudés deux fils de platine qui y pénètrent de 1 à 2 centimètres.

Aussitôt qu'on fait communiquer ces fils avec les pôles de la bobine de Ruhmkorff, il se produit, dans toute la longueur du tube, de magnifiques stries brillantes, séparées par des bandes obscures. Ces stries varient de forme, de couleur et d'éclat avec le degré de vide, la nature du gaz ou de la vapeur, et les dimensions des tubes.

Souvent le phénomène prend encore un plus bel aspect par la fluorescence que la décharge électrique excite dans le verre (621).

La figure 757 représente les stries données par l'hydrogène, à un demi-millimètre de pression, dans un tube alternativement

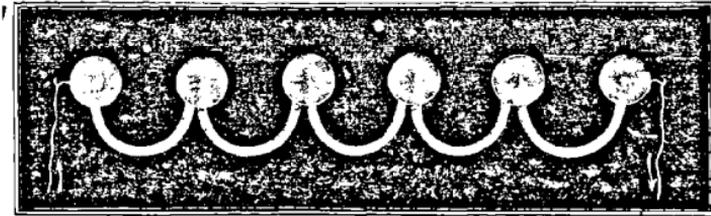


Fig. 757.

renflé et étroit; dans les boules, la lumière est blanche; dans les parties capillaires, elle est rouge.

La figure 758 montre les stries dans l'acide carbonique à un quart de millimètre de pression; la couleur est verdâtre, et les

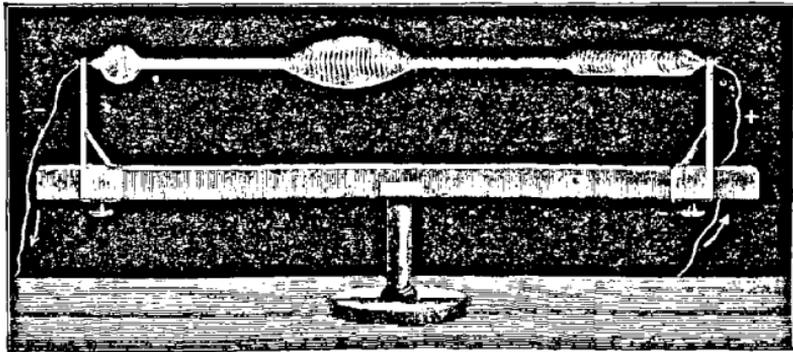


Fig. 758.

stries n'ont pas la même forme que dans l'hydrogène. Dans l'azote, la lumière est jaune-rouge.

Plücker, qui a étudié la lumière des tubes de Geissler, a trouvé qu'elle ne dépend pas de la substance des électrodes, mais de la nature du gaz ou de la vapeur qui est dans le tube. Il a constaté aussi que les lumières fournies par l'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, etc., différent beaucoup, quant au spectre qu'elles fournissent, quand on les fait passer au travers d'un prisme.

A l'aide d'un puissant électro-aimant, Plücker a soumis la décharge électrique, dans les tubes de Geissler, à l'action du magnétisme, comme Davy l'avait fait pour l'arc voltaïque. Ne pouvant

décrire ici toutes les expériences de ce savant, nous mentionnerons seulement, dans le cas où la décharge est perpendiculaire à la ligne des pôles, la séparation de cette décharge en deux parties distinctes, phénomène qui peut s'expliquer par l'action opposée de l'électro-aimant sur les deux extra-courants d'ouverture et de fermeture qui se trouvent dans la décharge.

* 896. **Application des tubes de Geissler.** — On a fait l'application des tubes de Geissler à la pathologie. Un long tube capillaire étant soudé à deux boules munies de fils de platine, on recourbe ce fil en son milieu de manière que les deux branches se touchent, et l'on enroule leur extrémité en spires serrées, comme on le voit en *a* (fig. 759).

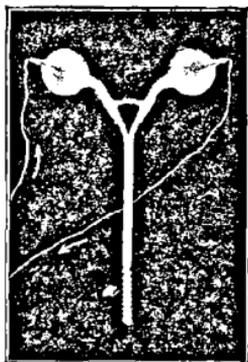


Fig. 759.

Le tube ainsi préparé contenant, comme ceux décrits ci-dessus, un gaz très-raréfié, aussitôt que la décharge passe, il se produit en *a* une lumière assez vive pour éclairer les fosses nasales, la gorge ou toute autre cavité du corps humain où l'on introduit le tube.

* 897. **Fusée de Statham.** — M. Statham, ingénieur anglais, a trouvé qu'un fil de cuivre AB (fig. 760) étant recouvert de gutta-percha sulfurée, au bout de quelques mois il se forme, au contact

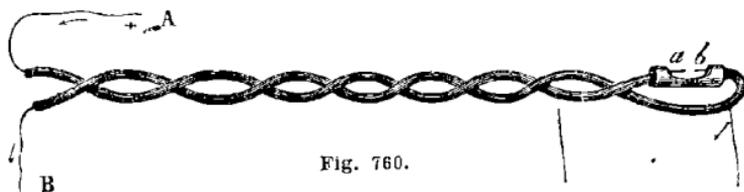


Fig. 760.

du métal et de son enveloppe, une couche de sulfure de cuivre qui suffit pour conduire le courant. En effet, si, en une partie quelconque du circuit, on coupe la moitié supérieure de l'enveloppe, puis que, dans l'échancrure *ab* ainsi formée, on enlève un morceau du fil de cuivre de 6 millimètres de longueur, un courant intense qui passe dans le fil est interrompu de *a* en *b*, mais passe par le sulfure qui adhère à la gutta, et le fait entrer en ignition. D'où il résulte que si, dans la cavité ainsi creusée, on met un corps inflammable, comme du coton-poudre, ou de la poudre à canon, ce corps prend feu : de là le nom de *fusée de Statham*.

Si l'on veut faire marcher la fusée de Statham avec une pile,

celle-ci doit être puissante. Mais si, au lieu d'une pile, on fait usage de la bobine de Ruhmkorff, on obtient les mêmes effets avec deux couples de Bunsen. C'est alors le courant induit de cette bobine qui entre en A et sort en B. On constate donc ainsi les effets calorifiques des courants d'induction.

CHAPITRE XII

APPLICATION DES COURANTS D'INDUCTION

898. **Machines magnéto-électriques et machines dynamo-électriques.** — On nomme *machines magnéto-électriques* des appareils dans lesquels des courants se développent par l'induction de forts barreaux aimantés tournant devant des bobines fixes, ou par l'induction d'aimants fixes devant lesquels tournent des bobines avec une grande vitesse : telles sont les machines de Pixii, de Clarke, de Nollet et de Gramme décrites ci-après ; tandis qu'on appelle *machines dynamo-électriques* des appareils sans aimants, dans lesquels les courants paraissent se former seulement par l'effet d'un mouvement rapide ; mais on verra qu'en réalité, les courants sont dus ici au magnétisme terrestre, ou à un magnétisme rémanent (857) : telle est la machine de Ladd décrite à la suite des précédentes (904).

Toutes ces machines, en remplaçant le travail électro-chimique de la pile par un travail mécanique, offrent un exemple remarquable de la corrélation des forces physiques ; et, à l'époque même où vient d'être adoptée la théorie dynamique de la chaleur, elles en sont une éclatante confirmation, en faisant voir que le mouvement peut se transformer non-seulement en chaleur, mais en courants électriques puissants, et, par suite, en lumière et en magnétisme.

899. **Machine de Pixii.** — Aussitôt la découverte des courants d'induction par Faraday (878), à une époque où le principe de la corrélation des forces physiques était encore inconnu, on chercha à produire de l'électricité par l'induction d'aimants en mouvement. Pixii, en France, construisit le premier, en 1833, une machine de ce genre qui porte son nom. Cet appareil se compose d'un électro-aimant fixe BB' , supporté par deux colonnes de bois (fig. 761). Au-dessous est un faisceau aimanté, en fer à cheval, porté par un axe vertical, auquel on imprime un mouvement de rotation rapide à l'aide de deux roues d'angle et d'une

manivelle. Les pôles a et b du faisceau, rasant alors le fer doux des bobines B, B' , l'aimantent par induction successivement en sens contraires. Or le fer doux, à chaque aimantation et à chaque désaimantation, fait naître dans le fil des bobines des courants in-

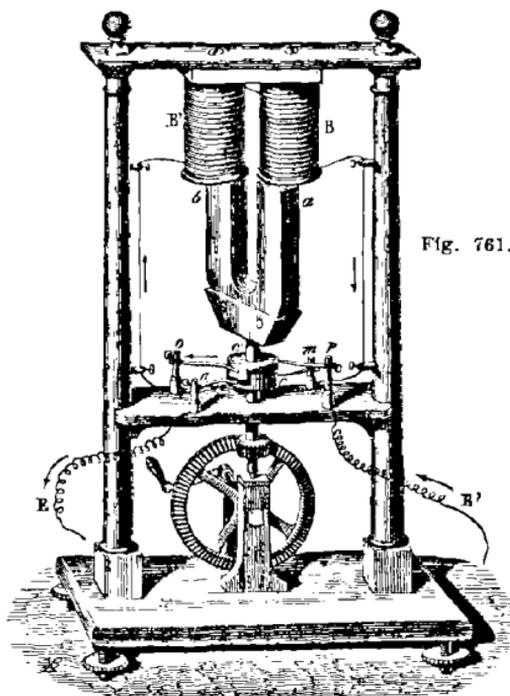


Fig. 761.

duits qui se propagent dans les fils parallèles aux colonnes, gagnent un commutateur cc' , et de là les fils E, E' . On va voir ci-après (900) que pendant une révolution complète du faisceau aimanté, il se produit en réalité deux courants de sens contraires, mais que, par l'effet du commutateur cc' , ces courants sont ramenés à être toujours de même sens dans les fils E, E' .

Quant à la théorie de ces courants, comme elle est identiquement la même que celle des courants qu'on obtient dans l'appareil de Clarke, nous renvoyons à ce

que nous allons dire de cet appareil, le seul en usage aujourd'hui.

900. **Machine de Clarke.** — Cet appareil est formé d'un faisceau aimanté A (fig. 762), très-puissant, recourbé en fer à cheval, et appliqué verticalement le long d'une planchette. En avant sont deux bobines B, B' , mobiles autour d'un axe horizontal. Ces bobines sont enroulées sur deux cylindres de fer doux, reliés entre eux, à l'extrémité antérieure, par une plaque épaisse V , aussi de fer doux, et à l'autre extrémité, en regard du faisceau, par une plaque de laiton. A la première plaque est fixé un axe de cuivre qui porte un commutateur qo , décrit ci-après (fig. 768 et 769); et à la plaque de laiton est fixé un axe portant, derrière la planchette, une poulie à laquelle on transmet le mouvement au moyen d'une courroie sans fin et d'une grande roue R .

Chaque bobine est formée d'un fil de cuivre très-fin, recouvert de soie, et faisant jusqu'à 1 500 tours. Les deux bouts antérieurs

des fils des bobines viennent se souder à l'axe k (fig. 769), et les deux autres bouts à une virole de cuivre q , qui est fixée à cet axe, mais qui en est isolée par un cylindre d'ivoire J . On a soin que, dans les bouts qui se réunissent, le courant induit soit de même

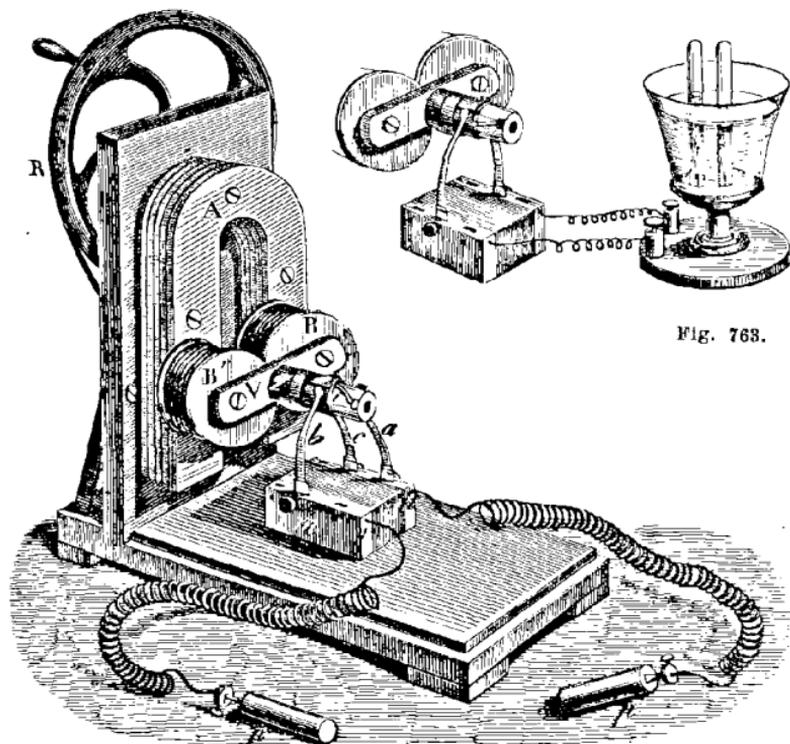


Fig. 763.

Fig. 762.

sens, ce qui s'obtient en enroulant les fils en sens contraires sur les deux bobines; c'est-à-dire que l'une est *dextrorsum* et l'autre *sinistrorsum* (855).

Production du courant dans les bobines. — Les courants qui se développent dans les bobines B , B' ont surtout pour cause l'aimantation alternativement de sens contraires de leurs noyaux de fer doux, en passant devant les pôles du faisceau aimanté, aimantation d'où résulte, dans chaque fil, un courant induit qui change de direction à chaque demi-révolution. En effet, suivons une des bobines, B par exemple, pendant une révolution complète devant les pôles du faisceau aimanté, en convenant de représenter par a et b les pôles de celui-ci, et par a' et b' ceux que prend successivement l'extrémité du fer de la bobine. De

plus, considérons cette dernière au moment où elle vient de passer devant le pôle austral a du faisceau (fig. 764). Le noyau de fer doux de la bobine, voisin du pôle austral de l'aimant, possède alors un pôle boréal dans lequel on sait que les courants d'Ampère sont dirigés dans le sens des aiguilles d'une montre

Fig. 764.

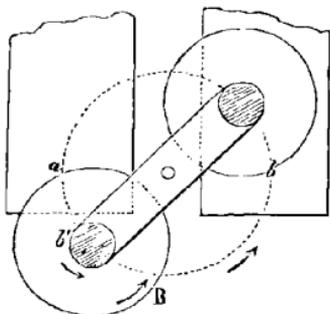


Fig. 765.

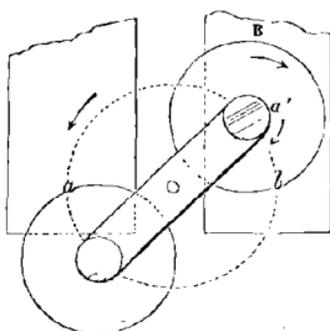
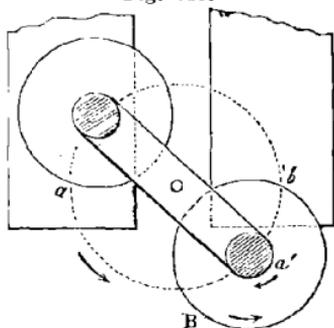


Fig. 766.

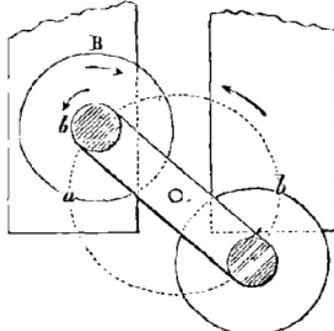


Fig. 767.

(849). C'est le contraire qui semble indiqué par la flèche b' , parce que les bobines sont vues ici comme dans la figure 762, et que ce serait en les regardant par le bout qui rase l'aimant que les courants d'Ampère paraîtraient tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. Cela posé, ces courants agissent par induction sur le fil de la bobine pour y faire naître un courant direct, c'est-à-dire de même sens; car la bobine s'éloignant du pôle a , son fer se désaimante, et les courants d'Ampère vont cesser (880, 4°). L'intensité du courant induit dans la bobine va donc en décroissant jusqu'à ce que la droite qui joint les axes des bobines soit perpendiculaire à celle qui joint les pôles a et b du faisceau. A ce moment, le magnétisme est nul dans le fer; mais aussitôt, s'approchant du pôle b , il s'aimante en sens contraire, et prend un

pôle austral (fig. 765). Or les courants d'Ampère sont alors dirigés dans le sens de la flèche a' ; et comme ils commencent, ils développent dans le fil de la bobine un courant inverse (880, 1^o), lequel se trouve être de même sens que celui qui est développé dans le premier quart de révolution. De plus, ce second courant se superpose au premier, puisque en même temps que la bobine s'éloigne de a , elle s'approche de b . En résumé, pendant la demi-révolution inférieure de a en b , le fil de la bobine a été successivement parcouru par deux courants induits de même sens; et si le mouvement est assez rapide, on peut pendant cette demi-révolution admettre un courant unique.

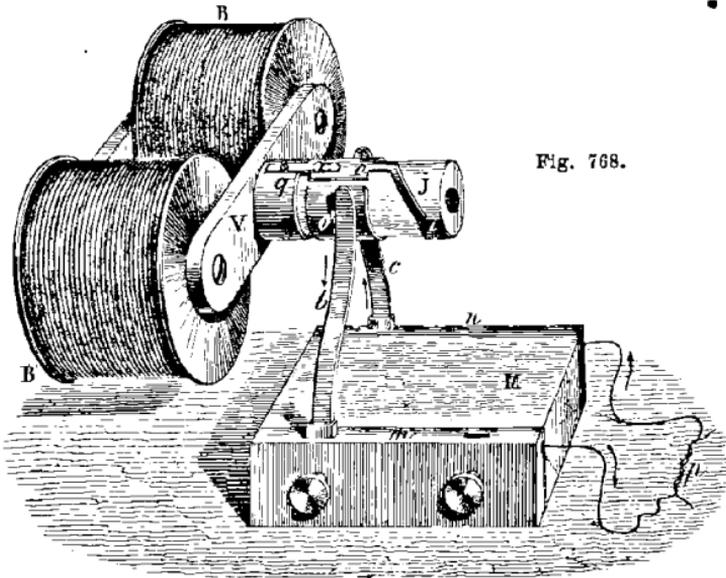
Le même raisonnement, appliqué aux figures 766 et 767, fait voir que, pendant la demi-révolution supérieure, le fil est encore parcouru par un seul courant, mais de direction opposée à celle du courant pendant la demi-révolution inférieure. D'ailleurs tout ce qui vient d'être dit de la bobine B s'applique évidemment à la bobine B'. Enfin, les bobines étant l'une *dextrorsum*, l'autre *sinistrorsum*, pendant chaque demi-révolution inférieure ou supérieure, les courants sont constamment de même sens dans les deux. A la demi-révolution suivante, ils changent tous les deux, mais sont encore de même sens l'un par rapport à l'autre.

Nous avons dit ci-dessus que l'aimantation alternativement de sens contraires des noyaux des bobines est la principale cause du courant induit qui se produit, or elle n'est pas la seule : le rapprochement et l'éloignement successifs entre les pôles du faisceau aimanté et les bobines mêmes, abstraction faite de leurs noyaux, en est une autre. En regardant les aimants comme des solénoïdes et en appliquant ici la loi de Lenz (880), il est facile de reconnaître que cette deuxième induction est de même sens que la première, mais elle est moins puissante.

Ce second effet d'induction se rencontre dans toutes les machines magnéto-électriques décrites ci-après.

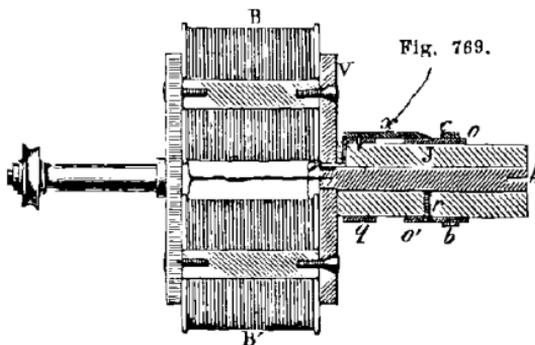
Commutateur. — Les figures 768 et 769 donnent, sur une plus grande échelle, une vue perspective et une coupe horizontale du commutateur de Clarke. Destiné à redresser les courants alternatifs qui se développent dans les deux bobines, c'est-à-dire à les ramener à être toujours de même sens dans les lames b et c (fig. 768), il se compose d'un cylindre isolant d'ivoire ou de buis J, dans l'axe duquel est un cylindre de cuivre k (fig. 769) d'un moindre diamètre, fixé à l'armature V et tournant avec les bobines. Sur le cylindre d'ivoire est d'abord une virole de laiton g ; puis, plus en avant, deux demi-viroles o , o' , de laiton, complètement isolées l'une de l'autre. La demi-virole o' est en com-

munication avec l'axe k par une vis r , et la demi-virole o l'est avec la virole q par une languette α qui les unit. Enfin, sur les faces latérales d'un bloc de bois M (fig. 768) sont deux plaques de laiton



m, n , sur lesquelles sont maintenues par des vis de pression deux lames élastiques de laiton b et c , qui s'appuient successivement sur les demi-viroles o et o' pendant la rotation.

Ces détails connus, on a déjà dit que deux bouts des fils des



bobines, ceux de même sens, viennent aboutir à l'axe métallique k , et par suite à la demi-virole o' , tandis que les deux autres bouts, encore de même sens entre eux, se réunissent à la virole q , et par suite à la demi-virole o . Les pièces o, o' , sont donc con-

stamment les pôles des courants qui se développent dans les bobines, et comme ceux-ci sont alternativement de sens contraires, les pièces o , o' , sont elles-mêmes alternativement positives et négatives. Si l'on considère le cas où la demi-virole o' est positive, le courant descend par la lame b , suit la plaque m , arrive en n par le fil conjonctif p , monte en c , et se ferme au contact de la pièce o ; puis, lorsque, par l'effet de la rotation, o prend la place de o' , le courant conserve la même direction, car, comme il est alors renversé dans les bobines, o est devenu positif et o' négatif; et ainsi de suite tout le temps qu'on fait tourner les bobines.

Avec les deux lames b et c seules, les deux courants contraires qui partent des deux demi-viroles o et o' ne pourraient se réunir. Pour fermer le courant, il faut faire communiquer les deux pièces m et n entre elles, au moyen d'un conducteur quelconque.

Effets physiologiques. — Pour les effets physiologiques, on ferme le courant au moyen d'une troisième lame élastique a (fig. 762), et de deux appendices i partant des viroles o et o' , et isolés sur le cylindre d'ivoire. Toutes les fois que la lame a touche un de ces appendices, elle est en communication avec la lame opposée b , et le courant est fermé, car il passe de b en a , puis gagne la lame c par la plaque n . Au contraire, tant que la lame a ne touche pas un des appendices, le courant est interrompu, et un extra-courant prend naissance dans le conducteur qui réunit les deux plaques m et n .

Pour utiliser cet extra-courant, on fixe en n et en m deux longs fils de cuivre contournés en hélice et terminés par deux cylindres p et p' , qu'on prend dans les mains. Alors, tant que la lame a ne touche pas les appendices i , le courant passe dans le corps de l'expérimentateur, sans effet bien appréciable; tandis que chaque fois que la lame a est en contact avec l'un des appendices i , le courant, comme on l'a vu ci-dessus, se trouve fermé par les pièces a et c , et cessant alors de passer dans les fils np , mp' , il se produit dans ceux-ci et à travers le corps un extra-courant direct, qui fait éprouver une violente commotion. Celle-ci se renouvelle à chaque demi-révolution, et comme l'intensité des courants induits est en raison inverse de leur durée (907, 1°); plus on tourne vite, plus les commotions sont fortes, jusqu'à une certaine limite cependant, ce qui est dû à ce qu'avec une trop grande vitesse, les contacts ne sont plus suffisamment établis. Alors les muscles se contractent avec une telle force, qu'ils refusent d'obéir à la volonté, et qu'on ne peut plus lâcher les poignées. Avec un appareil bien construit et de grande dimension on ne peut résister à la durée de la commotion; celui qui veut per-

sister est renversé, se roule sur le sol et cède bientôt à la souffrance.

L'expérience montre que le maximum d'effet a lieu lorsque l'interruption se produit au moment où le plan des axes des bobines est perpendiculaire à la droite qui joint les deux pôles du faisceau aimanté, c'est-à-dire quand le magnétisme change de sens dans les deux noyaux de fer doux des bobines; c'est, en effet, alors que ce magnétisme subit sa plus grande variation d'intensité.

Effets chimiques et effets physiques. — La figure 763 (page 843) montre comment on dispose l'expérience pour la décomposition

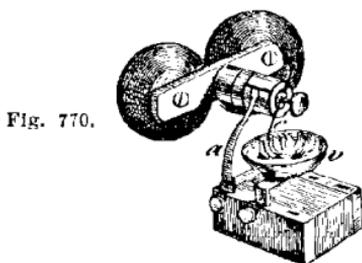


Fig. 770.

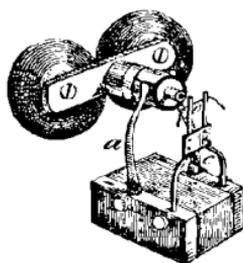


Fig. 771.

de l'eau. La lame *a* est alors supprimée, le courant se trouvant fermé par le liquide dans lequel se rendent les deux fils qui représentent les électrodes.

Pour les effets physiologiques et chimiques, le fil enroulé sur les bobines est fin, et d'une longueur de 300 à 400 mètres sur chacune. Pour les effets calorifiques, au contraire, le fil est gros et seulement d'une longueur de 25 à 30 mètres sur chaque bobine. Les figures 770 et 771 montrent la forme qu'on donne alors aux bobines et au commutateur. La première représente l'inflammation de l'éther, et la seconde l'incandescence d'un fil métallique *o*, dans lequel passe, toujours dans le même sens, le courant allant de *a* en *c*.

* 901. **Machine magnéto-électrique de Nollet.** — Le principe de l'appareil de Clarke a reçu une remarquable application dans la *machine magnéto-électrique de Nollet*. Cette machine consiste en un bâti de fonte de 1^m,65 de hauteur, sur le contour duquel sont disposées parallèlement, sur des traverses de bois, 8 séries de 5 faisceaux aimantés puissants A, A, A... (fig. 772). Ces faisceaux, qui peuvent porter chacun 70 kilogrammes, sont en fer à cheval et groupés de manière que, si on les considère soit parallèlement à l'axe du bâti, soit dans un plan perpendiculaire à cet axe, ce sont toujours les pôles de noms contraires qui sont en regard. Dans chaque série, les faisceaux extrêmes sont composés de trois lames, tandis que les trois faisceaux intermédiaires sont à 6 lames, parce qu'ils agissent par leurs deux faces, tandis que les premiers n'agissent que par une seule.

Sur un axe horizontal de fer, allant d'un bout à l'autre du bâti, sont quatre rouleaux de bronze, correspondant chacun aux intervalles entre les faisceaux

aimantés de deux séries verticales. Chaque rouleau porte sur sa circonférence 16 bobines, c'est-à-dire autant qu'il y a de pôles magnétiques dans une série verticale des faisceaux. Ces bobines, représentées dans la figure 774, diffèrent

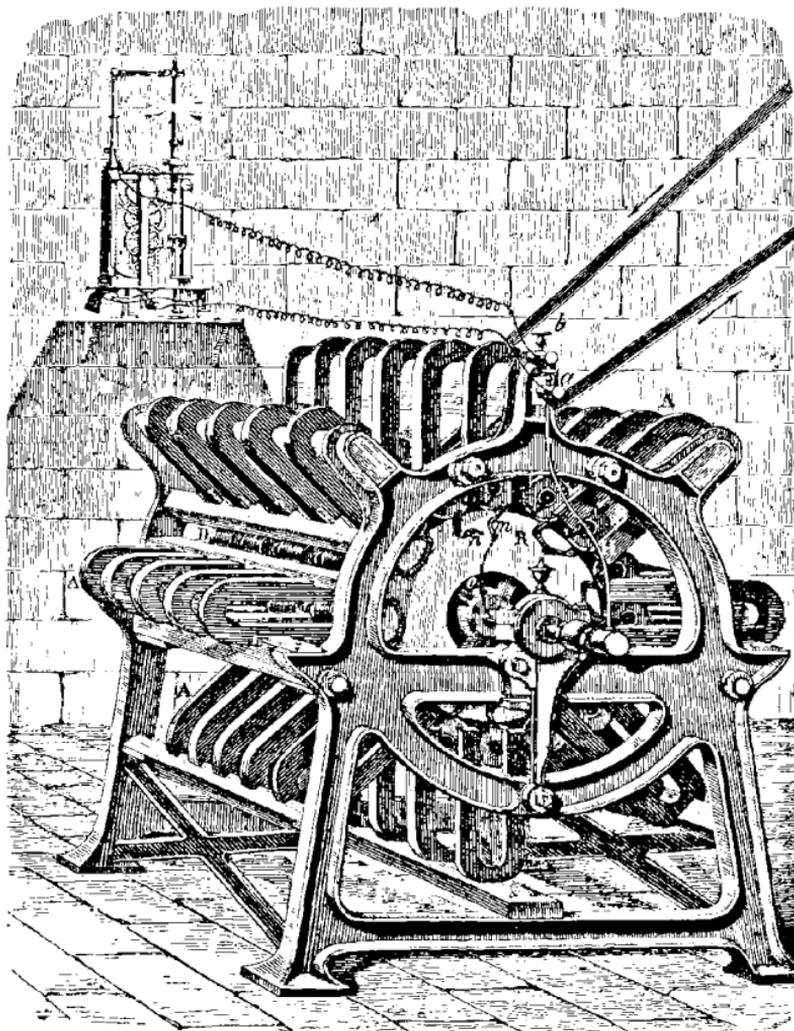


Fig. 772 ($h = 1^m,65$).

de celles de l'appareil de Clarke; en effet, elles ne sont pas à un seul fil, mais à 12 fils, chacun de $10^m,50$, ce qui fait gagner en quantité et diminue la résistance. Les spires de ces bobines sont isolées par du bitume de Judée dissous dans de l'essence de térébenthine. Enfin elles ne sont pas enroulées sur des cylindres de fer pleins, mais sur deux tubes de fer creux, fendus dans toute leur lon-

gueur, ce qui rend l'aimantation et la désaimantation plus promptes quand les bobines passent devant les pôles des aimants. De plus, les disques de cuivre qui terminent les bobines sont coupés dans le sens de leur rayon, afin d'empêcher la production des courants induits dans ces disques (909). Les quatre rouleaux étant garnis respectivement de 16 bobines, cela donne en tout 64 bobines, disposées en 16 séries horizontales de 4, comme on l'aperçoit en D sur la gauche du bâti. La longueur des fils sur une bobine étant de 12 fois $10^m,50$ ou 126^m , leur longueur totale dans tout l'appareil est de 64 fois 126^m , ou 8064^m .

Sur toutes les bobines, les fils sont enroulés dans le même sens, et non-seulement sur un même rouleau, mais sur les quatre, tous ces fils communiquent

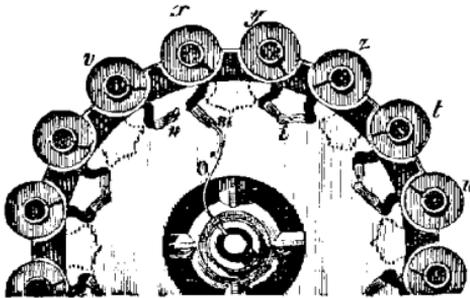


Fig. 773.

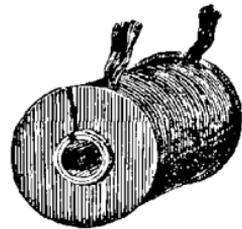


Fig. 774.

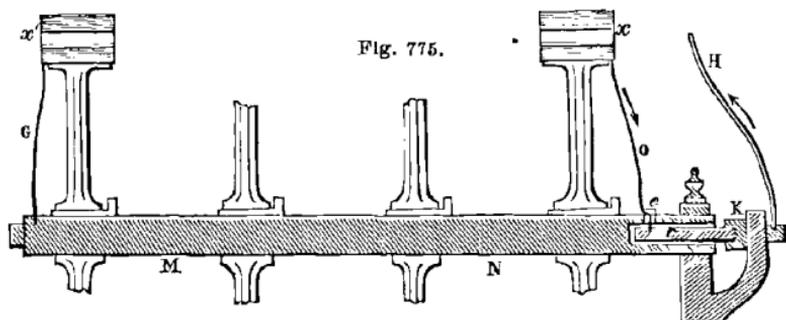
entre eux. Pour cela, les bobines sont reliées entre elles comme le montre la figure 773. Sur le premier rouleau, les douze fils de la première bobine x aboutissent, sur une planchette d'acajou appliquée sur la face antérieure du rouleau, à une lame de cuivre m , communiquant par un fil O avec la partie centrale de l'axe qui porte les rouleaux. De l'autre bout, sur la seconde face du rouleau, les mêmes fils vont se souder à une lame figurée par un trait ponctué, qui les lie à la bobine y ; puis de celle-ci ils sont conduits à la bobine z par une lame t , et ainsi de suite pour les bobines t , u , jusqu'à la dernière v . Là, les fils de cette bobine aboutissent à une lame n qui traverse le premier rouleau et va se souder aux fils de la première bobine du rouleau suivant, sur lequel se reproduit la même série de communications; puis les fils se rendent au troisième rouleau, de celui-ci au quatrième, et enfin à l'extrémité postérieure de l'axe.

En résumé, les bobines étant ainsi disposées à la suite les unes des autres, comme les éléments d'une pile montée en série, on a l'électricité en tension. Si on veut obtenir l'électricité en quantité, on fait communiquer alternativement les lames ci-dessus, non plus entre elles, mais avec deux anneaux métalliques, de manière que tous les bouts de même nom soient en rapport avec le même anneau; chacun de ces anneaux est alors un pôle.

Une courroie sans fin, mue par une machine à vapeur, s'enroule sur une poulie fixée à l'extrémité de l'axe qui porte les rouleaux et les bobines, et imprime à tout le système un mouvement de rotation rapide. L'expérience a appris que, pour obtenir le maximum de lumière, la vitesse doit être de 235 révolutions par minute. Pendant cette rotation, si l'on considère une bobine seule, les tubes de fer doux sur lesquels elle est enroulée, en passant entre les pôles des aimants, subissent à leurs deux extrémités une induction opposée dont les effets s'ajoutent, mais changent d'un pôle au suivant; et comme ces tubes, pendant une révolution, passent successivement devant 16 pôles alternativement de noms contraires, ils s'aimantent huit fois dans un sens et huit fois en sens contraire. Dans le même temps, il se produit donc dans la bobine 8 courants

induits directs et 8 courants induits inverses; en tout 16 courants par révolution. Avec la vitesse de 235 tours par minute, le nombre des courants dans le même temps est de 235 fois 16, ou 3780, alternativement de sens contraires. Le même effet se produit dans chacune des 64 bobines; mais comme elles sont toutes enroulées dans le même sens et commaniquent entre elles, leurs effets se superposent, et l'on n'a toujours que le même nombre de courants, seulement plus intenses.

Il reste à recueillir ces courants pour les utiliser à la production d'une lumière électrique intense. Pour cela, la dernière bobine α' du quatrième rouleau aboutit, par un fil G , à l'axe MN , qui porte les rouleaux (fig. 775); le courant



est ainsi conduit sur l'axe et de là sur toute la machine, où l'on peut ensuite le recueillir en tel point que l'on veut. Antérieurement, la première bobine α du premier rouleau communique par un fil O , non plus à l'axe lui-même, mais à un cylindre d'acier c pénétrant dans l'axe dont il est isolé par un manchon d'ivoire. La vis e , qui reçoit le fil O , est elle-même isolée par un contact d'ivoire. Du cylindre c le courant passe sur une pièce métallique K , qui est fixe, d'où il monte enfin dans le fil H , qui le conduit à la borne a de la figure 772. Quant à la borne b , elle communique avec tout le bâti, et, par suite, avec le fil de la dernière bobine α' . Des deux bornes a et b , le courant est conduit par deux fils de cuivre à deux charbons dont la distance est réglée par un régulateur.

Dans la machine qui vient d'être décrite, les courants de sens contraires ne sont pas redressés; par suite, chaque charbon est alternativement positif et négatif, et, en effet, ils s'usent également vite. L'expérience a montré que tant qu'on applique les courants à la production de la lumière, il n'est pas nécessaire de les ramener à être de même sens; mais lorsqu'on veut les utiliser pour la galvanoplastie ou l'almantation, il est indispensable de les redresser, ce qui s'obtient à l'aide d'un commutateur.

La lumière produite par la machine de Nollet est très-intense; avec une machine de 4 rouleaux, montés en quantité, la lumière équivaut à celle de 150 lampes Carcel. Avec une machine de 6 rouleaux, elle s'élève jusqu'à 200. Cette lumière, qui n'exige d'autre dépense que celle de deux chevaux-vapeur pour faire tourner les rouleaux, quand ils sont au nombre de six, est surtout utilisée pour l'éclairage des phares et pour celui des navires, afin de prévenir les collisions pendant la nuit.

Une petite machine à un seul rouleau de 4 bobines suffit pour faire marcher une bobine de Ruhmkorff de moyenne grandeur.

Pour l'éclairage électrique, la machine de Nollet offre deux avantages qui ne se rencontrent pas dans les machines à courants continus (904), et qui méritent d'être signalés ici. 1° Le courant y étant alternativement renversé, le charbon positif ne se creuse pas (fig. 646), et les deux charbons, qui restent terminés en pointe, n'interceptent pas la lumière. 2° Par l'effet du courant al-

ternatif, les électro-aimants des régulateurs de la lumière électrique ne conservent pas de magnétisme rémanent, et par suite fonctionnent beaucoup mieux qu'avec les courants continus.

* 902. **Bobine de Siemens.** — En 1854, Siemens et Halske ont modifié la forme des bobines d'induction en enroulant le fil non plus dans un plan perpendiculaire à l'axe du noyau, comme dans les électro-aimants ordinaires, mais longitudinalement, c'est-à-dire parallèlement à l'axe. La figure 776 donne une vue perspective de cette bobine.

Le noyau AB, qui est cylindrique et de fer doux, a une longueur de 0^m,50 à 1^m,50, suivant la puissance qu'on veut donner à la bobine. Sur toute sa longueur et à ses extrémités, il est entaillé d'une gorge large et profonde, dans laquelle s'enroule un grand nombre de fois, comme sur un multiplicateur, un fil de cuivre recouvert de soie. Aux deux bouts sont fixés par des vis deux disques de laiton E et D qui portent des tournillons. A une extrémité est une

Fig. 776.



poulie *p* qui reçoit une courroie sans fin, à l'aide de laquelle on imprime à la bobine une grande vitesse de rotation. Les courants changeant de direction dans le fil de la bobine à chaque demi-revolution, on les ramène à une direction unique, avant de les recueillir au moyen d'un commutateur *c* fixé à l'autre extrémité. Il est formé de deux pièces d'acier, l'une isolée de l'axe, l'autre en contact avec lui. Un des bouts du fil de la bobine aboutit à la pièce isolée, l'autre à l'axe, et par suite à la seconde pièce du commutateur. Enfin, deux lames élastiques, qui appuient alternativement sur chaque pièce du commutateur, transmettent des courants toujours de même sens, comme dans l'appareil de Clarke (fig. 768).

Ces détails connus, si l'on faisait passer un courant dans le fil de la bobine, les segments *A* et *B* du noyau s'aimanteraient l'un dans un sens, l'autre dans l'autre, comme avec un électro-aimant ordinaire. Or, réciproquement, si la bobine est placée entre les pôles d'une série de barreaux aimantés, et qu'on lui imprime un mouvement de rotation rapide, les segments *A* et *B* s'aimantent et se désaimantent avec la même rapidité, leur induction développe dans le fil de la bobine des courants alternatifs, qui sont redressés par le commutateur. Siemens *a*, le premier, construit une machine magnéto-électrique d'après ce principe.

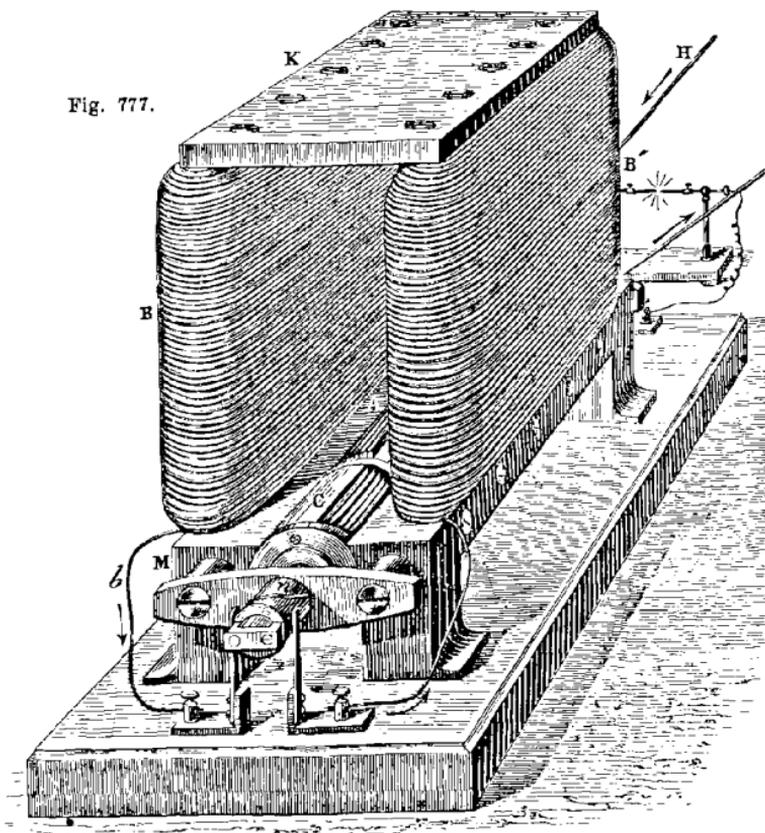
* 903. **Machine dynamo-électrique de Ladd.** — Siemens et Wheatstone, en 1867, eurent en même temps l'idée des machines dynamo-électriques. La figure 777 représente une machine de ce genre construite dans la même année par M. Ladd, à Londres. Elle se compose de deux fortes bobines *B* et *B'*, qui, au lieu d'être enroulées sur deux noyaux cylindriques, le sont sur deux plaques de fer doux, reliées entre elles par une troisième plaque *K*; en sorte que le tout forme un puissant électro-aimant.

A la partie inférieure sont deux armatures de fer doux *M* et *N*, évidées pour recevoir entre elles deux bobines de Siemens *C* et *A*. Celles-ci sont montées sur un même axe, mû par une courroie sans fin *H*, et sont enroulées suivant deux directions perpendiculaires entre elles. La bobine *C*, qui est la plus petite, est reliée par un commutateur *n* aux deux bouts *a* et *b* du fil de l'électro-aimant; c'est elle qui le nourrit. La bobine *A*, qui est deux fois plus longue, est reliée par

un second commutateur à l'appareil destiné à utiliser le courant qui se développe dans cette bobine pendant la rotation.

Pour faire marcher la machine de Ladd, on commence par faire passer le courant d'une pile de quelques couples dans les bobines B et B'. L'électro-aimant, devenant actif, communique aux armatures M et N un magnétisme ré-

Fig. 777.



mement (857), boréal sur l'une et austral sur l'autre, lequel persiste indéfiniment et maintient la machine toujours prête à fonctionner. Si alors on fait prendre à l'axe des bobines C et A un mouvement de rotation rapide, il se développe dans la première, sous l'induction des armatures M et N, un courant qui active l'électro-aimant d'autant plus, que la rotation s'accélère davantage; puis la bobine A s'induisant de même, un second courant y prend naissance, courant dont l'intensité croît avec les dimensions de l'appareil et avec la vitesse de rotation. Il est à remarquer que plus la bobine C active l'électro-aimant et par suite ses armatures, plus elle est elle-même excitée par celles-ci. Cette réaction du courant sur lui-même, déjà employée par Wheatstone, est la partie capitale de la machine de Ladd.

Cette machine présente le grave inconvénient d'exiger des vitesses de rotation telles, qu'on ne peut la faire marcher d'une manière continue pendant plusieurs

heures. En effet, les armatures s'échauffant par le développement répété des courants d'induction (911), leur magnétisme s'affaiblit et par suite l'intensité du courant. Pour corriger cette cause d'affaiblissement, M. Ladd fait passer un courant d'eau froide dans l'axe des bobines tournantes.

Quel que soit l'avenir de ces machines, elles sont une transformation remarquable du travail mécanique en électricité, en lumière et en chaleur.

* 904. **Machine magnéto-électrique à courant continu de Gramme.** — Les machines magnéto-électriques et dynamo-électriques décrites ci-dessus ne four-

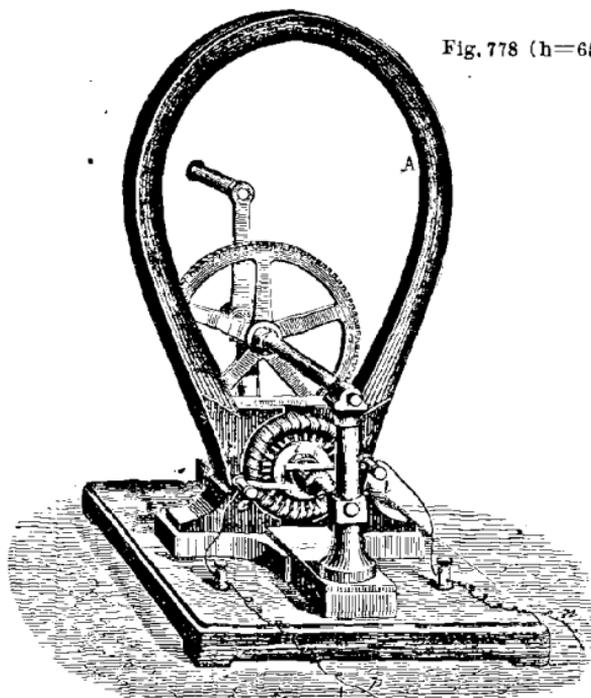


Fig. 778 (h=65).

nissent que des courants alternativement positifs et négatifs. On a vu (901) que cela n'empêche pas de les utiliser pour l'éclairage ; mais pour les autres applications, comme l'argenture, la galvanoplastie, il faut redresser les courants, c'est-à-dire les amener, à l'aide d'un commutateur, à être toujours de même sens. Or ce résultat ne s'obtient qu'avec une perte notable d'électricité et avec des étincelles qui brûlent rapidement les armatures des commutateurs.

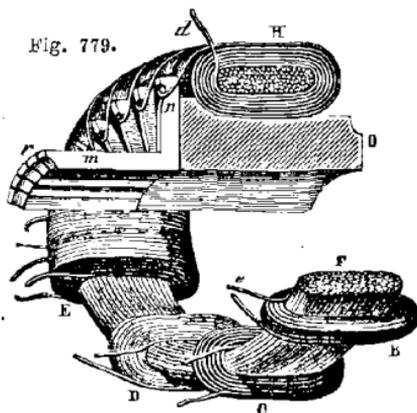
Ces inconvénients disparaissent dans une machine inventée récemment par M. Gramme, à Paris. Elle consiste en un fort faisceau aimanté fixe, entre les pôles duquel tourne un système de bobines, qui reçoit un mouvement de rotation rapide par le moyen d'une grande roue et d'un pignon. Le faisceau aimanté était d'abord le même que celui de la machine de Clarke ; mais depuis que M. Jamin a fait connaître les faisceaux à lames minces, qui sont beaucoup plus puissants, M. Gramme les a appliqués à sa machine.

L'aimant-Jamin, qui est maintenu verticalement (fig. 778), est composé de 24 lames d'acier de 1 millimètre d'épaisseur, aimantées séparément à saturation, puis superposées en fer à cheval. Aux deux pôles du faisceau sont appliquées

deux armatures de fer doux *a* et *b*, qui, s'aimantant par influence, deviennent elles-mêmes les pôles efficaces qui agissent sur un rouleau de 30 bobines tournant entre les deux armatures, et disposé comme il suit.

Les bobines n'ont pas chacune un noyau distinct, comme dans la machine de Nollet, mais s'enroulent toutes sur un noyau commun; et celui-ci, au lieu de consister en un anneau de fer plein, est composé d'un fil de fer doux de $\frac{11}{10}$ de millimètre de diamètre, enroulé un grand nombre de fois, de manière à former un faisceau circulaire, comme on le voit dans la figure 779, qui en montre une section en F. Le fil est continu, et les deux bouts en sont soudés ensemble, de façon à donner un circuit complet, d'une longueur totale de 180 mètres.

Sur le noyau ainsi obtenu, sont enroulées les bobines B, C, D,..... non encore réunies entre elles dans la partie inférieure de la figure, mais groupées dans la partie supérieure, telles qu'elles fonctionnent dans la machine; c'est-à-dire réunies successivement l'une à l'autre par des équerres *mn*, à chacune desquelles viennent se souder les fils de cuivre de deux bobines consécutives, de manière à former un tout continu. Les équerres sont isolées les unes des autres et fixées sur un bloc de bois O, monté sur l'axe de rotation. Les branches *nr* des équerres formant une gaine autour de cet axe, deux pinceaux de fils de cuivre rouge, fixés aux bornes *e* et *i* (fig. 778), frottent constamment sur les parties supérieures et inférieures de cette gaine, pour recueillir les courants qui prennent naissance dans les bobines.



Pour comprendre la formation de ces courants, observons que chaque pôle *a* et *b* de l'aimant détermine, dans le faisceau circulaire sur lequel les bobines sont enroulées, deux pôles magnétiques qui se déplacent dans la masse du faisceau à mesure qu'il tourne, mais qui, en réalité, restent fixes dans l'espace, en présence des pôles *a* et *b*; en sorte que tout se passe comme si, le faisceau aimanté restant fixe, les bobines avançaient sur son contour, s'approchant d'un des pôles et s'écartant de l'autre.

Par suite, si l'on suppose que le rouleau des bobines tourne de *a* vers *b* en dessus, et si l'on se fonde d'un côté sur les courants d'Ampère qui circulent autour du noyau (849), et de l'autre sur la loi de Lenz (880), on reconnaît que, si dans les bobines qui s'éloignent de *a* le courant direct qui se produit est négatif, le courant inverse qui se développe dans les bobines approchant de *b* est aussi négatif. Or, toutes les bobines étant reliées entre elles, ces deux courants se réunissent en un seul, qui est recueilli sur les équerres supérieures par le pinceau qui arrive de la borne *i*. Deux courants positifs prenant naissance de la même manière dans la moitié inférieure des bobines, ils viennent se réunir au pinceau qui part de la borne *e*; par suite, de la borne *i* part constamment un courant négatif, et de la borne *e* un courant positif.

La vitesse de rotation pouvant varier de 500 à 2000 tours par minute, l'expérience fait voir que l'intensité du courant est sensiblement proportionnelle à cette vitesse.

La machine représentée dans la figure 778, construite dans les ateliers de M. Bréguet, est destinée à l'enseignement. Le fil de cuivre enroulé sur chaque

bobine a $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, et une longueur de 4^m.40, soient 132^m sur les 30 bobines.

A la vitesse de 2000 tours par minute, la machine fonctionne assez longtemps sans échauffement nuisible. A cette vitesse, sa force électro-motrice est celle de 8 éléments de Bunsen, moyen modèle, et elle peut fondre 10 centimètres de fil de fer de 1 millimètre de diamètre.

Pour l'éclairage électrique, la galvanoplastie, la dorure et l'argenture, M. Gramme construit des machines beaucoup plus puissantes, dans lesquelles les aimants-Jamin sont remplacés par des électro-aimants animés par la machine même, comme dans celle de Ladd.

* 905. **Démonstration de la réversibilité par la machine de Gramme.** — On entend par *réversibilité*, dans les phénomènes physiques, le retour de l'effet à la cause. Par exemple, les machines magnéto-électriques transforment le mouvement en électricité, mais réciproquement elles peuvent transformer celle-ci en mouvement, ce qui se vérifie, avec la machine de Gramme, en mettant les bornes *c* et *i* (fig. 778) en communication avec les pôles d'une pile de quelques couples de Bunsen. Le noyau de fer doux s'aimantant aussitôt par l'action du courant qui parcourt les bobines, tout le système prend un mouvement de rotation rapide sous l'influence des pôles du faisceau aimanté.

Ou bien encore, on renferme dans un même circuit deux machines pareilles à celle de la figure 778, puis l'on met l'une d'elles en mouvement : le courant qu'elle engendre passant dans les bobines de l'autre machine, le noyau de celle-ci se polarise et se met à tourner. Si alors on fait marcher la première en sens inverse, la seconde s'arrête, puis se met à tourner de nouveau, mais dans la direction opposée.

Cette expérience remarquable est une nouvelle preuve de la corrélation des forces physiques, et en même temps de la thermo-dynamique, puisque celle-ci est tout entière fondée sur la réversibilité entre la chaleur et le mouvement.

* CHAPITRE XIII

PROPRIÉTÉS, INTENSITÉ ET DIRECTION DES COURANTS INDUITS

906. **Comparaison des courants induits inverse et direct.** — L'expérience montre que les deux courants induits inverse et direct *sont égaux en quantité*. Matteucci l'a constaté en les faisant passer simultanément dans un même électrolyte : l'action électrolysante est alors nulle.

Il ne faudrait pas en conclure que les deux courants inverse et direct sont égaux en durée et en tension : le courant direct a moins de durée et plus de tension. En effet, lorsqu'on ferme le courant inducteur, on a vu qu'il n'atteint pas immédiatement son état permanent, c'est-à-dire uniforme, mais passe par un état variable plus ou moins prolongé (827). Or, quelle que soit la durée de cet état variable, et, par suite, de l'action induisante, il passe dans le fil inducteur la même quantité d'électricité, celle nécessaire pour atteindre l'état permanent. Par conséquent, quelle que soit la durée de l'induction, l'action induisante totale sur le fil induit est constante. Il n'en est pas de même de l'intensité moyenne du courant induit ; car l'électricité mise en mouvement dans ce courant est d'autant moindre, dans un temps donné, que l'induction est plus prolongée. Il faudrait, pour que le courant inverse et le courant direct fussent de même intensité, que l'induction commençante et l'induction finissante fussent de même durée ; or on va voir qu'il n'en est pas ainsi, à cause de l'action secondaire des extra-courants de fermeture et d'ouverture.

Pour cela, soit une bobine à deux fils, un gros dans lequel arrive le courant d'une pile, et un fin soumis à l'induction. Il y a en réalité, dans cette bobine, trois sortes de courants dont les effets s'influencent : dans le gros fil le courant inducteur, dans le fil fin le courant induit, inverse ou direct, et enfin l'extra-courant de fermeture ou d'ouverture, qui prend naissance dans le gros fil en même temps que le courant induit dans le fil fin. Cela posé, l'extra-courant de fermeture, étant de sens contraire à celui du courant inducteur (885), prolonge la durée de l'état variable de ce courant, et affaiblit ainsi l'intensité moyenne du courant inverse dans le fil fin. Mais, à la rupture du circuit, l'extra-courant d'ouverture, de même sens que le courant inducteur, le renforce, et par ce renforcement fournit d'abord, d'après la troisième loi de l'induction (880), un second courant inverse qui continue le premier dans le fil fin, et auquel succède enfin le courant direct dû à l'induction finissante. La durée de celle-ci se trouvant ainsi très-réduite, le courant induit direct n'a lui-même qu'une très-courte durée et, par suite, *une intensité beaucoup plus grande que celle du courant inverse*; ce que vérifie l'expérience.

907. Lois de l'intensité des courants induits. — De ses travaux et de ceux de Faraday, de Marianini, de Felici et autres physiciens, Matteucci a déduit les lois suivantes, dont les deux premières sont comprises dans ce qui précède :

1^o *L'intensité d'un courant induit est en raison inverse du temps pendant lequel il se développe.*

2^o *La quantité d'électricité mise en mouvement dans les courants induits, direct et inverse, est la même; mais l'intensité du premier est toujours beaucoup plus grande que celle du dernier.*

3^o *L'intensité d'un courant induit est proportionnelle à celle du courant inducteur.*

4^o *Cette même intensité est proportionnelle au produit des longueurs des circuits inducteur et induit.*

5^o *L'action induisante entre deux éléments des fils inducteur et induit est en raison inverse de la simple distance.*

908. Propriétés des courants induits. — Malgré leur instantanéité, les courants induits possèdent toutes les propriétés des courants voltaïques. Comme eux, ils exercent des effets physiologiques violents, produisent des effets lumineux, calorifiques, chimiques, et donnent eux-mêmes naissance à de nouveaux courants induits. Enfin, ils font dévier l'aiguille des galvanomètres et aimantent les barreaux d'acier, quand on les fait passer dans un fil de cuivre enroulé autour de ces barreaux.

Toutefois le courant direct et le courant inverse, par suite de leur inégale tension, offrent des effets très-différents : étant égaux en quantité, ils produisent les mêmes effets sur le galvanomètre et sur le voltamètre, qui sont des appareils qui mesurent la quantité; mais pour les effets de tension, c'est-à-dire lorsqu'il y a de grandes résistances à vaincre, le courant direct l'emporte de beaucoup sur le courant inverse; par exemple, quand le courant a à vaincre la résistance de l'air pour donner des étincelles, ou la force coercitive de l'acier pour aimanter des barreaux, ou la résistance du corps humain pour donner des commotions.

909. Direction des courants induits sur les disques tournants. — Faraday a cherché quelle était la direction des courants induits sur la surface des disques métalliques tournant devant les pôles contraires de deux forts aimants. Son procédé consiste à mettre l'un des bouts du fil du galvanomètre en contact avec l'axe du disque tournant, et l'autre bout avec la circonférence du même disque. Il a ainsi constaté, d'après la déviation de l'aiguille du galvanomètre, que, pendant la rotation du disque, il se produit à sa surface des courants induits dirigés du centre à la circonférence, ou de la circonférence au centre, selon le sens de la rotation, et que ces courants sont symétriques par rapport au diamètre polaire, c'est-à-dire qui passe au-dessus des pôles des aimants.

Nobili et Antinori se sont aussi occupés de rechercher la direction des courants induits sur les disques tournants, et, pour cela, l'un des bouts du fil du galvanomètre étant en contact avec l'axe du disque, ils faisaient communiquer l'autre bout non-seulement avec la circonférence du disque, mais encore avec les différents points de sa surface. Ils ont ainsi observé que, sur les parties du disque entrant sous l'influence magnétique, il se développe constamment un

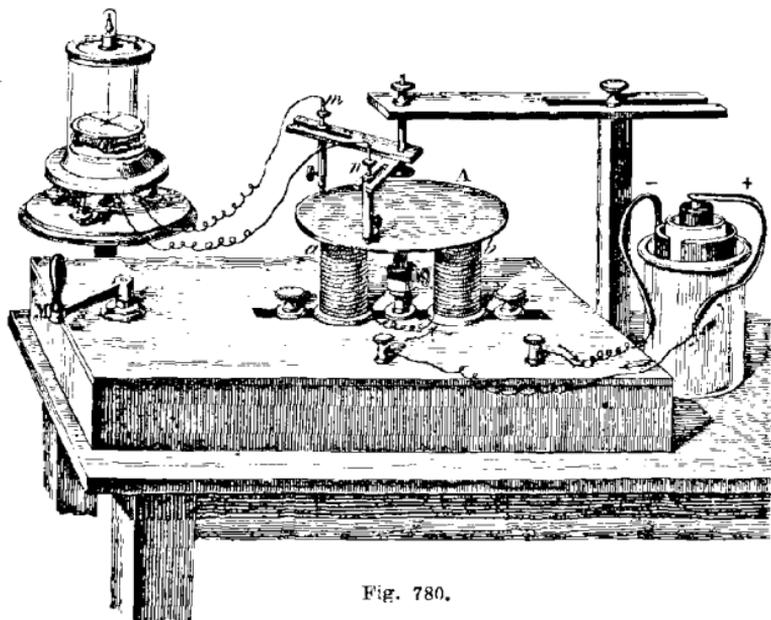


Fig. 780.

système de courants contraires à ceux de l'aimant, et que, sur les parties se dégageant de la même influence, il se produit des courants de même sens que ceux de l'aimant, et par suite contraires aux premiers.

Matteucci, ayant étudié les mêmes phénomènes avec plus de précision, les a trouvés plus compliqués qu'on ne le pensait. L'appareil de ce physicien se compose d'une caisse de bois dans laquelle une suite d'engrenages transmettent, à l'aide d'une manivelle M, un mouvement de rotation plus ou moins rapide à un disque de métal A, de 20 centimètres de diamètre (fig. 780). Au-dessous du disque, à un intervalle de 2 à 3 millimètres, est un puissant électro-aimant *ab*, qui se déplace dans une rainure, de manière à pouvoir présenter ses pôles successivement à tous les points du disque. Enfin, au-dessus du disque sont deux tiges de cuivre *m* et *n*, terminées chacune par une pointe émoussée et amalgamée, qui touche le disque. Ces mêmes tiges, à leur extrémité supérieure, communiquent avec les deux bouts du fil d'un galvanomètre; de plus, par la disposition des supports auxquels elles sont fixées, elles peuvent occuper toutes les positions du centre à la circonférence du disque.

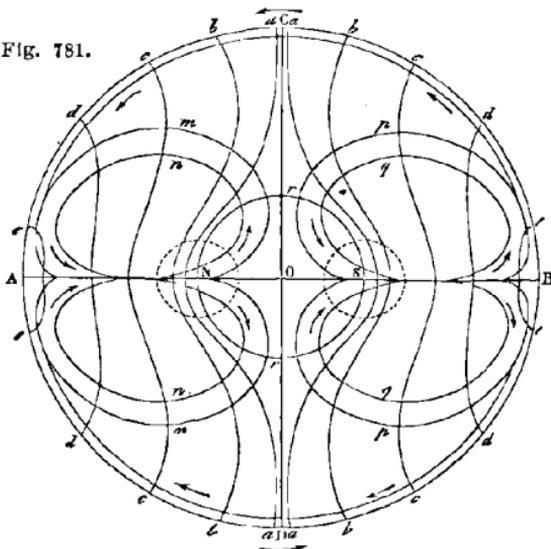
Au moyen de cet appareil, et en mettant l'un des bouts du fil du galvanomètre en contact avec le centre, et l'autre avec les différents points de la surface du disque, Matteucci a constaté les faits suivants, représentés sur la figure 781, dans laquelle les points N et S sont les projections des pôles de l'électro-aimant, et AB la droite qui passe au-dessus de ces pôles.

1^o Matteucci a trouvé des lignes de nul courant, *a, b, c, d, e*, qui sont nor-

males à la ligne AB et se contournent près des bords du disque, de manière à les couper toujours normalement.

2° La projection de chaque pôle de l'électro-aimant sur le disque est un *point neutre*, c'est-à-dire de nul courant; de plus, une ligne neutre rr sensiblement circulaire, qui passe par les projections des deux pôles et a pour centre l'axe de rotation du disque, est en même temps *ligne d'inversion*, c'est-à-dire que les courants en dedans et en dehors de cette ligne sont de directions contraires.

Fig. 781.



3° Les *lignes de courants électriques*, c'est-à-dire celles suivant lesquelles a lieu le maximum d'effet, coupent toujours normalement les lignes de nul courant et sont tangentes à la droite AB; les lignes de courant maximum sont représentées en m, n, p, q .

4° La position de la ligne neutre srN , qui passe par les projections des deux pôles, n'est pas sensiblement modifiée par la nature du disque, par son épaisseur et par l'intensité du courant de la pile; mais cette ligne se resserre sur elle-même à mesure que la vitesse de rotation augmente.

5° Enfin, de chaque côté des points neutres, sur la ligne des pôles magnétiques, on trouve deux points *maxima* dont la distance dépend de la grosseur de l'électro-aimant et du diamètre du disque tournant.

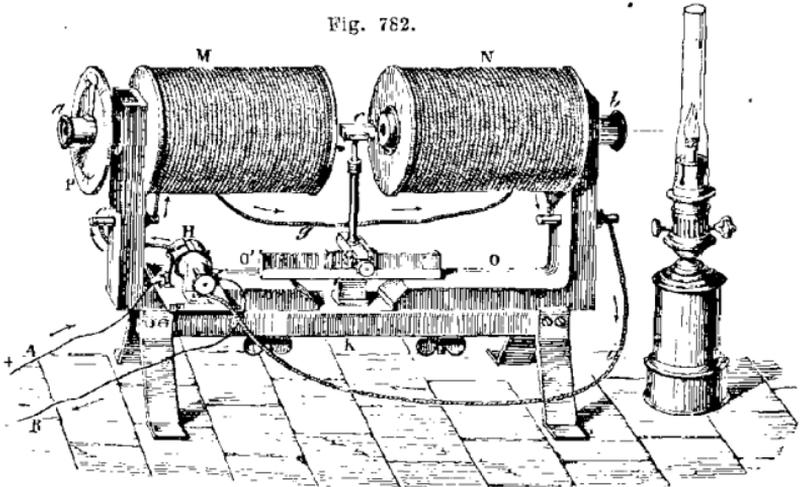
* CHAPITRE XIV

EFFETS DES AIMANTS PUISSANTS, DIAMAGNÉTISME

910. **Effets optiques des aimants puissants.** — Le premier effet des électro-aimants puissants, découvert par Faraday, en 1845, est l'action qu'ils exercent sur plusieurs substances transparentes; action telle, que lorsqu'un rayon polarisé traverse ces substances dans la direction de la ligne des pôles magnétiques, le plan de polarisation tourne, soit à droite, soit à gauche (639), suivant le sens de l'aimantation.

La figure 782 représente l'appareil de Faraday ; il est formé de deux électroaimants M et N très-puissants, fixés à deux chariots de fer O, O', qui peuvent se rapprocher plus ou moins en glissant sur un support K. Le courant d'une pile de 10 à 11 couples Bunsen entre en A, gagne un commutateur H, la bobine M, puis la bobine N par le fil g, descend dans le fil i, passe de nouveau dans le commutateur, et sort en B. Les deux cylindres de fer doux qui occupent l'axe des bobines sont percés de trous cylindriques pour laisser passer les rayons lumineux. Enfin, en b et en a sont deux prismes de Nicol (637, 4°), le premier

Fig. 782.



servant de polariseur, et le second d'analyseur. A l'aide d'une alidade, ce dernier tourne au centre d'un cercle gradué P.

Ces prismes étant placés de manière que leurs sections principales soient perpendiculaires entre elles, le prisme a éteint complètement la lumière transmise au travers du prisme b. Si alors on place en c, sur l'axe des deux bobines, une plaque à faces parallèles, de flint ou de verre, la lumière est encore éteinte tant que le courant ne passe pas ; or, aussitôt que les communications sont établies, la lumière reparait, mais colorée, et si l'on tourne l'analyseur a à droite ou à gauche, selon la direction du courant, la lumière passe par les différentes teintes du spectre, ainsi qu'il arrive avec les quartz taillés perpendiculairement à l'axe (640). M. Ed. Becquerel a fait voir qu'un grand nombre de substances solides ou liquides peuvent ainsi faire tourner le plan de polarisation, sous l'influence d'aimants puissants. Faraday admettait que, dans ces expériences, la rotation du plan de polarisation est due à une action des aimants sur les rayons lumineux ; suivant Blot et M. Becquerel, ce phénomène est dû à une action des aimants sur les corps transparents soumis à leur influence, hypothèse généralement admise.

911. **Chaleur développée par l'induction des aimants puissants sur les corps en mouvement.** — On a vu, en parlant de l'expérience d'Arago (888), qu'un disque de cuivre rouge, tournant sur lui-même, agit à distance sur un aimant mobile pour lui communiquer son mouvement de rotation. On verra bientôt (914) que réciproquement un cube de cuivre rouge, animé d'un mouvement de rotation rapide, est arrêté brusquement par l'influence des pôles de deux forts aimants (fig. 786). Il est évident que, dans ces expériences, si l'on voulait s'opposer à la rotation de l'aiguille, ou forcer le cube à continuer de tourner, il faudrait dépenser constamment un certain travail mécanique pour vaincre la

résistance qui résulte de l'action inductrice des aimants. Or, se basant sur la théorie de la transformation du travail mécanique en chaleur, on a cherché quelle serait ainsi la quantité de chaleur développée par les courants d'induction sous l'influence d'aimants puissants. M. Joule, dans le but de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur, a enroulé une bobine autour d'un cylindre de fer doux, et ayant renfermé le tout dans un tube de verre plein d'eau, il a imprimé au système un mouvement de rotation rapide entre les branches d'un

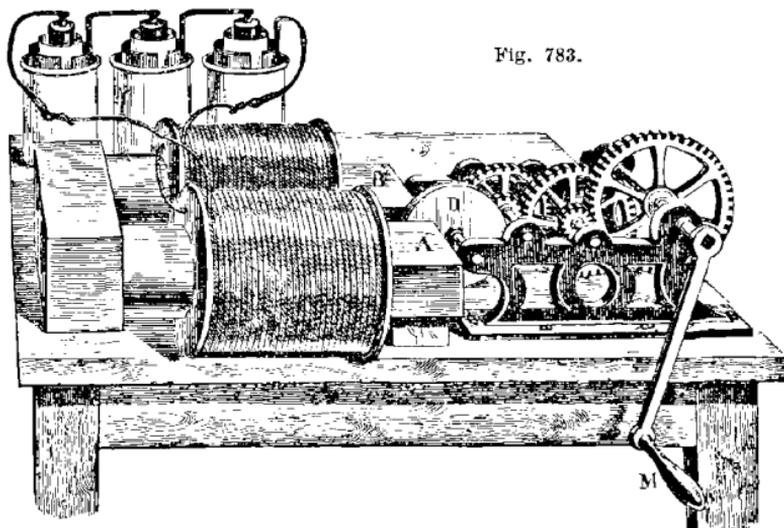


Fig. 783.

fort électro-aimant. Un thermomètre placé dans le liquide servait à mesurer la quantité de chaleur dégagée par les courants d'induction dans le fer doux et dans le fil de cuivre enroulé autour.

Foucault a fait, à ce sujet, une expérience remarquable, à l'aide d'un puissant électro-aimant fixé horizontalement sur une table (fig. 783). Deux pièces de fer doux A et B sont en contact avec les pôles de l'électro-aimant, de manière que, s'aimantant elles-mêmes par influence, elles concentrent leur action magnétique inductrice sur les deux faces d'un disque métallique D. Ce disque, qui est de cuivre rouge, de 75 millimètres de diamètre et de 7 millimètres d'épaisseur, s'engage en partie entre les pièces A et B, où il reçoit, à l'aide d'une manivelle et d'une suite de roues et de pignons, une vitesse de 150 à 200 tours par seconde.

Tant que le courant de la pile ne passe pas dans le fil de l'électro-aimant, on n'éprouve qu'une très-faible résistance à tourner la manivelle, et si, une fois qu'elle a pris, avec les roues et le disque, un mouvement de rotation rapide, on l'abandonne à elle-même, la rotation continue assez longtemps en vertu de la vitesse acquise. Mais lorsqu'on fait passer le courant, le disque et les autres pièces s'arrêtent presque instantanément, et si alors on reprend la manivelle, on éprouve une résistance considérable, due à la réaction sur l'électro-aimant des courants induits développés dans le disque pendant le mouvement. Or si, malgré cette résistance, on continue à tourner, c'est ici que, la force qu'on dépense se transformant en chaleur, le disque s'échauffe rapidement. Dans une expérience faite devant nous par Foucault, la température du disque s'est élevée, en trois minutes, de 10 degrés à 61, le courant étant fourni seulement par trois éléments de Bunsen. Avec six, la résistance est telle, qu'on ne pourrait tourner longtemps.

912. Action rotatoire des aimants sur les jets électriques dans les milieux très-raréfiés. — On doit à de la Rive une expérience qui démontre l'action rotatoire des aimants sur les courants induits. Ce savant a d'abord fait cette expérience avec une forte machine électrique; mais elle présente un éclat bien plus intense avec la bobine de Ruhmkorff.

L'appareil de de la Rive se compose d'un ballon de verre, ou œuf électrique,

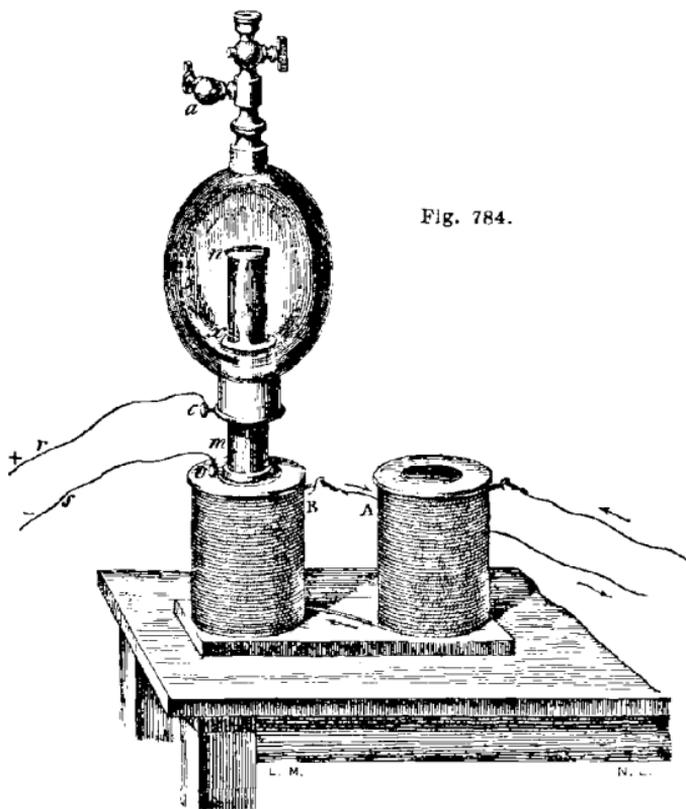


Fig. 784.

muni à l'une de ses extrémités de deux robinets, l'un qui se visse sur la machine pneumatique, et l'autre, qui est un robinet semblable à celui de Gay-Lussac (375), sert à introduire quelques gouttes d'un liquide volatil dans le ballon. A la partie inférieure de celui-ci est mastiquée une tubulure dans laquelle passe une tige de fer doux *m n*, de deux centimètres de diamètre (fig. 784), et dont l'extrémité supérieure aboutit à peu près au centre du ballon. Cette tige est recouverte dans toute son étendue, sauf à ses deux extrémités, d'une couche isolante très-épaisse, formée d'abord de gomme laque, puis d'un tube de verre recouvert lui-même de gomme laque, encore d'un second tube de verre, et enfin d'une couche de cire bien lisse. Cette couche isolante doit avoir au moins un centimètre d'épaisseur. Dans l'intérieur du ballon, la couche isolante est entourée, en *x*, d'un anneau de cuivre qui communique avec un bouton extérieur *c*.

Ayant fait le vide le plus parfait possible dans le ballon, on y introduit quelques gouttes d'éther ou d'essence de térébenthine, au moyen du robinet *a*, puis

on fait le vide de nouveau, de manière qu'il ne reste dans le ballon qu'une vapeur extrêmement raréfiée. Posant alors, sur l'une des branches d'un fort électro-aimant AB, un disque épais de fer doux o muni d'un bouton, on applique sur ce disque l'extrémité m de la tige mn ; puis on fait arriver les deux bouts du fil induit de la bobine de Ruhmkorff, l'un au bouton c , l'autre au bouton o . Or si l'on fait alors marcher la bobine sans que l'électro-aimant fonctionne, les électricités contraires des fils s et r passant, celle du premier fil jusqu'à l'extrémité supérieure n de la tige de fer doux, et celle du second fil à l'anneau x , une gerbe lumineuse plus ou moins régulière apparaît à l'intérieur du ballon de n en x , tout autour de la tige, comme dans l'expérience de l'œuf électrique.

Mais si l'on fait passer un courant dans l'électro-aimant, aussitôt le phénomène change : au lieu de partir des différents points du contour supérieur n et de l'anneau x , la lumière se condense et jaillit en un seul arc lumineux de n en x . De plus, cet arc tourne assez lentement autour du cylindre aimanté mn , tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, selon la direction du courant rs ou le sens de l'aimantation. Dès que l'aimantation cesse, le phénomène lumineux redevient ce qu'il était auparavant.

Cette expérience a été imaginée par de la Rive pour expliquer, par l'influence du magnétisme terrestre, une sorte de mouvement rotatoire de l'ouest à l'est, en passant par le sud, qu'on observe dans les aurores boréales. En effet, la rotation de l'arc lumineux, dans l'expérience ci dessus, doit évidemment se rapporter à la rotation des courants par les aimants (840).

* DIAMAGNÉTISME

913. **Substances diamagnétiques et substances paramagnétiques.** — On a déjà vu (861) que les aimants agissent réellement sur toutes les substances, par attraction sur les unes, et par répulsion sur les autres. Ces effets, qui furent d'abord attribués à la présence de quantités infiniment petites de fer dans les substances sur lesquelles on expérimentait, ne furent nettement établis que par Faraday, en 1847, à l'aide d'électro-aimants très-puissants.

Ce savant a appelé *diamagnétiques* les corps repoussés, et *paramagnétiques*, ou simplement *magnétiques*, ceux qui sont attirés; et comme il expérimentait avec des électro-aimants, il a donné le nom de *direction axiale* à celle qui coïncide avec la droite qui joint les deux pôles de l'électro-aimant, et celui de *direction équatoriale* à celle qui est perpendiculaire à la même ligne. Le même savant a reconnu que le nombre des substances diamagnétiques est beaucoup plus grand que celui des substances magnétiques.

Les substances diamagnétiques sont le bismuth, le plomb, l'antimoine, le zinc, le cuivre, le cristal de roche, le verre, le sel marin, le plâtre, le charbon, le soufre, et en général les substances organiques, comme les résines, le sucre, le bois, la chair des animaux. Les substances magnétiques sont le fer, le nickel, le cobalt, le chrome, et la plupart des métaux. On peut admettre aujourd'hui qu'il n'est pas une seule substance sur laquelle n'agissent, dans un sens ou dans l'autre, les aimants très-puissants.

914. **Effets diamagnétiques des aimants puissants.** — Les effets diamagnétiques des aimants ne se manifestent qu'autant que ceux-ci sont très-puissants, et c'est avec l'appareil de Faraday (fig. 782) qu'ils ont été découverts et étudiés. On rencontre des substances diamagnétiques également dans les solides, dans les liquides et dans les gaz, ainsi que le démontrent les expériences suivantes, pour lesquelles on visse, sur les bobines, des armatures de fer doux S et Q de formes diverses (fig. 785 et 787).

1^o *Diamagnétisme des solides.* — Un petit cube de cuivre rouge étant suspendu entre les deux aimants par un fil de soie tordu, et tournant rapidement sur lui-

même par l'effet du fil qui se détord (fig. 786), à l'instant où le courant passe dans les bobines, le cube s'arrête dans la position où il se trouve. Si l'on donne à la pièce mobile la forme d'une petite barre rectangulaire, elle se met en croix avec l'axe des bobines, ou se dirige suivant cet axe, selon qu'elle est formée d'une substance diamagnétique, comme le bismuth, l'antimoine, ou bien d'une substance magnétique, comme le fer, le nickel, le cobalt. Ces phénomènes ont été observés par Faraday, qui les explique par les courants d'induction que les électro-aimants font naître dans les corps mobiles à l'instant où l'on fait passer le courant dans les deux bobines.

2° *Diamagnétisme des liquides.* — Les liquides présentent aussi les phénomènes de magnétisme et de diamagnétisme. Pour en faire l'observation, on en

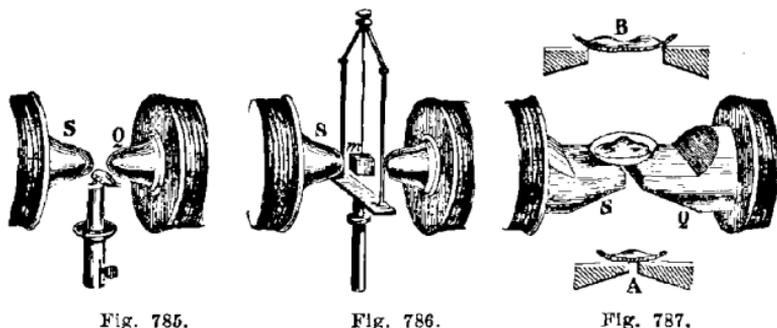


Fig. 785.

Fig. 786.

Fig. 787.

remplit de petits tubes de verre très-minces qu'on suspend à la place du cube *m* dans la figure 786. Si les liquides sont magnétiques, comme les dissolutions de fer, de nickel, de cobalt, les tubes se dirigent dans le sens de l'axe des deux électro-aimants; mais s'ils sont diamagnétiques, comme l'eau, l'alcool, l'éther, l'essence de térébenthine et la plupart des dissolutions salines, les tubes se placent dans une direction perpendiculaire à l'axe des aimants.

L'action des aimants puissants sur les liquides magnétiques ou diamagnétiques s'observe encore au moyen de l'expérience suivante, faite pour la première fois par Plücker. On verse une dissolution de chlorure de fer dans un verre de montre, et l'on pose celui-ci sur les deux armatures S et Q des électro-aimants de l'appareil de Faraday. Aussitôt que le courant passe dans les électro-aimants, on voit la dissolution former, selon l'intervalle des bobines, un ou deux renflements, comme on l'a représenté en A et en B (fig. 787); ces renflements persistent tant que passe le courant, et se produisent, à des degrés différents, avec tous les liquides magnétiques. Les liquides diamagnétiques présentent des effets inverses, ainsi que l'a constaté Plücker pour le mercure, en observant sa courbure sur une pièce d'argent fraîchement amalgamée et posée sur les armatures.

3° *Diamagnétisme des gaz.* — Bancalari a observé, le premier, que la flamme d'une bougie placée entre les deux bobines de l'appareil de Faraday en est fortement repoussée (fig. 785). Toutes les flammes présentent, à des degrés différents, le même phénomène. M. Quet a obtenu des effets de répulsion extrêmement intenses en soumettant à la même expérience la lumière électrique de la pile obtenue avec les deux cônes de charbon de la figure 645.

Depuis l'expérience de Bancalari, Faraday et M. Ed. Becquerel ont fait de nombreuses recherches sur le diamagnétisme des gaz, ainsi que nous l'avons déjà dit en parlant de l'action des aimants puissants sur tous les corps (661). De plus, Faraday a reconnu que l'oxygène, qui est magnétique à la température ordinaire, devient diamagnétique à une température très-élevée, et que souvent le magnétisme ou le diamagnétisme d'une substance dépend du milieu

dans lequel elle est. Par exemple, un corps magnétique dans le vide peut devenir diamagnétique dans l'air.

4^o *Détonation produite par la rupture du courant sous l'influence d'un puissant électro-aimant.* — Nous citerons encore, comme effet remarquable de l'appareil de Faraday, l'expérience suivante, due à de la Rive. Lorsqu'on place entre les deux pôles S et Q de la figure 787 les deux extrémités du gros fil dans lequel passe le courant de l'électro-aimant, c'est-à-dire en fermant le courant entre les deux pôles S et Q, cette fermeture a lieu sans étincelle et sans bruit, ou seulement avec un bruit et une étincelle faibles. Mais au moment où l'on interrompt le courant, on entend une détonation violente, presque aussi forte que celle d'un coup de pistolet, due à l'extra-courant dont l'intensité est puissamment accrue par l'influence des deux pôles de l'électro-aimant.

215. *Théorie du diamagnétisme.* Plusieurs théories ont été proposées pour donner l'explication des phénomènes diamagnétiques. Faraday a admis que lorsqu'un barreau de bismuth, par exemple, est placé entre les deux pôles d'un fort électro-aimant, chaque pôle de celui-ci fait naître dans l'extrémité la plus voisine du barreau un pôle de même nom; en sorte que la cause du diamagnétisme ne serait autre qu'une polarité contraire à la polarité magnétique, hypothèse qui est en opposition avec la théorie du magnétisme.

M. Ed. Becquerel explique le diamagnétisme en admettant que l'éther est lui-même magnétique. Dans cette hypothèse, toute substance plus magnétique que l'éther est attirée par les aimants, mais toute substance moins magnétique est repoussée; ce qui est une application du principe d'Archimède sur les corps plongés dans un fluide, selon qu'ils sont plus ou moins pesants que lui.

MÉTÉOROLOGIE

ET

CLIMATOLOGIE

CHAPITRE PREMIER

MÉTÉORES

916. **Objet de la météorologie.** — On nomme *météores* les phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère, et *météorologie* la partie de la physique qui a pour objet l'étude des météores.

La météorologie est une application de la physique aux phénomènes de l'atmosphère. Elle a reçu d'importants développements depuis une trentaine d'années, et offre aujourd'hui au marin, à l'agriculteur, à l'hygiéniste, des applications d'un haut intérêt. Nous ne pouvons en donner ici que des notions succinctes; pour les lecteurs qui voudraient approfondir cette science toute nouvelle, nous renvoyons aux ouvrages du savant qui est aujourd'hui à la tête des travaux météorologiques en France, M. Marié Davy, directeur de l'Observatoire météorologique de Montsouris ¹.

Les météores se divisent : 1^o en *météores aériens* : les vents, les cyclones, les tornados, les trombes; 2^o en *météores aqueux* : les nuages, les brouillards, la pluie, la rosée, le serein, la neige, la grêle; 3^o en *météores électriques* : les orages, la foudre, les aurores boréales; 4^o en *météores lumineux* : l'arc-en-ciel, les halos, les parhélies.

Météores aériens.

917. **Vents, leur cause.** — Les *vents* sont des courants aériens qui ont toujours pour cause des différences de température et par suite de densité entre des régions de l'atmosphère plus ou moins distantes. L'air échauffé au contact du sol s'élevant par le même effet que les gaz de la combustion dans nos cheminées (460), il se produit une convection semblable à celle qu'on a vue se former dans les liquides chauffés par leur partie inférieure (416). De là des courants ascen-

¹ 1^o *Les Mouvements de l'atmosphère et des mers au point de vue de la prévision du temps.* — 2^o *Annuaire météorologique et agricole de l'Observatoire de Montsouris.* — 3^o *Instruction sur l'installation et l'usage des instruments de météorologie.*

dants d'abord; puis, l'air se dilatant à mesure que la pression diminue, il se refroidit et cesse de s'élever. Les courants deviennent alors horizontaux et se dirigent, dans les hautes régions de l'atmosphère, des régions chaudes vers les régions froides; ce sont des *vents d'impulsion*. Au contraire, dans les basses régions, l'air chaud qui s'élève faisant appel comme dans le tirage des cheminées, des courants se produisent des parties froides vers les parties chaudes; ce sont des *vents d'aspiration*.

918. **Direction et vitesse des vents.** — Quoique les vents soufflent dans toutes les directions, on en distingue huit principales, qui sont le *nord*, le *nord-est*, l'*est*, le *sud-est*, le *sud*, le *sud-ouest*, l'*ouest* et le *nord-ouest*. Les marins partagent en outre les intervalles entre ces 8 directions en 4, ce qui fait en tout 32 directions, qu'on désigne respectivement sous le nom de *rumbs*. Le tracé de ces 32 *rumbs* sur un cercle, en forme d'étoile, est connu sous le nom de *rose des vents*.

La direction du vent se détermine à l'aide de girouettes; quant à sa vitesse, elle se mesure au moyen de l'*anémomètre*. On nomme ainsi un petit moulinet à ailettes que le vent fait tourner; du nombre de tours fait en un temps donné on déduit la vitesse. Dans nos climats, la vitesse moyenne est de 5 à 6 mètres par seconde. Avec une vitesse de 2 mètres, le vent est modéré; avec 10 mètres, il est frais; avec 20 mètres, il est fort; de 25 à 30 mètres, il y a tempête; et de 30 à 40 mètres, ouragan.

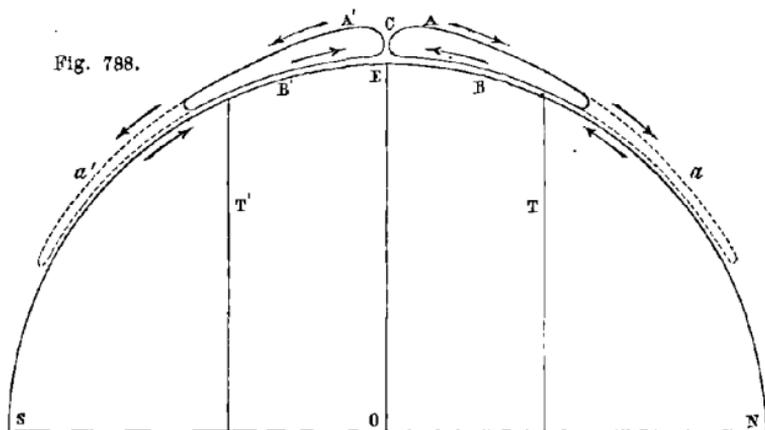
919. **Vents réguliers ou alizés.** — On nomme *vents réguliers* des vents qui soufflent toute l'année dans une direction constante. Ces vents, connus aussi sous le nom de *vents alizés*, s'observent loin des côtes, sans interruption, dans la zone torride, soufflant du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère boréal, et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère austral. Ils règnent, des deux côtés de l'équateur, jusqu'à 30 degrés de latitude.

Les vents alizés ont pour cause l'aspiration permanente qui se produit sous l'équateur par suite du fort échauffement de l'air à la surface des continents et des mers. Au-dessus de celles-ci l'air est en outre presque saturé de vapeurs d'eau qui en diminuent la densité. Par cette double cause, la pression est toujours moindre dans les régions équatoriales que dans les régions nord et sud, et de là, dans chaque hémisphère, deux courants de sens contraires: l'un, d'air chaud, dirigé de l'équateur vers le pôle, et occupant les hautes régions de l'atmosphère; l'autre, d'air froid, dirigé du pôle vers l'équateur, et occupant les régions inférieures, à cause de sa plus grande densité. Si la terre était immobile, ces courants avanceraient en chaque point suivant un méridien; mais il n'en peut être ainsi à cause de la rotation de la terre de l'occident vers l'orient. En effet, l'atmosphère participant à ce mouvement, à mesure que le courant parti du pôle avance vers le sud, il pénètre dans des couches d'air animées d'une vitesse de rotation plus grande que la sienne; il avance donc vers l'orient plus lentement que les couches qu'il traverse. Par suite, il s'infléchit vers l'ouest d'autant plus, qu'il approche davantage de l'équateur, et de là un vent soufflant du nord-est. En résumé, le courant polaire souffle

d'abord du nord, puis du nord-est, et enfin de l'est; telle est, dans les deux hémisphères, l'origine des vents alizés.

Dans les hautes régions de l'atmosphère, un phénomène semblable se produit, mais en sens contraire : le courant parti de l'équateur, en avançant vers le nord, va toujours, à cause de sa plus grande vitesse, en s'inclinant vers l'est, et tend à se transformer de plus en plus en vent d'ouest, de sud qu'il est d'abord; c'est l'*alizé supérieur*, ou *contre-alizé*.

Dans le cas où la terre ne tournerait pas sur son axe et où l'échauffement serait le même au nord et au sud de l'équateur, la figure 788 montre la marche des alizés et des contre-alizés dans les deux hémisphères. N et S étant les deux pôles de la terre, OE l'équateur, T et T'



les tropiques, la nappe ascendante se produit en C dans la région équatoriale, et, arrivée dans les hautes régions de l'atmosphère, elle se partage en deux nappes A, A', l'une vers le nord, l'autre vers le sud, lesquelles se rapprochent de la terre à mesure qu'elles se refroidissent : ce sont les contre-alizés. Puis, dans la partie inférieure de l'atmosphère, par suite de l'appel de la nappe ascendante C, il se produit deux nappes B, B', allant des zones tempérées vers l'équateur : ce sont les alizés proprement dits.

En C, le courant ascendant qui lie l'alizé au contre-alizé est bien déterminé, et n'éprouve que de légers déplacements vers le nord ou vers le sud, suivant les saisons et suivant qu'il se forme au-dessus des mers ou au-dessus des continents. Le courant descendant qui, dans chaque hémisphère, relie l'alizé supérieur à l'alizé inférieur n'est pas aussi bien limité : après avoir dépassé le tropique, le contre-alizé ne se rabat pas en entier pour joindre l'alizé inférieur; une partie seulement revient vers l'équateur, tandis que l'autre continue à avancer vers le pôle jusqu'à une latitude assez élevée, comme le représentent les lignes ponctuées de la figure. Il existe donc en réalité, dans chaque hémisphère, deux circuits, l'un entre l'équateur et le tropique, c'est le

circuit direct; l'autre du tropique vers le cercle polaire, c'est le *circuit dérivé*. Le *circuit direct* atteignant une grande hauteur, ses deux vents restent superposés et ne se rencontrent pas; mais le *circuit dérivé* étant peu élevé, ses deux vents marchent sensiblement de niveau dans deux lits qui se déplacent, tantôt juxtaposés, tantôt se rencontrant, et donnant alors naissance aux vents variables, aux bourrasques et aux tempêtes des zones tempérées.

La figure 788 représente la marche des circuits directs et dérivés dans l'hypothèse de l'immobilité de la terre autour de son axe. Dans ce cas, en effet, les circuits seraient tout entiers dans un même plan; mais comme on a vu plus haut que, par suite de la rotation de la terre, l'alizé avance vers l'ouest et le contre-alizé vers l'est, les deux alizés ne sont pas contenus dans un même plan, et la figure ci-dessus n'est que la projection de leurs circuits sur un même méridien. En outre, on a supposé la distribution de la chaleur symétriquement la même des deux côtés de l'équateur, et, dans ce cas, la nappe ascendante figurée en C serait exactement au-dessus de l'équateur. Mais l'hémisphère nord est plus chaud que l'hémisphère sud; d'où il résulte que cette nappe est déplacée vers le nord de l'équateur. Les circuits directs et dérivés subissant le même déplacement, les alizés A et B s'étendent au delà du tropique nord, tandis que les alizés A' et B' n'atteignent pas le tropique sud. En réalité, dans la figure ci-dessus, les différents circuits doivent donc être avancés un peu vers le nord.

920. **Région des calmes.** — Les alizés des deux hémisphères, quoique convergents vers l'équateur, n'y donnent naissance qu'à un vent très-léger. En effet, leur direction devenant alors verticale, leur résultante horizontale tend à devenir nulle; de là des calmes qu'on désigne sous le nom de *calmes équatoriaux*, calmes troublés toutefois par des orages presque quotidiens.

La région des calmes est variable: au nord de l'Afrique, où l'air est fortement échauffé au-dessus du Sahara, elle remonte de 20 degrés vers le nord; sur l'Atlantique, elle atteint le 10° degré de latitude N. Sur le Pacifique, la région des calmes s'écarte peu de l'équateur. Ses déplacements sont plus grands en été qu'en hiver, et, en général, elle présente les mêmes sinuosités que les courbes des températures maxima (948).

Lorsque, à l'extrémité de leur parcours, les contre-alizés s'abaissent vers la terre, leur inclinaison dans le sens de la verticale produit un effet analogue à celui que produit la nappe ascendante à l'équateur; c'est-à-dire qu'on observe encore une région des calmes, mais moins bien caractérisée que la première: ce sont les *calmes tropicaux*.

Il y a donc lieu de considérer, à partir de l'équateur: 1° la région des calmes équatoriaux; 2° celle des alizés; 3° celle des calmes tropicaux; 4° enfin, la région des vents variables (922).

921. **Vents périodiques, moussons, simoun, brise.** — Les *vents périodiques* sont des vents qui soufflent régulièrement dans la même direction, aux mêmes saisons, ou aux mêmes heures de la journée; tels sont la mousson, le simoun et la brise.

On nomme *moussons* des vents qui soufflent six mois dans une direction et six mois dans une autre. On les observe principalement dans la mer et dans le golfe d'Arabie, dans le golfe du Bengale et dans la mer de Chine. Ces vents sont dirigés vers les continents dans l'été, et en sens contraire dans l'hiver.

Les moussons d'été ont pour cause la haute température qu'atteint alors le versant méridional des monts Himalaya. Une nappe d'air chaud s'élève le long de ce versant, et donnant naissance à une puissante aspiration des alizés du sud-est, elle les transforme en moussons, de la mer vers le continent. Pendant l'hiver, le continent se refroidissant plus que la mer, l'aspiration se produit au-dessus de l'Océan indien, et les moussons soufflent en sens contraire.

Toutes les grandes chaînes de montagnes produisent des effets semblables.

Le *simoun* est un vent brûlant qui souffle des déserts de l'Asie et de l'Afrique, et qui est caractérisé par sa haute température et par les sables qu'il élève dans l'atmosphère et transporte avec lui. Quand ce vent souffle, l'air s'obscurcit, la peau se dessèche, la respiration s'accélère, et la soif devient ardente.

Ce vent est connu sous le nom de *sirocco* en Italie et à Alger, où il souffle du grand désert de Sahara. Il porte le nom de *khamsein* en Égypte, où il se fait sentir depuis la fin d'avril jusqu'en juin. Pour se préserver des effets d'une transpiration cutanée trop rapide occasionnée par ce vent, les indigènes de l'Afrique s'enduisent le corps de graisse.

La *brise* est un vent qui souffle sur les côtes, de la mer vers la terre, le jour, et de la terre vers la mer, la nuit; c'est-à-dire de la région la plus froide vers la région la plus chaude. En effet, le sol s'échauffant plus que la mer pendant le jour, l'air, dilaté sur le continent plus que sur la mer, s'élève et est remplacé par un courant d'air plus dense, arrivant de la mer vers la terre. La nuit, le sol se refroidissant plus que l'eau de la mer par le rayonnement, le même phénomène se reproduit en sens contraire. La brise de mer commence après le lever du soleil, augmente jusqu'à trois heures de l'après-midi, décroît jusqu'au soir, et se change en brise de terre après le coucher du soleil. Les brises de mer et de terre ne se font sentir qu'à de faibles distances des côtes. Les brises sont régulières entre les tropiques, le sont moins dans nos contrées, et sont à peine sensibles sur les côtes du Groënland. Le voisinage des montagnes donne aussi naissance à des brises périodiques diurnes.

922. **Vents variables.** — Les *vents variables* sont des vents qui soufflent tantôt dans une direction, tantôt dans une autre, sans qu'on puisse constater aucune loi qui préside à leur direction. Dans les latitudes moyennes, la direction des vents est très-variable; en avançant vers les pôles, cette irrégularité augmente, et, sous la zone glaciale, les vents soufflent parfois de plusieurs points de l'horizon. En approchant de la zone torride, ils deviennent de plus en plus réguliers. C'est le vent du sud-ouest qui domine dans le nord de la France, en Angleterre et en Allemagne; dans le midi de la France, la direction des

vents incline davantage vers le nord; en Espagne et en Italie, c'est le vent du nord qui prédomine.

923. **Loi de Dove sur la rotation des vents.** — Malgré la grande irrégularité que présente la direction des vents dans nos climats, on a pu constater que cette direction est, en général, animée d'un mouvement giratoire dans le sens du mouvement apparent du soleil; c'est-à-dire que, dans ses variations, elle tourne avec lui, par périodes plus ou moins longues, de l'est au sud, à l'ouest et au nord dans l'hémisphère boréal, et inversement dans l'hémisphère austral, pour revenir progressivement au point de départ.

Cette loi, connue sous le nom de *loi de la rotation des vents*, avait été soupçonnée dès les temps anciens; mais ce n'est que dans ces dernières années qu'elle a été définitivement établie par l'expérience. A Greenwich, du 1^{er} janvier 1849 au 1^{er} janvier 1861, on a constaté que la girouette a marqué 166 rotations dans le sens ci-dessus de plus que dans le sens opposé. De ces 12 années, deux seulement, 1853 et 1860, ont fait exception, et chacune a donné 2 rotations de plus dans le sens opposé à la marche apparente du soleil.

Pendant leur mouvement giratoire, les vents, dans le nord de la France, s'arrêtent de préférence dans la direction du nord-est et surtout du sud-ouest, comme on l'a déjà dit ci-dessus. Pendant la durée d'une rotation complète des vents, on remarque que le mercure, dans le baromètre, partant du point le plus bas, s'élève et revient exactement à son point de départ; ce qui fait voir que les variations barométriques sont liées aux courants aériens (152).

924. **Cyclones.** — On nomme ainsi des masses considérables d'air, animées autour d'un axe vertical d'un mouvement tournant très-rapide. Ces météores prennent naissance dans la région des calmes équatoriaux, où ils ont toujours pour cause une inégalité de vitesse dans les alizés qui convergent des deux hémisphères l'un vers l'autre.

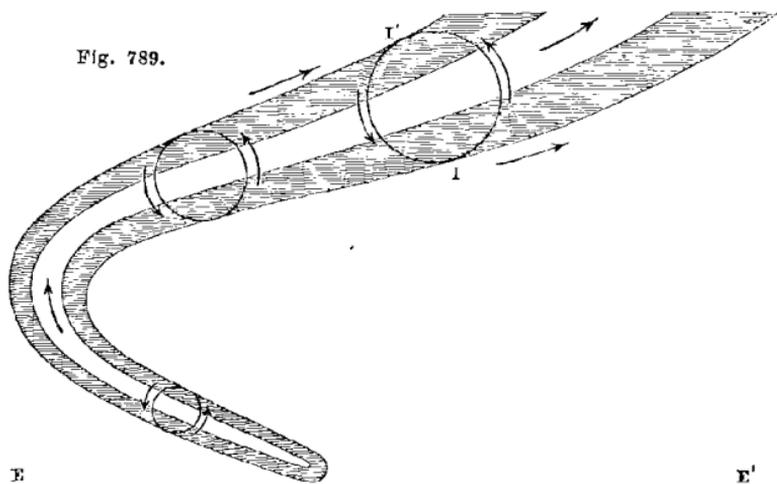
Les cyclones ne sont pas seulement animés d'un mouvement tournant, mais en outre d'un mouvement de translation, en vertu duquel ils s'avancent parfois jusqu'aux zones tempérées. La vitesse du mouvement de rotation atteint son maximum à une distance moyenne du centre du cyclone, et s'élève alors jusqu'à 250 kilomètres à l'heure. Celle de translation, qui croît avec la distance à l'équateur, est comprise dans les limites de 15 à 45 kilomètres à l'heure.

Dans l'hémisphère austral, la rotation s'opère toujours de l'ouest à l'est en passant par le nord. Dans notre hémisphère, la rotation est de sens contraire. Quant à la translation, elle a lieu d'abord, dans les deux hémisphères, de l'est à l'ouest; puis elle s'infléchit vers l'est.

L'équateur étant représenté par la droite EE', la figure 789 montre la marche et le développement d'un cyclone dans l'hémisphère boréal. Le diamètre initial, qui est primitivement de 250 à 400 kilomètres, croît progressivement et atteint, dans les latitudes élevées, jusqu'à 2 000 kilomètres. Au centre se trouve une région relativement calme; des deux régions latérales, celle en I, où les deux vitesses de rotation et de translation s'ajoutent, est le *bord dangereux*, tandis qu'en I',

où les vitesses sont opposées, est le *bord maniable*. Dans tous les cas, les cyclones sont accompagnés d'une baisse considérable du baromètre, surtout au centre, ce qui est un effet de la force centrifuge engendrée par le mouvement tournant.

Ces redoutables phénomènes, heureusement peu fréquents, s'observent surtout dans les mers de Chine et des Indes, où ils sont connus



sous le nom de *typhons*, et aussi aux Antilles. Ils sont toujours signalés par d'épouvantables déastres sur mer et sur terre.

925. **Tornados.** — Les *tornados* sont des rafales violentes qu'on ne rencontre que dans la région des calmes équatoriaux, où ils accompagnent en général les orages si fréquents dans cette zone. Comme les cyclones, ils sont animés d'un mouvement tournant dû à l'inégalité de vitesse des alizés.

Les tornados s'annoncent par un petit nuage blanc qui apparaît à une grande hauteur. Il s'accroît, descend lentement, et en s'approchant de la terre s'entoure d'une nuée sombre qui obscurcit bientôt toute l'atmosphère. Enfin, de la partie la plus noire, au milieu des éclats de la foudre, s'élance avec une extrême violence le tourbillon qui constitue le tornado.

926. **Trombes.** — Les *trombes* sont des amas de vapeurs en suspension dans les couches inférieures de l'atmosphère, qu'elles traversent, animées, le plus souvent, d'un mouvement giratoire assez rapide pour déraciner les arbres, renverser les maisons, briser et détruire tout ce qu'elles rencontrent.

Ces météores, qui sont généralement accompagnés de grêle et de pluie, lancent souvent les éclairs et la foudre, en faisant entendre, sur toute la zone qu'ils parcourent, le bruit d'une charrette roulant sur un chemin rocailleux. Un grand nombre de trombes ne possèdent pas de

mouvement giratoire, et le quart environ de celles qu'on observe prennent naissance dans une atmosphère calme.

Les trombes se manifestent aussi bien sur les mers que sur les continents, et alors le phénomène présente un aspect remarquable. Les eaux s'agitent et s'élèvent en forme de cône, tandis que les nuages s'abaissent

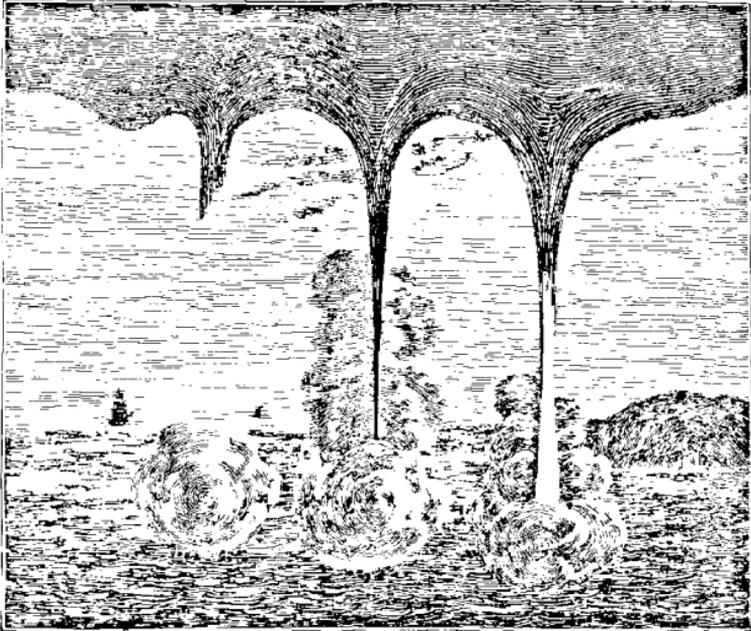


Fig. 790.

eux-mêmes sous la forme d'un cône renverse, les deux cônes se réunissent par leurs sommets et forment une colonne continue de la mer aux nues (fig. 790). Cependant, même en pleine mer, l'eau des trombes n'est jamais salée, ce qui prouve qu'elles sont surtout formées de vapeurs condensées, et non de l'eau de la mer élevée par aspiration.

Les trombes n'ont qu'une faible durée, leur parcours ayant peu de développement, quelques kilomètres seulement. Quant à leur étendue en largeur, on en a observé dont le diamètre ne dépassait pas 200 mètres. Néanmoins elles acquièrent souvent une violence telle, qu'elles renversent les maisons, déracinent les plus gros arbres et les emportent à plus de 100 mètres.

Kæmtz admet qu'elles sont dues à deux vents opposés qui passent l'un à côté de l'autre, ou bien à un vent très-vif qui règne dans les hautes régions de l'atmosphère. Peltier leur a attribué une origine électrique, opinion généralement admise aujourd'hui.

Météores aqueux.

927. **Nuages.** — Les *nuages* sont des amas de vapeurs condensées en gouttelettes d'une petitesse extrême, à une hauteur plus ou moins grande dans l'atmosphère. Ils résultent toujours de la condensation des

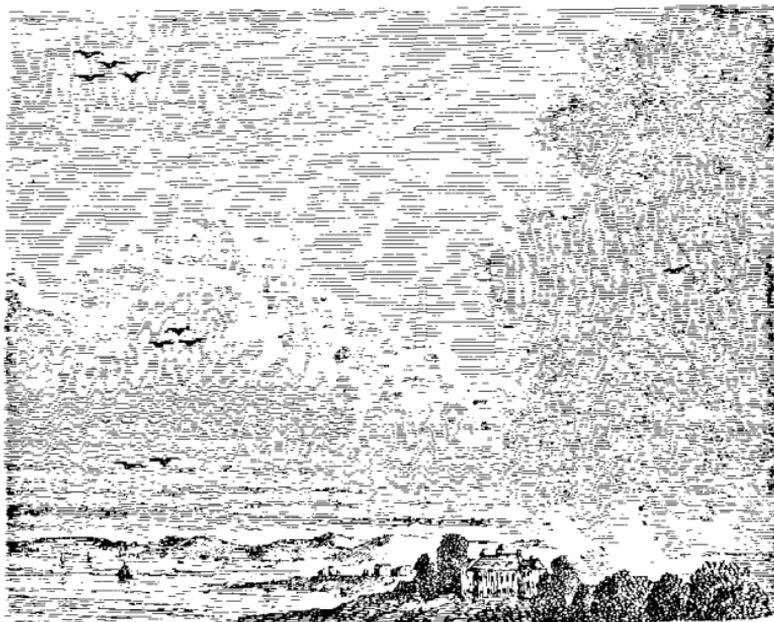


Fig. 791.

vapeurs qui s'élèvent de la terre. D'après les apparences qu'ils présentent, on divise les nuages en quatre espèces principales, qui sont les *cirrus*, les *cumulus*, les *stratus* et les *nimbus*. Ces quatre sortes de nuages sont représentées dans la figure 791, et désignées respectivement par 4, 3, 2 et 1 oiseau au vol.

Les *cirrus* sont de petits nuages blanchâtres, offrant l'aspect de filaments déliés, assez semblables à de la laine cardée. Ce sont les nuages les plus élevés, et, vu la basse température des régions qu'ils occupent, on les regarde comme formés de particules glacées ou de flocons de neige. Leur apparition précède souvent un changement de temps.

Les *cumulus* sont des nuages arrondis, présentant l'aspect de montagnes entassées les unes sur les autres. Ils sont plus fréquents en été qu'en hiver, et, après s'être formés le matin, ils se dissipent généralement le soir. Si, au contraire, ils deviennent alors plus nombreux, et surtout s'ils sont surmontés de *cirrus*, on doit s'attendre à de la pluie ou à des orages.

Les *stratus* sont des couches nuageuses horizontales, occupant les

basses régions de l'atmosphère, et paraissant très-étroites par un effet de perspective. Ils se forment au coucher du soleil et disparaissent à son lever; fréquents en automne, ils sont rares au printemps.

Enfin, les *nimbus*, ou nuages de pluie, sont des nuages qui n'affectent aucune forme caractéristique; ils se distinguent seulement par une teinte d'un gris uniforme et par des bords frangés.

La hauteur des nuages est très-variable; en moyenne, elle est de 1 200 à 1 400 mètres en hiver, et de 3 000 à 4 000 en été. Mais elle est souvent beaucoup plus grande: Gay-Lussac, dans son ascension aérostatique, en juillet, à une hauteur de 7 016 mètres au-dessus du niveau de la mer, observa au-dessus de lui des cirrus qui paraissaient être à une hauteur considérable. M. d'Abbadie a observé, en Éthiopie, des nuages orageux dont la hauteur n'était que de 212 mètres au-dessus du sol.

Pour expliquer la suspension des nuages dans l'atmosphère, Halley proposa, le premier, l'hypothèse des vapeurs vésiculaires, dans laquelle on suppose que les nuages sont formés d'une infinité de vésicules extrêmement petites, creuses comme des bulles de savon, et remplies d'un air plus chaud que l'air ambiant par un effet d'absorption de la chaleur solaire; en sorte que ces vésicules flotteraient dans l'air comme autant de petits ballons. Cette théorie, soutenue par de Saussure, puis par Kratzenstein, par Bravais et par le plus grand nombre des physiciens, a été longtemps universellement enseignée; mais combattue d'abord par Désaguliers, puis par Monge, elle compte aujourd'hui de nombreux contradicteurs. Ceux-ci admettent que les nuages et les brouillards sont formés de gouttelettes d'eau extrêmement petites, pleines et flottant dans l'atmosphère, où elles sont soutenues par les courants d'air chaud ascendants, de même que les poussières légères sont élevées par les vents. Quant à l'immobilité que présentent les nuages dans le sens de la verticale, elle ne serait qu'apparente, selon ces physiciens. Le plus souvent les nuages tombent lentement; mais alors leur partie inférieure se dissipe continuellement dans les couches plus chaudes qu'elle traverse, tandis que leur partie supérieure s'accroît sans cesse par l'addition de nouvelles vapeurs qui se condensent; ce qui explique comment ils paraissent conserver une hauteur constante.

928. **Formation des nuages.** — Plusieurs causes contribuent à la formation des nuages. 1° La basse température des hautes régions de l'atmosphère. En effet, il se dégage constamment de la terre et des eaux, sous l'influence du soleil, des vapeurs qui s'élèvent dans l'air en vertu de leur force élastique et de leur moindre densité; ces vapeurs, rencontrant des couches d'air de plus en plus froides, descendent bientôt à la température de saturation, et c'est alors que, se condensant en gouttelettes infiniment petites, elles donnent naissance aux nuages.

2° Les courants d'air chaud et humide, qui s'élèvent pendant le jour dans l'atmosphère, subissant une pression de plus en plus faible, il en résulte une dilatation qui est une source de froid intense (466), et qui amène la condensation des vapeurs. C'est par cette raison que les hautes montagnes, arrêtant les courants aériens et les forçant à s'élever, sont une cause abondante de pluie.

3° Un courant d'air chaud et humide, qui se mélange avec un air plus froid, subit un refroidissement qui entraîne encore la condensation des vapeurs. C'est ainsi que les vents chauds et humides du sud et du sud-ouest, en se mélangeant à l'air plus froid de nos latitudes, donnent de la pluie. Les vents du nord et du nord-est, qui sont froids, tendent aussi, en se mélangeant à notre atmosphère, à en condenser les vapeurs; mais comme, par l'effet même de cette basse température, ces vents sont très-secs, le mélange résultant atteint rarement la saturation, et généralement ils ne donnent pas de pluie.

929. **Pluie.** — La *pluie* est la chute, à l'état de gouttelettes, de l'eau provenant de la condensation, dans les hautes régions de l'atmosphère, des vapeurs qui s'élèvent du sol. Le plus souvent ce ne sont pas les nuages qu'on voit flotter dans l'air qui donnent la pluie; mais celle-ci se produit au moment même de la condensation des vapeurs, et les gouttelettes atteignent une grosseur d'autant plus forte, qu'elles tombent d'une plus grande hauteur.

On mesure la quantité de pluie qui tombe annuellement dans un lieu

Fig. 792.

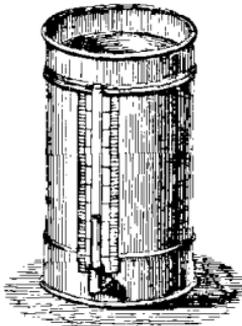
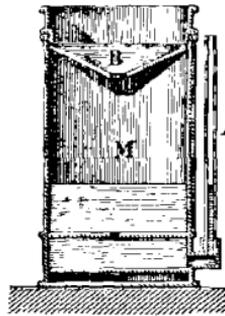


Fig. 793



au moyen du *pluviomètre* ou *udomètre*. C'est un vase cylindrique M (fig. 792 et 793), fermé à sa partie supérieure par un couvercle B, qui a la forme d'un entonnoir dans lequel tombe l'eau de pluie. Celle-ci pénètre ensuite dans le vase par un petit trou, de manière à être soustraite le plus possible à l'évaporation. De la partie inférieure part un tube de verre A dans lequel l'eau s'élève à la même hauteur qu'à l'intérieur, hauteur qu'on lit sur une échelle graduée en millimètres, placée sur le côté du tube. L'appareil étant placé dans un lieu découvert, si, au bout d'un mois par exemple, la hauteur de l'eau dans le tube est de 0^m,05, cela indique que, dans le vase, l'eau a atteint cette hauteur, et, par conséquent, que si l'eau tombée était étendue sur le sol, sans évaporation ni infiltration, il y en aurait une couche de 0^m,05.

On a constaté, à l'Observatoire de Paris, que la quantité de pluie recueillie dans le pluviomètre est d'autant plus grande, que cet instrument est moins élevé au-dessus du sol. La même remarque a été faite en Angleterre et en Amérique. On a d'abord expliqué ce phénomène en disant que les gouttes de pluie, qui sont, en général, plus froides que

les couches d'air qu'elles traversent, condensent la vapeur contenue dans ces couches, et vont, par suite, en augmentant de volume; ce qui fait qu'il tombe plus de pluie à la surface du sol qu'à une certaine hauteur. Mais on a objecté à cette théorie que l'excès de la quantité d'eau qui tombe à la surface du sol sur celle qui tombe à une certaine hauteur dépasse six à sept fois celle qui pourrait résulter de la condensation, même pendant tout le trajet des gouttes de pluie des nuages jusqu'à la terre. On a donc attribué la différence dont il s'agit à une cause purement locale, et l'on admet aujourd'hui que cette différence est occasionnée par des remous qui se produisent dans l'air autour du pluviomètre, d'une manière d'autant plus sensible, qu'il est plus élevé au-dessus du sol, ces remous ayant pour effet de disperser les gouttelettes qui tendent à tomber dans l'instrument et diminuant ainsi la quantité d'eau qu'il reçoit.

Toutefois il reste évident que si les gouttes de pluie traversent un air humide, elles peuvent, d'après leur température, condenser de la vapeur et augmenter de volume. Si, au contraire, elles traversent un air sec, les gouttelettes tendent à se vaporiser, et il tombe moins de pluie sur le sol qu'à une certaine hauteur; il peut même arriver ainsi que la pluie n'atteigne pas la terre.

Un grand nombre de circonstances locales peuvent faire varier la quantité d'eau qui tombe dans divers pays; mais, toutes choses égales d'ailleurs, c'est dans les pays chauds qu'il doit pleuvoir davantage, car la vaporisation y est plus abondante. On observe, en effet, que la quantité de pluie décroît de l'équateur aux pôles. A Paris, la hauteur d'eau qui tombe annuellement est 0^m,564; à Bordeaux, de 0^m,650; à Madère, de 0^m,767; à la Havane, de 2^m,32; à Saint-Domingue, de 2^m,73.

La quantité de pluie varie avec les saisons. A Paris, l'hiver, la hauteur d'eau qui tombe égale 0^m,107; au printemps, 0^m,174; en été, 0^m,161; en automne, 0^m,122. C'est donc l'hiver qu'il tombe le moins d'eau.

930. **Brouillards.** — Les *brouillards* sont des masses de vapeur d'eau qui, condensées dans l'atmosphère, en occupent les basses régions et en troublent la transparence. Ce sont de vrais nuages, qui se forment à la surface du sol par le refroidissement des couches inférieures de l'atmosphère. Les *brumes* sont des brouillards très-épais.

931. **Rosée, serain, gelée blanche.** — La *rosée* n'est autre chose que de la vapeur qui se condense et se dépose en gouttelettes sur les corps pendant la nuit. Ce phénomène est dû au refroidissement qu'éprouvent par l'effet du rayonnement nocturne (467) les corps placés à la surface du sol. Leur température s'abaissant alors de plusieurs degrés au-dessous de celle de l'air, il arrive, surtout dans les saisons chaudes, que cette température devient inférieure à celle à laquelle l'atmosphère serait saturée. C'est alors que les couches d'air en contact avec les corps, et sensiblement à la même température qu'eux, laissent déposer une partie de la vapeur qu'elles contiennent; phénomène analogue à celui qui se produit quand, dans une pièce chaude et humide, on apporte une carafe d'eau fraîche: les vapeurs de l'air se condensent sur ses parois.

D'après cette théorie, due à l'Anglais Wells, toutes les causes qui favorisent le refroidissement des corps augmentent la rosée. Ces causes

sont : le pouvoir émissif des corps, l'état du ciel et l'agitation de l'air. Les corps qui ont un grand pouvoir émissif, se refroidissant davantage, doivent condenser plus de vapeur. En effet, le dépôt de rosée est généralement nul sur les métaux, dont le pouvoir émissif est faible, surtout s'ils sont polis; tandis que la terre, le sable, le verre, les plantes, qui ont un grand pouvoir émissif, se recouvrent abondamment de rosée.

L'état du ciel a aussi une grande influence sur la rosée. S'il est sans nuages, les espaces planétaires, qui sont à une très-basse température, n'envoient vers la terre qu'une quantité de chaleur inappréciable, et le sol se refroidissant alors rapidement par le rayonnement nocturne, il y a un abondant dépôt de rosée. Mais s'il y a des nuages, ceux-ci, dont la température est beaucoup moins basse que celle des espaces planétaires, rayonnent vers le sol, et, par suite, les corps à la surface de la terre n'éprouvant plus qu'un faible refroidissement, le dépôt de rosée n'a pas lieu.

Le vent a aussi une influence sur la quantité de vapeur qui se dépose. S'il est faible, il l'augmente en renouvelant l'air; mais s'il est fort, il la diminue en échauffant les corps par son contact, et en ne laissant pas à l'air le temps de se refroidir. Enfin, le dépôt de rosée est d'autant plus abondant, que l'air est plus humide; car il est plus près de son point de saturation.

Le *serein* est une précipitation d'eau en pluie très-fine, sans qu'il y ait apparence de nuage. Ce phénomène se produit pendant les grandes chaleurs, dans les lieux humides, au coucher du soleil, quand les couches inférieures de l'air se refroidissent au-dessous du point de saturation.

La *gelée blanche* et le *givre* résultent, comme la rosée, des vapeurs contenues dans l'atmosphère, lorsque ces vapeurs se condensent sur des corps à une température au-dessous de zéro. La forme floconneuse que présentent les petits cristaux dont le givre est formé, fait voir qu'ici les vapeurs se congèlent immédiatement sans passer par l'état liquide. Le givre se dépose, de même que la rosée, sur les corps qui rayonnent davantage, tels que les tiges et les feuilles des végétaux, et le dépôt se fait principalement sur les parties tournées vers le ciel.

932. **Neige, grésil, verglas.** — La *neige* est de l'eau solidifiée en petits cristaux étoilés, diversement ramifiés et flottant dans l'atmosphère. Ces cristaux proviennent de la congélation des gouttelettes qui forment les nuages, lorsque leur température descend au-dessous de zéro. Ils sont d'autant plus réguliers, qu'ils se sont formés dans un air plus calme. Pour les observer, on les reçoit sur un corps noir et on les regarde avec une forte loupe. La régularité et en même temps la variété de leurs formes sont vraiment admirables. La figure 794 fait voir quelques-unes des formes que présentent les cristaux de neige, quand on les observe au microscope. Leurs variétés s'élèvent à plusieurs centaines.

Il neige d'autant plus dans un lieu, qu'il est plus voisin des pôles ou plus élevé au-dessus du niveau des mers. Vers les pôles, la terre est constamment couverte de neige; il en est de même sur les hautes montagnes, où règnent des neiges perpétuelles, même sous l'équateur.

Le *grésil*, qui est aussi de l'eau solidifiée, est formé de petites aiguilles de glace pressées les unes contre les autres d'une manière confuse. On

attribue sa formation à la congélation brusque des gouttelettes des nuages dans un air agité.

Le *verglas* est une couche de glace unie et transparente qui se dépose sur le sol. La condition nécessaire pour sa formation est que la température du sol étant au-dessous de zéro, après quelques jours d'un

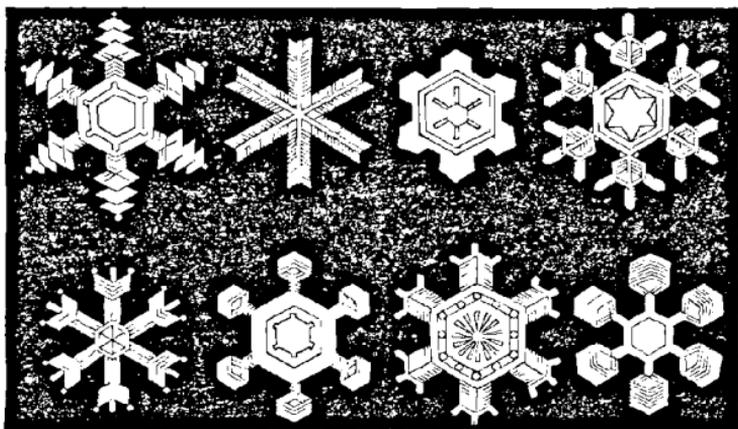


Fig. 794.

froid continu, il vienne à tomber un peu de pluie : celle-ci se congèle aussitôt; mais s'il en tombe une plus grande quantité, le sol s'échauffe et le verglas ne se forme pas.

933. **Grêle.** — La *grêle* est un amas de globules de glace compactes, plus ou moins volumineux, qui tombent de l'atmosphère. Dans nos climats, la grêle s'observe principalement pendant le printemps et l'été, et aux heures les plus chaudes de la journée; il en tombe fort rarement la nuit. La chute de la grêle est toujours précédée d'un bruissement particulier.

La grêle est généralement le précurseur des orages; il est rare qu'elle les accompagne, plus rare qu'elle les suive. La grosseur des grêlons est très-variable : elle atteint fréquemment celle d'une noisette. On en a observé de la grosseur d'un œuf de pigeon, du poids de 200 à 300 grammes. Aucune théorie n'explique d'une manière satisfaisante la formation des grêlons, et surtout comment ils peuvent atteindre un tel poids avant de tomber. Dans la théorie de Volta (721), les grêlons sont successivement attirés par deux nuages chargés d'électricités contraires; mais si les grêlons étaient ainsi attirés, à plus forte raison les deux nuages le seraient l'un par l'autre et se confondraient.

De Saussure admettait que les grêlons commencent à se former dans les hautes régions de l'atmosphère, et augmentent de volume en tombant. De la Rive pense que la grêle provient de gouttes d'eau refroidies au-dessous de zéro et se solidifiant brusquement (340). M. Dufour admet aussi que les grêlons sont dus à la congélation brusque de

globules d'eau flottant dans la région des nuages, et y ayant conservé l'état liquide à une température inférieure à zéro. Quelques globules venant à se solidifier, dès qu'ils heurtent d'autres globules encore liquides, ceux-ci se solidifient instantanément, ainsi qu'on l'a vu en traitant de la surfusion (340), les nouveaux globules se soudent aux premiers, ce qui explique le volume qu'atteignent les grêlons.

Météores électriques.

934. **Découverte de l'électricité de l'atmosphère par Franklin.** — Dès que l'étincelle électrique fut connue, on la compara à la lueur de l'éclair, et le petillement qui l'accompagne au bruit du tonnerre; mais c'est Franklin qui, le premier, à l'aide des batteries électriques, établit un parallèle complet entre la foudre et l'électricité, et indiqua, dans un mémoire publié en 1749, les expériences à faire pour soutirer aux nuages orageux leur électricité au moyen de pointes métalliques. Guidé par les idées théoriques de Franklin, Dalibard, physicien français, dressa dans un jardin, à Marly, près Paris, une barre de fer isolée, de 33 mètres de hauteur, laquelle, sous l'influence d'un nuage orageux, donna, le 10 mai 1752, des étincelles assez fortes pour charger plusieurs bouteilles de Leyde. Cependant Franklin, de son côté, se disposait à faire l'expérience qu'il avait annoncée; il attendait pour cela qu'un clocher qui était en construction fût terminé, lorsqu'il eut la pensée de faire usage d'un cerf-volant muni d'une pointe métallique, qui pouvait atteindre à de plus hautes régions dans l'atmosphère. En juin 1752, par un temps d'orage, et avant de connaître l'expérience de Dalibard, il se rendit donc dans un champ, près de Philadelphie, en compagnie de son jeune fils. Là, ayant lancé le cerf-volant, il attacha une clef à la corde, et à la clef un cordon de soie destiné à isoler l'appareil; puis il fixa le cordon de soie à un arbre. Ayant présenté la main à la clef, il ne recueillit d'abord aucune étincelle, et commençait à désespérer du succès, quand, une légère pluie étant survenue, la corde devint bon conducteur, et la clef donna l'étincelle désirée. L'émotion du célèbre physicien fut si vive, ainsi qu'il le raconte lui-même dans ses lettres, qu'il ne put retenir ses larmes.

Franklin, qui avait découvert le pouvoir des pointes (697), mais qui en ignorait la théorie, admettait que le cerf-volant soutirait au nuage son électricité; mais, d'après la théorie de l'électrisation par influence (701), le phénomène doit s'expliquer par l'influence que le nuage orageux exerçait sur le cerf-volant et sur la corde.

935. **Appareils pour apprécier l'électricité de l'atmosphère.** — Les premiers appareils dont on a fait usage pour reconnaître la présence de l'électricité dans l'atmosphère sont : l'électromètre à boules de sureau, à pailles ou à feuilles d'or, l'appareil de Dalibard, des flèches lancées dans l'atmosphère, et même des cerfs-volants ou des ballons captifs.

Pour observer l'électricité pendant un temps serein, où la tension est généralement faible, on emploie de préférence l'électromètre que Saussure avait appliqué à ce genre de recherches. C'est un électro-

mètre semblable à celui déjà décrit (707), mais dont la tige qui porte les feuilles d'or ou les pailles est surmontée d'un conducteur de 60 centimètres de hauteur, terminé en boule ou en pointe (fig. 795). Pour préserver l'appareil de la pluie, on le couvre d'un chapeau métallique d'un décimètre de diamètre. La cage de verre, qui est carrée, n'a que 5 centimètres de côté, et un cadran divisé, appliqué sur sa face antérieure, indique l'angle d'écart des feuilles d'or ou des pailles. Cet électromètre ne donne des signes d'électricité atmosphérique qu'autant qu'on l'élève dans l'atmosphère, de façon qu'il se trouve dans des courants d'air dont l'état électrique soit supérieur au sien. Une élévation de 3 décimètres suffit pour obtenir une divergence de 20 degrés par suite de l'excès d'électricité.

Fig. 795.



Saussure s'est aussi servi, pour reconnaître l'électricité de l'atmosphère, d'une boule de cuivre qu'il lançait verticalement avec la main. Cette boule était fixée à l'extrémité d'un fil métallique, dont l'autre bout était lié à un anneau qui pouvait glisser le long du conducteur de l'électromètre. D'après l'écart des pailles ou des feuilles d'or, on estimait l'état électrique de l'air à la hauteur où était parvenue la boule. M. Becquerel, dans des expériences faites sur le mont Saint-Bernard, a perfectionné l'appareil de Saussure, en remplaçant la boule par une flèche qu'on lançait dans l'atmosphère avec un arc fortement tendu. Un fil de soie recouvert de clinquant, de 80 mètres de longueur, était fixé d'un bout à la flèche, et communiquait de l'autre avec la tige d'un électromètre.

Peltier a fait usage d'un électromètre à feuilles d'or, portant à la partie supérieure un globe de cuivre un peu gros. Avec cet instrument, l'observateur se place dans un endroit qui domine les lieux environnants, et il suffit alors d'élever l'électromètre de quelques décimètres, pour le voir donner des signes d'électricité.

Quand on veut observer l'électricité des nuages, comme la tension électrique est alors très-considérable, on fait usage d'une longue barre métallique terminée en pointe, comme celle qu'avait adoptée Dalibard dans l'expérience décrite ci-dessus. Cette barre, qui est isolée avec soin, est fixée au faite d'un édifice, et sa partie inférieure est mise en communication avec un électromètre ou même avec un carillon électrique (fig. 595), qui annonce la présence des nuages orageux. Toutefois, la barre pouvant donner alors des étincelles redoutables, on doit placer auprès une boule métallique dont la communication

avec le sol soit bien établie, et qui soit plus rapprochée de la barre que l'expérimentateur lui-même, afin que, si l'étincelle éclate, ce soit la boule qui soit frappée, et non l'observateur. Richmann, professeur à Saint-Petersbourg, fut tué dans une expérience de ce genre par une étincelle qui le frappa au front.

Enfin, on a fait usage encore de cerfs-volants munis d'une pointe, comme dans l'expérience de Franklin, et communiquant, au moyen d'une corde recouverte de clinquant, avec un électromètre. On a employé aussi des ballons retenus captifs par des cordes métalliques.

936. **Électromètre à conducteur mobile du professeur Palmieri.** — Pour observer l'électricité de l'atmosphère, et mesurer sa tension, M. Palmieri, le célèbre directeur de l'Observatoire du Vésuve, a adopté un électromètre bifilaire en communication avec l'atmosphère par un long conducteur mobile, qu'on élève plus ou moins au-dessus du lieu de l'observation.

La figure 796 représente cet électromètre, la figure 797 en donne le détail sur une plus grande échelle, et la figure 798 montre comment on le fait fonctionner dans un appartement bien exposé, c'est-à-dire qui n'est dominé ni par d'autres édifices, ni par des arbres.

L'appareil se compose d'une cage de verre surmontée d'un tube A de même matière, de 30 centimètres de long et terminé par un petit treuil *i*. Sur celui-ci s'enroule un fil de cocon qui descend passer dans un crochet fixé à un disque très-léger d'aluminium *r* (fig. 797), puis revient s'enrouler sur le treuil *i*, de manière que l'écart des deux fils surpasse, au sommet, de 3 à 4 millimètres l'écart inférieur. Le crochet qui porte le disque *r* est traversé par une aiguille très-légère *a b*, aussi d'aluminium.

Au-dessous du disque *r* est un godet de laiton *K*, de 27 millimètres de diamètre, et profond de 3. A ce godet sont fixées deux tiges *m* et *n*, de laiton, dépassant un peu les bords du godet, mais sans toucher l'aiguille *a b*. Du pied du même godet s'élèvent deux bras qui portent un limbe gradué sur son pourtour (fig. 796), le zéro de la graduation

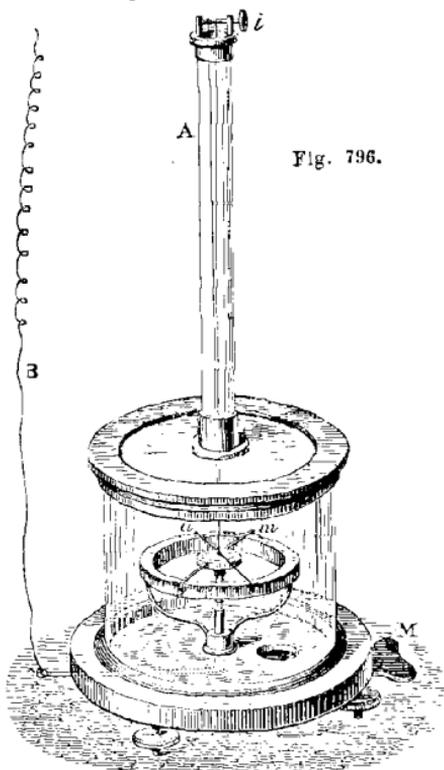


Fig. 796.

correspondant aux tiges fixes m , n . On lit sur ce limbe la divergence de l'aiguille $a b$ quand elle s'écarte de $m n$. Enfin, du pied de la tige qui porte le godet part une tige métallique horizontale qui communique avec un fil de cuivre B, qui se rend au conducteur mobile qu'on élève dans l'atmosphère.

La figure 798 montre comment on fait fonctionner l'électromètre. Il est posé sur une planchette devant laquelle est établi le conducteur mobile $o r$, qui consiste en un tube creux de laiton, de 2 mètres de long et d'un diamètre de 15 millimètres. Il est terminé à son sommet par un

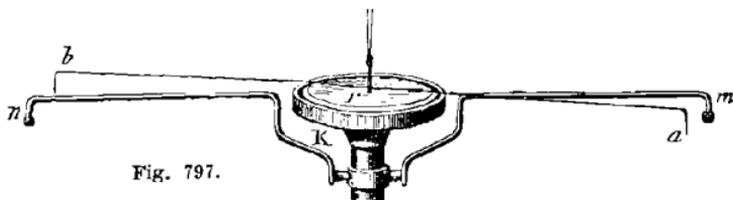


Fig. 797.

disque de laiton x , de 26 centimètres de diamètre, et à son bout inférieur il est mastiqué à un bâton de verre o , qui l'isole. Celui-ci s'engage dans une garniture de cuivre dans laquelle est une poulie qui sert à élever et abaisser le conducteur. Pour cela, un cordon de soie descend du plafond, s'enroule sur la poulie, puis remonte vers une deuxième poulie d'où on le tire avec la main. A sa partie inférieure, le conducteur mobile est relié à une tige de bois qui glisse dans un manchon au-dessous d'un plancher élevé de 2 mètres au-dessus du sol. La course du conducteur mobile est d'environ 1^m,50.

Le conducteur mobile porte un chapeau conique y , qui, lorsque le conducteur est abaissé, s'appuie sur un cône Z , de bois ou de caoutchouc durci, et ferme l'appartement. Enfin, le conducteur étant en communication par trois lames élastiques, comme on le voit sur la gauche du dessin, avec un triangle de fer maintenu par trois cordons de soie C , c'est à ce triangle que s'attache le fil de cuivre B, qui se rend au pied de l'électromètre.

Ces détails connus, lorsqu'on élève rapidement le conducteur, celui-ci, prenant l'électricité des couches d'air qu'il atteint, la transmet par le fil B au godet K et aux bras $m n$. Ces derniers agissant par influence sur l'aiguille $a b$, qui est isolée, en soutirent l'électricité contraire; en sorte que, restant chargée de la même électricité que les bras $m n$, l'aiguille diverge d'un angle qui fait connaître la tension.

A côté de l'électromètre bifilaire est placé un électroscope de Bohnenberger P (752) qui fait connaître l'espèce d'électricité. Pour cela, on détache le fil B de l'électromètre, et on l'applique au bouton supérieur de l'électroscope. Le pôle vers lequel se porte alors la feuille d'or suspendue au bouton fait connaître l'espèce d'électricité de l'atmosphère.

Pour que l'électromètre bifilaire puisse mesurer la tension, il faut connaître le rapport entre celle-ci et les déviations de l'aiguille. Or, en appelant arc *impulsif* celui qu'elle parcourt au premier instant, et arc *définitif* celui où elle s'arrête, M. Palmieri a trouvé :

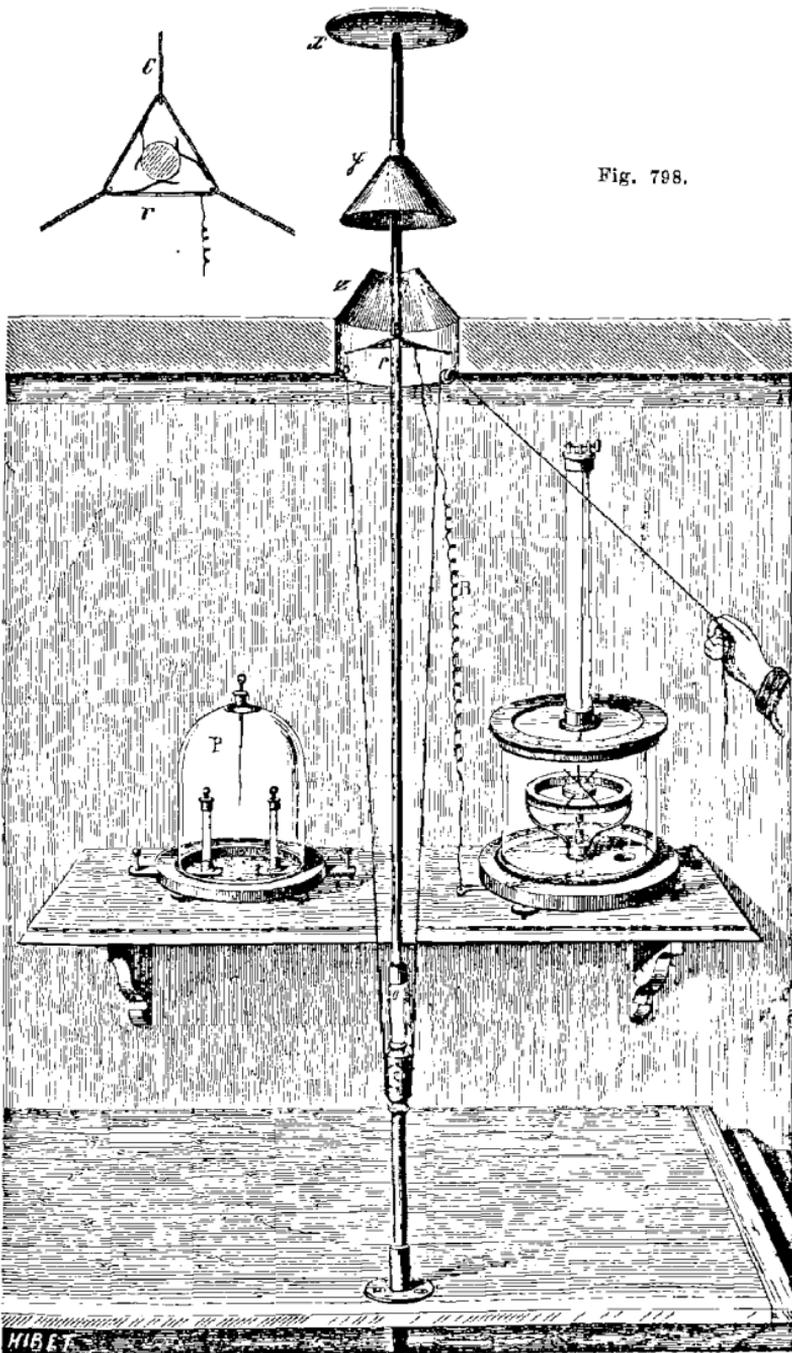


Fig. 798.

1^o Que, jusqu'à 60 degrés, les arcs impulsifs sont proportionnels aux tensions;

2^o Que, par les temps secs, les arcs définitifs sont sensiblement la moitié des arcs impulsifs.

Cette dernière propriété permet d'opérer avec les arcs impulsifs, ce qui offre l'avantage de n'avoir que très-peu de perte, puisque la tension est mesurée au moment même où elle se produit.

Pendant les temps humides, on n'obtient pas les arcs qu'on devrait avoir, et l'arc définitif n'est plus la moitié de l'arc impulsif; mais de la différence entre l'arc définitif observé et l'arc théorique on peut déduire les pertes.

937. **Électricité habituelle de l'atmosphère et des nuages, sa cause.** — Après des observations continuées pendant plusieurs années, et à l'aide de l'électromètre à conducteur mobile, M. Palmieri est arrivé aux résultats suivants, qui diffèrent en plusieurs points de ceux admis jusqu'ici par les météorologistes.

1^o Par un ciel serein comme par un ciel nuageux, l'électricité de l'atmosphère est toujours positive, pourvu qu'à une certaine distance du lieu d'observation il ne tombe ni pluie, ni grêle, ni neige. Cette distance varie avec l'abondance de la pluie, de la neige ou de la grêle, et son maximum est de 30 à 60 kilomètres. D'après M. Palmieri, si l'on observe de l'électricité négative dans l'atmosphère par un ciel nuageux, il ne faut point l'attribuer à des nuages négatifs, mais à ce qu'il pleut, neige ou grêle dans les contrées voisines. Pendant vingt années d'observations, à une altitude de 637 mètres, quand des nuages passaient sur l'Observatoire du Vésuve et l'enveloppaient pendant des journées entières, le savant italien a constamment observé dans les nuages de l'électricité positive.

2^o L'électricité de l'atmosphère augmente à mesure que s'accroît l'humidité relative, et atteint son maximum à la chute de la pluie, de la neige ou de la grêle, non-seulement sur le lieu de l'observation, mais jusqu'à la distance de 60 kilomètres; et c'est alors seulement qu'on peut tirer des étincelles des conducteurs isolés et bien exposés.

3^o Les nuages seuls n'ont pas par eux-mêmes une tension propre par rapport au milieu ambiant; et dans les nuages, ou à une petite distance de ceux-ci, on n'observe de tensions assez fortes que pendant que les vapeurs se condensent en nuages pour porter la pluie à quelque distance du lieu d'observation. En effet, on n'obtient jamais de décharge lumineuse sans qu'il y ait chute de pluie, de neige ou de grêle dans le lieu où se font les observations, ou à une certaine distance.

4^o La loi suivant laquelle se manifeste l'électricité pendant les pluies tranquilles ou orageuses peut s'énoncer ainsi : *Là où tombe la pluie, il existe une forte manifestation d'électricité positive, entourée d'une zone d'électricité négative, suivie elle-même d'une autre zone d'électricité positive*, la limite entre deux zones étant à la tension zéro. Par suite, on peut observer de fortes tensions positives ou négatives, suivant la position qu'on occupe par rapport à la pluie; et on passe d'une phase à l'autre, si la pluie, commençant à tomber à une certaine distance,

s'approche du lieu d'observation, y tombe et s'en éloigne ensuite. D'où M. Palmieri conclut que les nuages ne sont point des conducteurs électrisés, mais une source d'électricité positive pendant qu'ils se résolvent en pluie; en sorte que c'est leur forte tension positive qui, par influence, excite, à l'entour, de l'électricité négative. En un mot, les nuages possédant une électricité négative propre n'existent pas, et s'il arrive parfois d'avoir de l'électricité négative pendant la pluie sur le lieu de l'observation, elle est due à une autre pluie beaucoup plus forte qui tombe à distance.

5^o Enfin, M. Palmieri a démontré directement, par des expériences de cabinet, que les vapeurs aqueuses, en se condensant, développent de l'électricité positive; d'où il conclut que *c'est à la condensation des vapeurs dans les hautes régions de l'atmosphère qu'il faut attribuer l'électricité des nuages*; et que c'est par suite d'une condensation continue qu'un même nuage peut donner plusieurs foudres.

938. **Éclair.** — L'éclair est une lumière éblouissante projetée par l'étincelle électrique qui éclate des nuages chargés d'électricité. La lumière des éclairs est blanche dans les basses régions de l'atmosphère; mais dans les hautes régions, où l'air est plus raréfié, elle prend une teinte violacée, comme le fait en pareil cas l'étincelle de la machine électrique (735).

Les éclairs ont quelquefois plusieurs lieues de longueur. Leur passage dans l'air s'opère le plus souvent en zigzag. On attribue ce phénomène à la résistance que présente l'air comprimé par le passage d'une forte décharge. L'étincelle dévie alors de la ligne droite pour prendre la direction suivant laquelle la résistance est moindre. Dans le vide, en effet, la transmission électrique ne se fait plus en zigzag.

On distingue trois sortes d'éclairs : 1^o Les éclairs en zigzag, qui se meuvent avec une vitesse extrême, sous la forme d'un trait de feu à contours parfaitement déterminés, et qui sont tout à fait comparables à l'étincelle des machines électriques. 2^o Les éclairs qui, au lieu d'être linéaires comme les précédents, embrasent tout l'horizon, sans présenter aucun contour apparent, comme le ferait l'éclat subit d'une explosion de matières inflammables. Ces éclairs, qui sont les plus fréquents, paraissent se produire au sein même de la nue et en éclairer la masse. 3^o Les éclairs en boule; ces éclairs, qui sont quelquefois visibles pendant plus de dix secondes, descendent des nuages sur la terre avec assez de lenteur pour que l'œil puisse les suivre. Ces globes rebondissent souvent à la surface du sol; d'autres fois ils se divisent et éclatent avec un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. On a remarqué que c'est, en général, sous cette forme que se présente la foudre lorsqu'elle pénètre dans l'intérieur des édifices. L'origine de ces éclairs n'est pas connue. Quant aux éclairs dits *éclairs de chaleur*, parce qu'ils brillent dans les nuits d'été sans qu'on aperçoive aucun nuage au-dessus de l'horizon, et sans qu'on entende aucun bruit, ils ne sont autres que des éclairs ordinaires qui éclatent dans les nues situées au-dessous de l'horizon, à des distances telles, que le roulement du tonnerre ne peut arriver jusqu'à l'oreille de l'observateur.

La durée des éclairs n'est pas d'un millième de seconde, ce qui a été constaté par Wheatstone, au moyen d'une roue qu'on fait tourner assez vite pour que les rayons en soient invisibles; mais en les éclairant avec la lumière d'un éclair, la durée de celui-ci est si courte, que, quelle que soit la vitesse de rotation de la roue, elle apparaît complètement immobile, c'est-à-dire que son déplacement n'est pas sensible pendant la durée de l'éclair.

939. **Bruit du tonnerre.** — Le tonnerre est la détonation violente qui succède à l'éclair dans les nuées orageuses. L'éclair et la détonation sont toujours simultanés; mais on observe un intervalle de plusieurs secondes entre ces deux phénomènes, ce qui provient de ce que le son ne parcourt qu'environ 337 mètres par seconde (209), tandis que la lumière n'emploie qu'un intervalle inappréciable pour se propager de la nue à l'œil de l'observateur (484). Par suite, celui-ci n'entend le bruit du tonnerre que cinq ou dix secondes après avoir vu l'éclair, suivant qu'il est distant du nuage orageux de cinq ou dix fois 337 mètres.

Le bruit du tonnerre résulte de l'ébranlement qu'excite, dans la nue et dans l'air, la décharge électrique, ébranlement que rend sensible l'expérience du thermomètre de Kinnersley (738). Près du lieu où éclate l'éclair, le bruit du tonnerre est sec et de courte durée. Plus loin, on entend une série de bruits qui se succèdent rapidement. A une plus grande distance encore, le bruit, faible au commencement, se change en un roulement prolongé, d'intensité très-inégaie. On a proposé de nombreuses hypothèses pour expliquer le roulement du tonnerre; mais aucune ne satisfait complètement. Les uns l'ont attribué à la réflexion du son sur la terre et sur les nuages; d'autres ont considéré l'éclair non pas comme une seule étincelle, mais comme une suite d'étincelles élémentaires qui donnent lieu chacune à une détonation particulière. Ces détonations partielles partant de points diversement éloignés et de zones d'inégale densité, il en résulte que non-seulement elles arrivent à l'oreille de l'observateur successivement, mais qu'elles y apportent des sons d'inégale intensité, ce qui occasionne la durée et l'inégalité du roulement. Enfin, on a attribué ce phénomène aux zigzags mêmes de l'éclair, en admettant qu'il y a un maximum de compression de l'air à chaque angle saillant, ce qui produirait l'inégale intensité du son.

Le maximum de durée du roulement du tonnerre observé à Paris est de 35 à 45 secondes. Dans les pays de montagnes, cette durée est plus grande.

940. **Effets de la foudre.** — La foudre est la décharge électrique qui s'opère entre un nuage orageux et le sol. Celui-ci, sous l'influence de l'électricité du nuage, se charge d'électricité contraire, et lorsque l'effort que font les deux électricités pour se réunir l'emporte sur la résistance de l'air, l'étincelle éclate, ce qu'on exprime, dans le langage ordinaire, en disant que la foudre tombe; mais il ne faudrait pas entendre par là que la foudre se dirige de préférence de haut en bas. Comme les étincelles artificielles, elle tend à frapper dans tous les sens, se dirigeant toujours vers les objets les plus voisins et les mieux en rapport avec le sol. Du reste, on observe aussi des phénomènes de

foudre ascendante, qui se produisent probablement lorsque, les nuages étant électrisés négativement, la terre l'est positivement; car toutes les expériences montrent qu'à la pression ordinaire, le fluide positif traverse plus facilement l'atmosphère que le fluide négatif.

D'après la première loi des attractions électriques (693), la foudre doit tomber sur les objets les plus rapprochés de la nue et les meilleurs conducteurs. On observe, en effet, que ce sont les arbres, les édifices élevés, les métaux, qui sont plus particulièrement frappés par la foudre. C'est pourquoi il est imprudent de se placer sous les arbres, en temps d'orage, surtout si ces arbres sont bons conducteurs, comme les chênes, les ormes. Mais le danger n'est plus le même sous les arbres résineux, comme les pins, parce qu'ils conduisent mal l'électricité.

Les effets de la foudre sont très-variés et de même nature que ceux des batteries (734), mais avec une intensité bien plus considérable. La foudre tue les hommes et les animaux, enflamme les matières combustibles, fond les métaux, brise en éclats les corps peu conducteurs. En pénétrant dans le sol elle fond les matières siliceuses qui se trouvent sur son passage, et il se produit ainsi, dans la direction de la décharge, des tubes vitrifiés qu'on a nommés *tubes fulminaires* ou *fulgurites*, qui ont jusqu'à 10 mètres de long. Enfin, en tombant sur les barres de fer, elle les aimante, et renverse souvent les pôles des aiguilles des boussoles.

La foudre répand, en général, sur son passage une odeur qu'on a comparée à celle du soufre enflammé ou d'une matière phosphoreuse. Cette odeur a été attribuée à un composé oxygéné formé sous l'influence de la décharge électrique, auquel on a donné le nom d'*ozone*. Schœnbein, en 1840, puis Marignac et de la Rive, et enfin MM. Edmond Becquerel et Fremy, ont démontré que l'ozone n'est autre chose que de l'oxygène électrisé.

941. **Choc en retour.** — Le *choc en retour* est une commotion violente et même mortelle que ressentent parfois les hommes et les animaux à une assez grande distance du lieu où la foudre éclate. Ce phénomène a pour cause l'action par influence que le nuage orageux exerce sur tous les corps placés dans sa sphère d'activité. Ces corps se trouvent, ainsi que le sol, chargés d'électricité contraire à celle du nuage; mais si celui-ci se décharge par la recombinaison de son électricité avec celle du sol, immédiatement l'influence cesse, et les corps revenant brusquement de l'état électrique à l'état neutre, il en résulte la secousse qui caractérise le choc en retour. On rend ce phénomène sensible en plaçant une grenouille vivante dans le voisinage d'une forte machine électrique: à chaque étincelle qu'on tire de celle-ci, la grenouille éprouve une secousse brusque.

942. **Paratonnerre.** — Un *paratonnerre* est une tige de fer destinée à présenter un écoulement facile à l'électricité du sol, attirée par l'électricité contraire des nuages orageux. L'invention des paratonnerres est due à Franklin, en 1755.

On distingue dans un paratonnerre deux parties: la tige et le conducteur. La *tige* est une barre de fer rectiligne, terminée en pointe, qu'on fixe verticalement au faite des édifices qu'il s'agit de préserver;

elle a de 6 à 9 mètres de hauteur, et sa section, à la base, est un carré de 5 à 6 centimètres de côté. Le *conducteur* est une barre de fer qui descend du pied de la tige jusqu'au sol, dans lequel elle pénètre profondément. Des barres de fer ne pouvant facilement, à cause de leur rigidité, suivre les contours des édifices, il est préférable de former le conducteur de cordes de fil de fer, comme celles qu'on emploie dans les ponts suspendus. L'Académie des sciences a publié, il y a quelques années, un rapport sur les paratonnerres, dans lequel elle recommande d'employer plutôt des fils de cuivre rouge que des fils de fer dans la fabrication des cordes destinées à servir de conducteur, le cuivre rouge conduisant mieux l'électricité que le fer. Ces cordes doivent avoir un centimètre carré de section métallique, et les fils de 1 millimètre à 1^{mm},5 de diamètre; elles peuvent être cordées à trois torons, comme les cordes ordinaires. Le même rapport conseille de terminer la tige des paratonnerres par une pointe de cuivre rouge plutôt que par une pointe de platine, toujours à cause de la plus grande conductibilité.

Le conducteur se rend ordinairement dans un puits, et pour mieux établir la communication avec le sol, on le termine par deux ou trois ramifications. Si l'on n'a pas de puits à proximité, on pratique dans le sol un trou de 4 à 6 mètres de profondeur, et après y avoir introduit le pied du conducteur, on achève de remplir le trou avec de la braise de boulanger, qui conduit bien.

La théorie des paratonnerres repose sur l'électrisation par influence et sur le pouvoir des pointes. Franklin, qui, aussitôt qu'il eut constaté l'identité de la foudre et de l'électricité, songea à appliquer le pouvoir des pointes aux paratonnerres, admettait que ceux-ci soutirent aux nuages orageux leur électricité; c'est le contraire qui a lieu. Lorsqu'un nuage orageux, électrisé positivement par exemple, se forme dans l'atmosphère, il agit par influence sur la terre, repousse au loin l'électricité positive et attire l'électricité négative, qui s'accumule sur les corps placés à la surface du sol, d'autant plus abondamment, que ces corps atteignent une plus grande hauteur. Les plus hauts sont alors ceux qui possèdent la plus forte tension, et qui, par conséquent, sont les plus exposés à la décharge électrique; mais si ces corps sont armés de pointes métalliques comme les tiges des paratonnerres, l'électricité négative, attirée du sol par l'influence du nuage, s'écoule dans l'atmosphère et va neutraliser l'électricité positive de la nue. Par conséquent, non-seulement un paratonnerre s'oppose à l'accumulation de l'électricité à la surface de la terre, mais encore il tend à ramener les nuées orageuses à l'état neutre, double effet qui a pour but de prévenir la chute de la foudre. Cependant le dégagement d'électricité est parfois si abondant, que le paratonnerre est insuffisant pour décharger le sol, et que la foudre éclate; mais c'est alors le paratonnerre qui reçoit la décharge, en raison de sa plus grande conductibilité, et l'édifice est préservé.

L'expérience a appris qu'une tige de paratonnerre protégée autour d'elle un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur. Par conséquent, un bâtiment de 64 mètres de longueur est préservé par 2 tiges de 8 mètres, distantes de 32 mètres.

Un paratonnerre, pour être efficace, doit satisfaire aux conditions suivantes : 1° La tige doit être assez grosse pour ne pas être fondue, si la foudre tombe dessus. 2° Elle doit se terminer en pointe pour donner plus facilement issue à l'électricité qui se dégage du sol : c'est pour satisfaire à cette condition qu'on termine ordinairement la tige par une pointe de platine ou de cuivre rouge doré, afin d'éviter l'oxydation. 3° Le conducteur ne doit présenter aucune solution de continuité depuis la tige jusqu'au sol. 4° La communication entre la tige et le sol doit être la plus intime possible. 5° Si le bâtiment qu'on arme d'un paratonnerre renferme des pièces métalliques d'une certaine étendue, comme une couverture de zinc, des gouttières de métal, des charpentes de fer, on doit les faire communiquer avec le conducteur du paratonnerre.

Si les trois dernières conditions ne sont pas remplies, on est exposé aux *décharges latérales*, c'est-à-dire que l'étincelle peut éclater entre le conducteur et l'édifice, et alors le paratonnerre ne fait qu'accroître le danger.

943. **Aurore boréale.** — On nomme *aurore boréale*, ou plutôt *aurore polaire*, un phénomène lumineux extrêmement remarquable qui apparaît fréquemment, dans l'atmosphère, aux deux pôles terrestres. Quand le phénomène se produit au pôle nord, on lui donne le nom d'*aurore boréale*; celui d'*aurore australe* lorsqu'il se manifeste au pôle sud. Il paraît résulter de nombreuses observations faites à Melbourne et dans le nord de l'Europe que les aurores boréales et les aurores australes sont simultanées.

Nous extrayons du *Traité de météorologie* de MM. Becquerel la description suivante d'une aurore boréale observée à Bossekop, en Laponie norvégienne, à 70 degrés de latitude, dans l'hiver de 1838.

« Le soir, entre 4 et 8 heures, la brume qui règne habituellement au nord de Bossekop se colore à la partie supérieure. Cette lueur devient plus régulière et forme un arc vague, d'un jaune pâle, tournant sa concavité vers la terre, et dont le sommet se trouve sensiblement dans le méridien magnétique.

« Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement les parties lumineuses de l'arc. Des rayons lumineux se forment, s'allongent et se raccourcissent lentement ou instantanément, leur éclat augmentant ou diminuant sensiblement. Les pieds de ces rayons offrent toujours la lumière la plus vive et forment un arc plus ou moins régulier. La longueur des rayons est très-variée; mais tous convergent vers un même point du ciel, indiqué par le prolongement de l'extrémité sud de l'aiguille d'inclinaison; parfois les rayons se prolongent jusqu'à leur point de concours, et figurent ainsi le fragment d'une coupole lumineuse.

« L'arc continue à monter vers le zénith, présentant, dans sa lueur, un mouvement ondulatoire. Parfois un de ses pieds, et même tous les deux, abandonnent l'horizon. Alors les plis sont plus prononcés et plus nombreux, l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne et se sépare en plusieurs parties, en formant des courbes gracieuses qui se replient sur elles-mêmes et offrent ce qu'on appelle la *couronne boréale*. L'éclat des rayons, variant subitement d'intensité, atteint celui

des étoiles de première grandeur; les rayons dardent avec rapidité, les courbes se forment et se déroulent comme les plis et replis d'un serpent (fig. 799). Puis les rayons se colorent : la base est rouge, le milieu vert; le reste conserve sa teinte jaune clair. Enfin, l'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'affaiblit peu à peu ou s'éteint subitement. »

La commission scientifique du Nord a observé, en 200 jours, 150 aurores boréales; mais il paraît qu'au pôle nord les nuits sans aurore

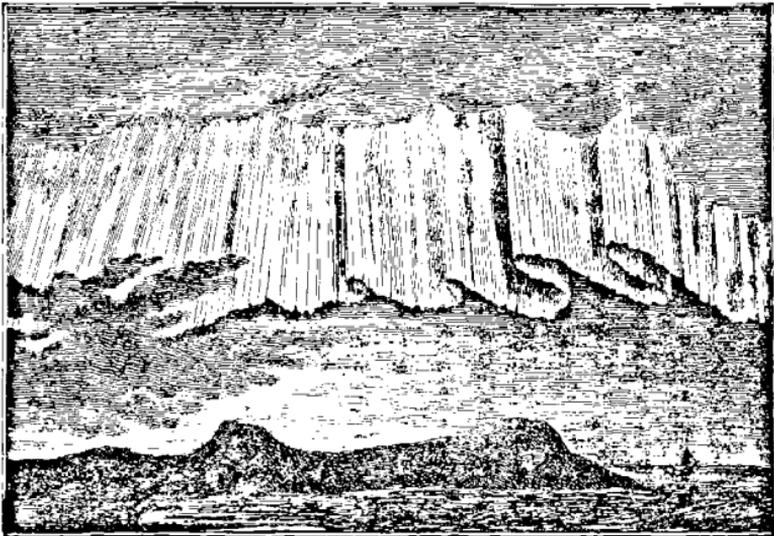


Fig. 799.

boréale sont tout à fait exceptionnelles, en sorte qu'on peut admettre qu'il y en a toutes les nuits, seulement d'une intensité très-variable. Les aurores boréales sont visibles à des distances considérables du pôle et sur une étendue immense. Quelquefois une même aurore boréale a été vue en même temps à Moscou, à Varsovie, à Rome, à Cadix.

On a fait de nombreuses hypothèses sur la cause des aurores boréales. La direction constante de leur arc par rapport au méridien magnétique, et les perturbations qu'elles exercent sur les boussoles (665), montrent qu'elles doivent être attribuées à des courants électriques qui se dégagent des pôles vers les hautes régions de l'atmosphère. Cette hypothèse est confirmée par ce fait, observé le 29 août et le 1^{er} septembre 1859, en France et dans presque toute l'Europe, que deux brillantes aurores boréales ont agi puissamment sur les fils des télégraphes électriques : les sonnettes ont été longtemps agitées, et les dépêches fréquemment interrompues par le jeu spontané et anormal des appareils.

Selon de la Rive, les aurores boréales sont dues à des décharges électriques s'opérant dans les régions polaires, entre l'électricité positive de l'atmosphère et l'électricité négative du globe terrestre, élec-

tricités séparées elles-mêmes par l'action du soleil, principalement dans les régions équatoriales.

M. Newton a observé, sur 30 aurores boréales, que leur hauteur moyenne est de 214 kilomètres.

Météores lumineux.

* 944. **Arc-en-ciel.** — L'*arc-en-ciel* est un météore lumineux qui apparaît dans les nues opposées au soleil quand elles se résolvent en pluie; il est formé de sept arcs concentriques présentant successivement les couleurs du spectre solaire. Quelquefois on n'observe qu'un seul arc-en-ciel; mais le plus souvent on en voit deux: l'un, intérieur, dont les couleurs sont plus vives; l'autre, extérieur, qui est plus pâle et dans lequel l'ordre des couleurs est renversé. Dans l'arc intérieur, c'est le rouge qui est le plus élevé; dans l'autre arc, c'est le violet. Rarement on aperçoit trois arcs-en-ciel; la théorie indique qu'il peut en exister un plus grand nombre, mais leurs couleurs sont si faibles, qu'elles échappent à la vue.

C'est la décomposition de la lumière blanche du soleil au moment où elle pénètre dans les gouttes de pluie, et sa réflexion sur leur face interne, qui produisent le phénomène de l'arc-en-ciel. Ce phénomène s'observe, en effet, dans les gouttes de rosée, dans les jets d'eau, partout, en un mot, où la lumière solaire pénètre dans les gouttes d'eau, sous un certain angle.

L'apparition de l'arc-en-ciel et son étendue dépendent de la position de l'observateur et de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon; d'où l'on doit conclure que tous les rayons réfractés par les gouttes de pluie et réfléchis sur leur concavité vers l'œil du spectateur, ne sont pas propres à produire le phénomène. Ceux qui peuvent lui donner naissance ont reçu le nom de *rayons efficaces*.

Pour se rendre compte de cette efficacité, soit une goutte d'eau dans laquelle pénètre un rayon solaire $S'a$ (fig. 800). Au point d'incidence a , une partie de la lumière se réfléchit sur la surface du liquide, l'autre y pénètre en se décomposant, et traverse le globule suivant la direction ab . Arrivée en b , une portion de la lumière émerge hors de la goutte de pluie; l'autre portion se réfléchit sur la surface concave et vient pour émerger en g ; mais en ce point la lumière est encore réfléchie partiellement, le reste émerge dans une direction gO , qui forme, avec le rayon incident $S'a$, un angle qu'on nomme *angle de déviation*. Ce sont les rayons tels que gO , sortis du côté de l'observateur, qui déterminent sur la rétine la sensation des couleurs, à la condition toutefois que la lumière soit suffisamment intense.

Or le calcul fait voir que pour une suite de rayons parallèles, qui tombent sur une même goutte, et qui ne subissent qu'une réflexion dans son intérieur, l'angle de déviation augmente successivement depuis le rayon central $S''b$, pour lequel il est nul, jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle il décroît, et que près de cette limite les rayons entrés parallèlement à eux-mêmes dans une goutte de pluie en sortent

encore parallèles entre eux. De ce parallélisme, il résulte un faisceau de lumière qui possède assez d'intensité pour impressionner la rétine; ce sont donc les rayons qui sortent parallèles entre eux qui sont efficaces.

Les couleurs qui composent la lumière blanche étant inégalement réfringibles, le maximum de l'angle de déviation n'est pas le même pour toutes. Le calcul apprend que, pour les rayons rouges, la valeur de cet angle correspondant aux rayons efficaces est de $42^{\circ} 2'$, et pour les rayons

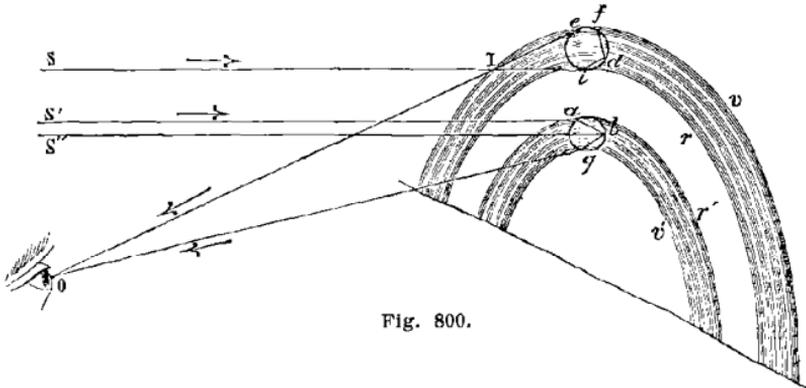


Fig. 800.

violetts de $40^{\circ} 17'$. Il suit de là que, pour toutes les gouttes placées de manière que les rayons qui vont du soleil à la goutte fassent avec ceux qui vont de la goutte à l'œil un angle de $42^{\circ} 2'$, cet organe reçoit la sensation de la couleur rouge; ce qui a évidemment lieu pour toutes les gouttes situées sur la circonférence de la base d'un cône dont le sommet coïncide avec l'œil de l'observateur, ce cône ayant son axe parallèle aux rayons solaires, et l'angle formé par deux génératrices opposées étant de $84^{\circ} 4'$. Telle est la formation de la bande rouge de l'arc. Pour la bande violette, l'angle du cône est de $80^{\circ} 34'$.

Les cônes correspondant à chaque bande ont le même axe, qu'on nomme *axe de vision*. Cette droite étant parallèle aux rayons du soleil, il s'ensuit que, lorsque cet astre est à l'horizon, l'axe de vision lui-même horizontal, et l'arc-en-ciel apparaît sous la forme d'une demi-circonférence. Si le soleil s'élève, l'axe de vision s'abaisse, et avec lui l'arc-en-ciel. Enfin, lorsque le soleil est haut de $42^{\circ} 2'$, l'arc disparaît tout à fait au-dessous de l'horizon. C'est pourquoi le phénomène de l'arc-en-ciel n'a jamais lieu que le matin et le soir.

Tout ce qui précède s'applique à l'arc intérieur. Quant à l'arc extérieur, il est formé par des rayons qui ont subi deux réflexions, comme le montre le rayon *SidfeO*. L'angle *SIO*, formé par le rayon émergent et le rayon incident, se nomme encore l'angle de déviation. Ici cet angle n'est plus susceptible d'un maximum, mais d'un minimum, qui varie pour chaque espèce de rayons, et auquel correspondent encore les rayons efficaces. On constate par le calcul que, pour les rayons violets, l'angle minimum est de $54^{\circ} 9'$, et pour les rayons rouges, seulement de $50^{\circ} 59'$; ce qui explique pourquoi l'arc rouge est ici intérieur

et l'arc violet extérieur. Comme, à chaque réflexion intérieure dans la goutte de pluie, il y a perte de lumière, l'arc-en-ciel extérieur offre toujours des teintes plus faibles que l'arc intérieur. L'arc extérieur cesse d'être visible lorsque le soleil est à plus de 54° au-dessus de l'horizon.

La lune produit quelquefois des arcs-en-ciel, comme le soleil; mais ils sont très-pâles.

* 945. **Halos, parhélies.** — Les *halos* sont des cercles irisés qui apparaissent parfois autour du soleil; comme dans l'arc-en-ciel extérieur, le rouge est au dedans et le violet en dehors. Tantôt le halo est simple, c'est-à-dire formé d'un seul cercle; tantôt il est double, c'est-à-dire formé de deux cercles, qui sont concentriques et dont les diamètres sont entre eux comme 1 est à 2. Les halos ont pour cause la décomposition de la lumière du soleil à travers de très-petites aiguilles de glace dont certains nuages très-élevés sont formés. M. Duruof a rencontré récemment un pareil nuage à la hauteur de 3500 mètres.

Les *parhélies* sont des images éclatantes du soleil qui se forment par la réflexion des rayons solaires sur la même espèce de nuages que ci-dessus.

CHAPITRE II

CLIMATOLOGIE

946. **Températures moyennes.** — On nomme *température moyenne*, ou simplement *température d'un jour*, celle qu'on obtient en faisant la somme de 24 observations thermométriques prises successivement d'heure en heure, et en la divisant par 24. L'expérience a appris qu'on obtient très-approximativement cette température en prenant la moyenne entre les températures maxima et minima du jour et de la nuit, lesquelles se déterminent à l'aide des thermomètres à maxima et à minima (291 et 292). Ceux-ci doivent être à l'abri des rayons solaires, élevés au-dessus du sol, et éloignés de tout corps qui pourrait les influencer par son rayonnement.

La température d'un mois est la moyenne de celles des trente jours, et la température de l'année est la moyenne de celles des douze mois. Enfin, la *température d'un lieu* est la moyenne de sa température annuelle pendant un grand nombre d'années. La température moyenne de Paris est de 10°7. Dans tous les cas, ces températures sont celles de l'air, et non celles du sol (451).

947. **Causes qui modifient la température de l'air.** — Les causes qui font varier la température de l'air sont principalement la latitude, l'altitude, la direction des vents et la proximité des mers.

1° *Influence de la latitude.* — L'influence de la latitude résulte du plus ou moins d'obliquité des rayons solaires; car la quantité de chaleur absorbée étant d'autant plus grande, que les rayons approchent davantage de l'incidence normale (437), il en résulte que la chaleur absorbée par le sol décroît de l'équateur vers les pôles, puisque les

rayons sont de plus en plus obliques à l'horizon. Toutefois cette perte est compensée en partie, pendant l'été, dans les zones tempérées et dans les zones glaciales, par la longueur des jours. Sous l'équateur, où la longueur des jours est constante, la température est à peu près invariable; à la latitude de Paris, et dans les contrées plus septentrionales, où les jours sont très-inégaux, la température varie beaucoup; mais, l'été, elle s'élève quelquefois presque aussi haut que sous l'équateur. Du reste, l'abaissement de la température résultant de la latitude est lent; ainsi, en France, par exemple, il faut avancer vers le nord de 185 kilomètres pour trouver un refroidissement d'un degré dans la température moyenne de l'air.

2° *Influence de l'altitude.* — L'altitude, c'est-à-dire la hauteur au-dessus du niveau des mers, imprime à la température de l'atmosphère un décroissement beaucoup plus rapide que celui qui résulte de la latitude. En effet, dans une ascension sur le mont Blanc, Saussure a observé un abaissement de température de 1 degré pour une hauteur de 144 mètres, et de Humboldt, sur le Chimborazo, a trouvé 1 degré d'abaissement pour 218 mètres. En prenant la moyenne entre ces deux nombres, on a un refroidissement de 1 degré pour une hauteur de 181 mètres, ce qui donne un décroissement de température près de mille fois plus rapide pour l'altitude que pour la latitude.

La loi de l'abaissement de la température, quand on s'élève dans l'atmosphère, n'est pas connue, par suite des nombreuses causes perturbatrices qui tendent à la modifier, lesquelles sont les vents régnants, le degré d'humidité, l'heure de la journée, etc. L'expérience apprend que la différence de température de deux lieux inégalement élevés n'est point proportionnelle à la différence de niveau; mais que, pour des hauteurs peu considérables, on peut admettre approximativement cette loi. On évalue moyennement l'abaissement de la température de l'air à 1 degré pour 187 mètres d'élévation dans la zone torride, et à 1 degré pour 150 mètres dans la zone tempérée; mais ces nombres peuvent varier beaucoup selon les circonstances locales.

Le refroidissement de l'air, à mesure qu'on s'élève dans les hautes régions de l'atmosphère, se constate dans les ascensions aérostatiques; ce qui le prouve encore, ce sont les neiges perpétuelles qui recouvrent les sommets des hautes montagnes. Dans les Alpes, la limite des neiges persistantes se trouve à la hauteur de 2710 mètres; à Quito, sous l'équateur, elle est à 4800 mètres. Les causes de la basse température qui règne dans les hautes régions de l'atmosphère sont: 1° la grande raréfaction de l'air, laquelle diminue son pouvoir absorbant; 2° l'éloignement du sol, qui ne peut échauffer l'air par son contact; 3° le grand pouvoir diathermane des gaz (442); 4° enfin la diminution de pression, par suite de laquelle l'air chaud qui s'élève du sol se dilate considérablement; or on a vu que cette dilatation est une source de froid intense (466).

3° *Influence de la direction des vents.* — Les vents participant nécessairement de la température des contrées qu'ils ont traversées, leur direction, pour un même lieu, a une grande influence sur la tempé-

rature de l'air. A Paris, le vent le plus chaud est le vent du sud; viennent ensuite les vents du sud-est, du sud-ouest, d'ouest, d'est, du nord-ouest, du nord, et enfin le vent du nord-est, qui est le plus froid. Du reste, le caractère des vents change avec les saisons: le vent d'est, par exemple, qui est froid l'hiver, est chaud l'été.

4^e *Influence de la proximité des mers.* — La proximité des mers tend à élever la température de l'air et à la rendre plus uniforme. En effet, on observe que, sous les tropiques et dans les régions polaires surtout, la température des mers est toujours plus élevée que celle de l'atmosphère. Quant à l'uniformité de température des mers, l'expérience apprend que, dans les régions tempérées, c'est-à-dire de 25 à 50 degrés de latitude, la différence de température entre le maximum et le minimum d'un jour ne dépasse pas, en mer, 2 ou 3 degrés, tandis que sur les continents cette différence peut aller jusqu'à 12 ou 15 degrés. Dans les îles, l'uniformité de température est très-sensible, même pendant les plus fortes chaleurs. En pénétrant dans les continents, les hivers, à latitude égale, deviennent plus froids, et la différence entre les températures des étés et des hivers devient plus grande.

948. *Lignes isothermes.* — Lorsqu'on joint entre eux, sur une carte, tous les points dont la température moyenne est la même, on obtient des courbes que de Humboldt a fait connaître le premier, et qu'il a désignées sous le nom de *lignes isothermes*. Si la température d'un lieu ne variait qu'avec l'obliquité des rayons solaires, c'est-à-dire qu'avec la latitude, les lignes isothermes seraient toutes des parallèles à l'équateur; mais comme cette température varie sous l'influence de plusieurs causes locales, et surtout avec la hauteur, ces lignes sont toujours plus ou moins sinueuses. Toutefois, sur les mers, elles s'éloignent peu du parallélisme. On distingue encore des *lignes isothermes* (d'égal été), et des *lignes isochimènes* (d'égal hiver). Enfin, on nomme *zone isotherme* l'espace compris entre deux lignes isothermes.

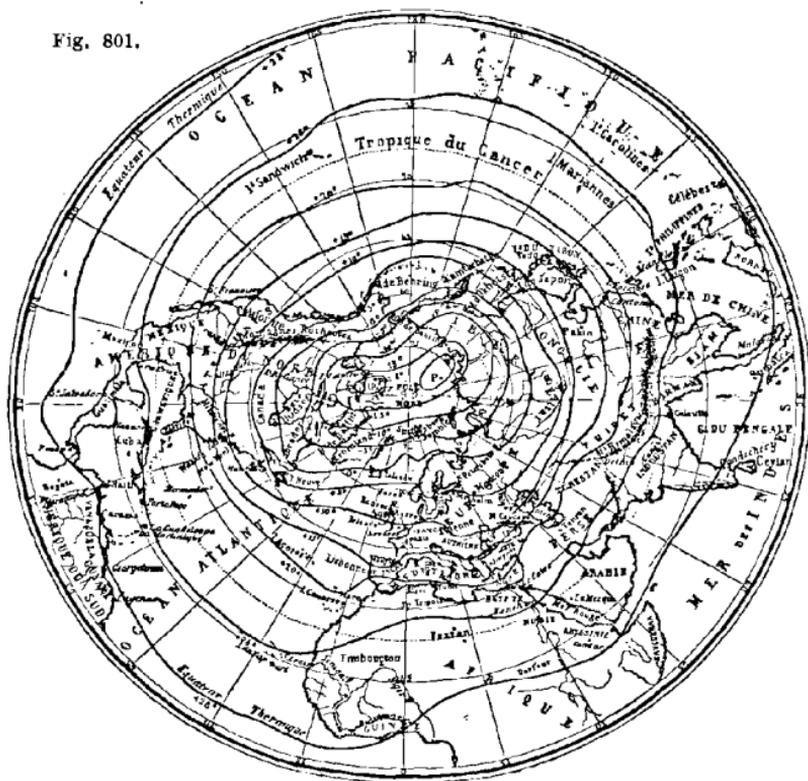
Les figures 801 et 802 représentent, d'après Humboldt, les sinuosités des lignes isothermes dans les deux hémisphères nord et sud, ceux-ci étant tracés en projection stéréographique sur le plan de l'équateur. Les lignes isothermes y correspondent aux températures moyennes de 5 en 5 degrés, depuis -15 jusqu'à $+25$ degrés. Au delà est l'*équateur thermique*, c'est-à-dire la ligne qui réunit tous les points ayant la température moyenne annuelle la plus haute. Cette ligne est marquée $+28^{\circ}$. On voit qu'elle n'est pas parallèle à l'équateur, mais s'en écarte dans le golfe d'Oman jusqu'à l'approche du parallèle de 15° ; puis passe dans l'hémisphère sud aux îles Célèbes, s'approche des îles Salomon, et revient couper l'équateur par 157° de longitude occidentale.

A l'inspection de la figure 801, on remarque qu'en se rapprochant du pôle nord, les courbes isothermes s'allongent de plus en plus de l'est à l'ouest, et qu'au delà de la ligne -15° il y a dédoublement en deux courbes distinctes autour de deux points P, P', qu'on a nommés *pôles du froid*, et dont Arago a estimé par le calcul la température moyenne à -25° . L'un de ces pôles est situé en Amérique, près des îles Parry, l'autre en Asie.

Les lignes isothermes de l'hémisphère sud sont moins bien connues que celles de l'hémisphère nord; mais la figure 802 montre qu'elles sont beaucoup plus régulières, ce qui résulte des vastes mers de l'hémisphère austral.

A l'aide des lignes isothermes, il est facile de suivre, à la surface de

Fig. 801.



la terre, les zones caractérisées par la rigueur ou la douceur de leur température moyenne. Par exemple, la zone tempérée de $+10$ à $+15$ degrés, qui, en Europe, est comprise entre les latitudes de 50 à 42 degrés, est située, dans l'Amérique du Nord, entre les latitudes beaucoup plus méridionales de 40 à 36 degrés.

949. **Climats.** — On comprend sous le nom général de *climat* l'ensemble des conditions atmosphériques qui caractérisent une contrée : la température moyenne annuelle, les températures estivale et hivernale, l'humidité de l'air et du sol, les vents, la pression barométrique, la sérénité du ciel. Classés d'après leur température annuelle moyenne, les climats se divisent en sept principaux : 1^o *climat brûlant*, de $27^{\circ},5$ à 25 degrés; — 2^o *climat chaud*, de 25 à 20 degrés; — 3^o *climat doux*, de 20 à 15 degrés; — 4^o *climat tempéré*, de 15 à 10 degrés; — 5^o *climat*

sol. Ces causes réunies font que l'étude des climats, ou *climatologie*, est encore une science fort peu connue.

950. **Distribution de la température à la surface du globe.** — La température de l'air, à la surface du globe, va en décroissant de l'équateur aux pôles; mais elle est soumise à des causes perturbatrices si nombreuses et tellement locales, que son décroissement ne paraît soumis à aucune loi générale. On ne peut jusqu'ici que constater, par des observations nombreuses, la température moyenne de chaque lieu, ou les températures maxima et minima. Le tableau suivant présente un résumé de la distribution de la chaleur dans l'hémisphère septentrional.

Températures moyennes à diverses latitudes.

Abyssinie	31°0	Paris	10°8
Calcutta	28°5	Londres	10°4
Jamaïque	26°1	Bruxelles	10°2
Sénégal (Saint-Louis)	24°6	Strasbourg	9°8
Rio-Janeiro	23°1	Genève	9°7
Le Caire	22°4	Boston	9°3
Constantine	17°2	Stockholm	5°6
Naples	16°7	Moscou	3°6
Mexico	16°6	Saint-Petersbourg	8°5
Marseille	14°1	Mont Saint-Gothard	— 1°0
Constantinople	13°7	Mer du Groënland	— 7°7
Pékin	12°7	Ile Melvil	— 18°7

Ces températures sont des moyennes; la plus haute température observée à la surface du globe a été de 47°4, à Esné, en Égypte, et la plus basse, de — 56°7, à Fort-Reliance, au nord de l'Amérique; ce qui donne une différence de 104°4 entre les températures observées sur différents points du globe.

La plus haute température observée à Paris a été de 40°, le 26 août 1765, et la plus basse de — 23°5, le 25 janvier 1795.

951. **Température des mers, courants marins.** — La température de la mer, entre les tropiques, est généralement à peu près la même que celle de l'air; dans les régions polaires, la mer est toujours plus chaude que l'atmosphère.

La température de la mer, sous la zone torride, est constamment de 26 à 27 degrés à la surface; elle diminue quand la profondeur augmente, et, dans les régions tropicales comme dans les régions tempérées, la température de la mer, à de grandes profondeurs, se maintient entre 1°7 et 3°5. On explique la basse température des couches inférieures par l'effet de courants sous-marins qui portent vers l'équateur l'eau froide des mers polaires, tandis que des courants chauds, se dirigeant de l'équateur vers les pôles, atténuent l'intensité du froid dans ces latitudes élevées.

Le plus important des courants marins est le *Gulf-Stream* (courant du golfe), découvert par Maury. Le parcours total de ce courant, aller et retour, est d'environ 28 000 kilomètres, et sa largeur atteint en certaines parties jusqu'à plusieurs centaines de lieues. Les navi-

gateurs le reconnaissent facilement à sa température, qui s'élève jusqu'à 22° et 27°. Traversant l'Atlantique de l'est à l'ouest, il atteint le cap Saint-Roch au nord du Brésil, suit les côtes de l'Amérique du Sud jusqu'au golfe du Mexique, dont il sort pour se diriger vers le nord. Arrivé au banc de Terre-Neuve, il se bifurque en deux courants secondaires, dont l'un gagne l'Islande et la Norvège pour aller se perdre dans la mer Glaciale; tandis que l'autre, revenant vers le sud, gagne le golfe de Gascogne, et retourne vers le tropique en longeant les côtes occidentales de l'Afrique.

Il existe aussi dans le Grand Océan Pacifique un grand courant marin se dirigeant du golfe du Bengale vers le détroit de Behring. Tous ces courants ont pour cause la différence de température et, par suite, de densité des eaux chaudes de la mer sous les tropiques et des eaux froides des mers glaciales, et aussi la direction des vents et la configuration des côtes et des bas-fonds.

On a longtemps admis qu'il existait au fond des mers une couche invariable à 4 degrés; mais les nombreux sondages opérés depuis quelques années par les marines française et anglaise ont fait voir que, dans les régions tempérées et dans les régions tropicales, la température moyenne des deux océans, à de grandes profondeurs, est de 2°,6. On a vu ci-dessus que cette basse température est due à des courants de fond, des pôles vers l'équateur; tandis que des courants de surface, plus chauds et moins denses, vont de l'équateur vers les pôles.

Vu les énormes pressions qui s'exercent dans les mers profondes, on croyait que la vie animale cessait de s'y maintenir; mais la sonde en ramène abondamment des animaux d'ordre inférieur, remarquables par leurs formes et leurs couleurs, et doués presque tous d'une phosphorescence éclatante, comme pour suppléer à la lumière du jour.

352. Température des lacs et des sources. — La température des lacs présente des variations beaucoup plus grandes que celle des mers; leur surface, qui peut se congeler pendant l'hiver, s'échauffe l'été jusqu'à 20 ou 25 degrés. Le fond, au contraire, conserve sensiblement une température de 4 degrés, qui est celle du maximum de densité de l'eau (318).

Les sources, provenant des eaux pluviales qui se sont infiltrées dans l'écorce du globe à des profondeurs plus ou moins considérables, tendent nécessairement à se mettre en équilibre de température avec les couches terrestres qu'elles traversent (451). Par conséquent, lorsqu'elles arrivent à la surface du sol, leur température dépend de la profondeur qu'elles ont atteinte; si cette profondeur est celle de la couche invariable, la température des sources est de 11 à 12 degrés dans nos contrées, où telle est la température de cette couche, et à peu près aussi la température moyenne annuelle. Toutefois, si la source est peu abondante, sa température est élevée en été et refroidie en hiver par celle des couches qu'elle traverse pour arriver de la couche invariable jusqu'à la surface du sol. Mais si les sources arrivent d'une profondeur plus grande que celle à laquelle est située la couche invariable, leur température peut dépasser de beaucoup la température moyenne du

lieu, et elles prennent alors le nom d'*eaux thermales*. Voici la température de quelques eaux thermales :

En France.	Vichy	40°
—	Mont-Dore	44°
—	Bourbonne	50°
—	Dax (Landes)	60°
—	Chaudes-Aigues	88°
En Amérique.	Trincheras, près de Puerto-Cabello	97°
En Islande.	Le Grand-Geysir, à 20 mètres de profondeur	124°

Par leur haute température, les eaux thermales acquièrent la propriété de dissoudre plusieurs des substances minérales qu'elles rencontrent dans leur trajet, et elles se désignent alors sous le nom d'*eaux minérales*. Les substances qu'elles tiennent en dissolution sont, le plus souvent, les acides sulfureux, sulfhydrique, chlorhydrique, sulfurique, et des sulfures, des hyposulfites, des sulfates, des carbonates, des chlorures, des iodures.

La température des eaux thermales n'est point modifiée, en général, par l'abondance des pluies ou par la sécheresse; mais elle l'est par les tremblements de terre, après lesquels on l'a vue quelquefois s'abaisser, d'autres fois s'élever.

933. **Distribution des eaux à la surface du globe.** — La distribution des eaux à la surface du globe exerce une grande influence sur les climats. Les eaux présentent une superficie beaucoup plus grande que celle des continents, et leur distribution est très-inégale dans les deux hémisphères. La surface du globe, en myriamètres carrés, étant de 5 100 000, on trouve que celle des mers et des lacs est de 3 700 000 myriamètres carrés, et celle des continents et des îles de 1 400 000, c'est-à-dire que la surface des eaux est à peu près trois fois plus grande que la surface des terres. Dans l'hémisphère austral, la surface des mers est plus grande que dans l'hémisphère boréal dans le rapport de 13 à 9.

La profondeur des mers est très-variable. La sonde rencontre le fond, en général, à 300 ou 400 mètres; mais, en pleine mer, elle descend jusqu'à 9 000 mètres, qui est la plus grande profondeur observée. D'après ces nombres, la masse totale des eaux, à la surface du globe, ne dépasse pas une couche liquide qui aurait 1 000 mètres de hauteur et envelopperait toute la terre.

* CHAPITRE III

PRÉVISION DU TEMPS

934. **Observatoires météorologiques.** — Dès la fin du siècle dernier, Borda, Lavoisier, Laplace, entrevirent la possibilité de la prévision du temps à courte échéance par l'observation des phénomènes météorologiques. Des études dans ce but furent faites plus tard par Hum-

bold et autres physiciens; mais c'est surtout depuis une trentaine d'années que le lieutenant Maury, de la marine américaine, et le contre-amiral Fitz-Roy, de la marine anglaise, ont fait voir l'importance d'observations météorologiques, continues et combinées, sur tous les points du globe; et c'est à l'instigation de Maury que les principaux États d'Europe et d'Amérique tinrent à Bruxelles, en 1853, un congrès international pour s'entendre sur l'adoption d'un plan uniforme d'observations sur la direction des vents et sur celle des courants marins. Depuis, on a successivement établi un vaste réseau d'observatoires météorologiques reliés entre eux par des fils télégraphiques; en sorte qu'aujourd'hui, un même observatoire peut suivre simultanément, sur une immense partie du globe, les grands courants de l'atmosphère, et prévoir, plusieurs jours à l'avance, les contrées vers lesquelles ils se dirigent.

955. **Signes du temps.** — Les *signes* ou *pronostics du temps* sont : la direction et la force du vent à différentes altitudes, la hauteur du mercure dans le baromètre, la température de l'air, son état hygrométrique, l'état du ciel, et enfin les mouvements de l'aiguille aimantée.

Observés isolément et dans une seule localité, ces signes seraient incertains; ce n'est que par des observations simultanées, sur une grande étendue de pays, qu'on peut arriver à des résultats qui méritent confiance. Les signes qu'on doit surtout consulter sont la direction du vent et la hauteur du baromètre.

956. **Pronostics tirés des vents et des tourbillons.** — L'étude de la force et de la direction des vents est une des plus importantes pour les pronostics du temps; c'est elle qui est la base des prévisions fournies par les observatoires.

On sait que la direction des vents se détermine par les girouettes (918); mais celles-ci ne donnent la direction des vents qu'à la surface du sol. Les nuages seuls et les ballons marquent la direction dans les hautes régions, et en même temps la vitesse. Il est à observer toutefois que la vitesse apparente des nuages est d'autant plus faible, qu'ils sont plus élevés, et que leur direction précède souvent celle donnée par les girouettes.

Limitant ici à l'Europe et surtout à la France l'étude de l'influence des vents, remarquons qu'outre les grands courants équatoriaux et polaires, étudiés précédemment (919), il existe dans l'Atlantique nord un vaste courant aérien, qui souffle de l'Amérique du Nord vers l'Europe. Il atteint celle-ci au nord des îles Britanniques, où il se transforme en vent du nord-ouest et en vent du nord, à mesure qu'il s'étend sur le continent. Sa vitesse moyenne est de 36 kilomètres à l'heure, mais elle varie avec les saisons.

Par suite de la rencontre des courants équatoriaux avec le courant atlantique nord, il se produit presque constamment, dans la masse de ce dernier, des mouvements tournants qu'on désigne sous le nom de *tourbillons*, et qui, déviant vers le sud avec le courant atlantique, se font sentir depuis le nord de la Norwège jusque sur les côtes de Portugal.

Par l'effet de leur mouvement tournant, les tourbillons aspirent l'air froid des hautes régions de l'atmosphère, et cet air froid condensant les vapeurs contenues dans le courant équatorial, il en résulte que les tourbillons sont toujours accompagnés de pluie. Un tourbillon isolé étant de courte durée, il en est de même de la pluie qui l'accompagne; mais si plusieurs tourbillons se succèdent sans interruption, ce qui est fréquent, on a des pluies prolongées.

Dans l'Europe occidentale, ce sont principalement le courant de l'Atlantique et les tourbillons qui s'y forment qui occasionnent les changements dans l'atmosphère, et ce sont eux qui donnent naissance aux bourrasques et aux tempêtes si fréquentes, en hiver, sur nos côtes nord-ouest. C'est pourquoi l'art de la prévision du temps, surtout pour le nord et l'ouest de la France, consiste à suivre d'une manière continue la marche de ces grandes perturbations atmosphériques sur la mer du Nord et sur la Baltique.

957. **Pronostics tirés de la hauteur du baromètre.** — On a déjà vu la relation qui existe entre la hauteur du mercure dans le baromètre et le beau ou le mauvais temps (153), relation qui fait du baromètre l'instrument le plus précieux pour les pronostics du temps; car la hausse ou la baisse n'a pas lieu au moment des changements de temps, mais les précède de 48 heures et plus.

Toutefois, pour tirer du baromètre tout le parti qu'il peut rendre, on doit tenir compte de l'altitude du lieu où l'on observe, puisqu'on sait que sa hauteur moyenne, qui est de 761 millimètres au niveau de l'Océan, diminue à mesure qu'on s'élève. En outre, il faut tenir compte du mouvement ascendant ou descendant du mercure. En effet, si on lit, par exemple, la hauteur 750 millimètres, elle n'a pas la même signification suivant qu'elle succède à 745 ou à 755; dans le premier cas, le baromètre marche vers le beau temps, dans le second vers le mauvais.

La vitesse et la direction du vent ont aussi une grande influence sur la hauteur du baromètre. Sous l'équateur, où l'air est animé d'un mouvement ascendant (919), la pression est faible; sous les tropiques, où le courant d'air est descendant, sa vitesse acquise refoulant le mercure, le fait monter. Enfin, les mouvements tournants étudiés ci-dessus sous le nom de tourbillons (936) sont toujours précédés et suivis d'une forte hausse, tandis qu'en leur partie centrale on observe une baisse d'autant plus prononcée, que le mouvement tournant est plus rapide et embrasse une plus grande étendue de pays.

Outre les variations de pression atmosphérique qui résultent des variations de température (152), la hauteur du baromètre est donc soumise à de nombreuses causes accidentelles. Quoi qu'il en soit, *une forte baisse est toujours le pronostic d'une grave perturbation dans l'atmosphère.* Cependant le beau temps et le calme s'observent encore quand le baromètre est bas, mais alors ils sont de courte durée.

Le baromètre peut être haut par tous les vents; mais c'est par le vent du nord qu'on observe les plus grandes hauteurs moyennes, et par le vent du sud les plus faibles. Enfin, toutes les variations brusques

du baromètre, dans un sens ou dans l'autre, sont de courte durée, et annoncent, en général, le mauvais temps.

L'observation du baromètre n'est pas utile seulement aux marins, elle l'est aussi aux cultivateurs. Pour les premiers, ce qu'il importe de prévoir, c'est la direction et la force du vent, pour les seconds c'est l'état du ciel, c'est-à-dire la probabilité de pluie ou de sécheresse. Il est donc à désirer que l'usage du baromètre pénètre dans nos campagnes. « Un jour viendra, dit M. Marié Davy, où chaque village aura son baromètre communal comme il a son horloge, et où le cultivateur le consultera chaque jour à la rentrée des champs, ou avant d'entreprendre son travail. »

958. **Pronostics tirés du thermomètre et de l'hygromètre.** — Les pronostics tirés de ces instruments sont loin de valoir ceux qu'on tire du baromètre et des girouettes. Cependant leurs indications ne sont pas à négliger. Par exemple, l'hiver, le vent soufflant entre le nord et l'est, si le thermomètre est peu au-dessous de zéro, et si l'hygromètre marque l'humidité, il y a grande probabilité de neige. En été, lorsqu'à la baisse du baromètre se joint une chaleur accablante, qu'en même temps l'hygromètre est à l'humidité et que des cumulus se montrent à l'horizon, on est menacé d'un orage.

959. **Pronostics tirés des mouvements de l'aiguille aimantée.** — D'après les observations de M. Marié Davy, la boussole doit être rangée parmi les instruments propres à donner des indications utiles sur les probabilités des changements de temps. Voici, en effet, comment s'exprime ce savant dans l'*Annuaire météorologique de 1876*, page 179: « De l'étude que nous en avons commencée avec M. Descroix, il résulte déjà que les perturbations, ou de moindres anomalies, constatées dans la déclinaison, accusent presque toujours, et plusieurs jours à l'avance, le passage d'une bourrasque un peu forte dans le nord-ouest de l'Atlantique, ou l'arrivée des vents pluvieux. On peut donc ainsi être mis sur ses gardes, sauf à demander à d'autres signes l'indication, soit de la marche que suivra la tempête, soit de la région d'Europe sur laquelle s'étendront les pluies. »

960. **Service des ports.** — Ce service consiste en sémaphores électriques établis dans tous les ports et reliés par des fils télégraphiques à l'Observatoire de Paris, tandis que celui-ci est en communication de la même manière avec les stations météorologiques de toute l'Europe, d'une partie de l'Asie et de l'Amérique du Nord. Assistant ainsi de loin à la formation des bourrasques et des tempêtes, et en suivant la marche, l'Observatoire prévoit un jour ou deux d'avance quels sont les ports menacés, et un avis de perturbation ou de tempête leur est télégraphié. Ces avertissements sont aussitôt affichés dans les ports, d'où ils sont transmis aux navires au large à l'aide des signaux suivants, qui sont hissés au haut d'un mât consacré à cet usage et établi dans un lieu en vue de la rade.

961. **Signaux des perturbations et des tempêtes.** — Ces signaux, qui sont au nombre de quatre, ont les significations suivantes: 1° PAVILLON JAUNE : *Temps douteux, le baromètre tend à baisser* (fig. 803).

2° GUIDON ROUGE : *Mauvaise apparence, mer grosse, le baromètre baisse* (fig. 804).



Fig. 803.

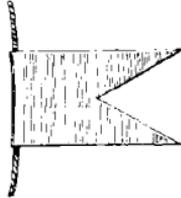


Fig. 804.

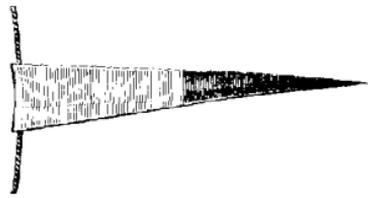


Fig. 805.

3° FLAMME JAUNE ET BLEUE : *Apparence de meilleur temps, le baromètre monte* (fig. 805).

4° CYLINDRE NOIR : *Veillez, le mauvais temps peut atteindre le lieu où vous êtes* (fig. 806). Ce cylindre est de toile goudronnée et a 1 mètre de haut sur 0^m,80 de diamètre.



Fig. 806.

Enfin, dans une cabane voisine du mât est un baromètre de Fortin, et au pied du mât deux échelles barométriques, amplifiées dans le rapport de 50 à 1, et tracées en noir sur fond blanc, l'une à côté de l'autre, de 720 à 780.

Le baromètre étant observé deux fois par jour, à 8 heures du matin et à 4 heures du soir, le maître de port, à l'aide de deux curseurs noirs, marque, sur l'échelle à droite, la hauteur qu'il vient d'observer, et, sur celle à gauche, la hauteur observée le matin ou la veille; en sorte qu'on lit en même temps la hauteur du baromètre et s'il est en hausse ou en baisse. Malheureusement les matelots, pour qui ces signaux sont encore nouveaux, n'en sentent pas toute l'utilité.

* CHAPITRE IV

INSTRUMENTS DE MÉTÉOROLOGIE

962. **Appareils enregistreurs.** — Les phénomènes météorologiques exigeant une observation pour ainsi dire continue, de nuit comme de jour, les météorologistes ont cherché de bonne heure à construire des appareils *enregistreurs* propres à inscrire d'une manière continue, ou à des intervalles donnés, les uns la direction et la vitesse du vent, les autres les hauteurs du thermomètre ou du baromètre, d'autres enfin les quantités de pluies tombées à différentes heures. Mais c'est surtout depuis que les électro-aimants et la photographie sont connus, qu'on a

pu construire des appareils possédant assez de précision pour ce genre d'observation.

En Angleterre, Wheatstone, le premier, a construit un barométrographe et un psychrographe dans lesquels les hauteurs du mercure sont imprimées, sur un cylindre tournant, au moyen d'un électro-aimant. En France, on doit à M. du Moncel un anémographe qui, à l'aide d'une girouette, d'un moulinet de Robinson et de neuf électro-aimants, fait tracer à des crayons, sur un cylindre de papier, la direction et la vitesse du vent. M. Salleron a modifié l'anémographe de M. du Moncel, en en supprimant les neuf électro-aimants et les remplaçant par neuf contacts d'acier qui frottent sur un papier électro-chimique. Lorsqu'un courant passe dans un de ces contacts, il trace un trait bleu sur le papier d'un cylindre tournant (874). Huit contacts marquent les directions, le neuvième les vitesses.

963. **Météorographe du P. Secchi.** — Le P. Secchi, directeur de l'Observatoire du Collège Romain, a construit une machine enregistrant à la fois tous les phénomènes météorologiques, sauf les phénomènes électriques, en regard les uns des autres sur un même tableau, de manière à mettre en évidence leurs relations réciproques.

Le météorographe se compose d'un soubassement de 0^m,60 de hauteur, sur lequel s'élèvent quatre montants de 2^m,30 de haut. Ceux-ci portent un entablement sur lequel est placée une horloge qui règle tous les mouvements de la machine. Sur deux faces opposées, les phénomènes sont enregistrés sur deux tableaux qui descendent d'un mouvement lent, réglé par l'horloge. L'un fait sa course en dix jours, l'autre en deux. Sur le premier s'inscrivent la direction et la vitesse du vent, la température de l'air, la hauteur du baromètre et l'heure de la pluie; sur le deuxième sont répétées, mais sur une plus grande échelle, la hauteur barométrique et l'heure de la pluie; il donne, en outre, le degré d'humidité de l'air. Quant à la hauteur d'eau tombée, elle est enregistrée à part, sur le côté de la machine.

Premier tableau.

Direction du vent. — Les quatre rumb principaux sont inscrits par quatre crayons fixés à l'extrémité supérieure de tiges de laiton mince *a, b, c, d*, auxquelles correspondent respectivement les directions ouest, sud, est et nord (fig. 807). Ces tiges, qui, sur leur extrémité inférieure, peuvent recevoir un léger déplacement latéral, sont munies d'armatures de fer doux, attirées par deux électro-aimants *E, E'*, pour les directions ouest et nord, et par deux électro-aimants placés plus bas pour les directions sud et est. Ces quatre électro-aimants, ainsi que tous ceux de la machine, fonctionnent par un courant unique, fourni par 24 couples à sable (771) modifiés par le P. Secchi. Quant au passage alternatif du courant dans l'un ou l'autre des quatre électro-aimants, il est réglé par une girouette qui, au lieu de consister en une plaque unique, comme les girouettes ordinaires, est formée de deux plaques faisant entre elles un angle de 30 degrés (fig. 808). Par cette disposition, elle présente plus de fixité dans sa direction. Sa tige repose au centre de quatre secteurs

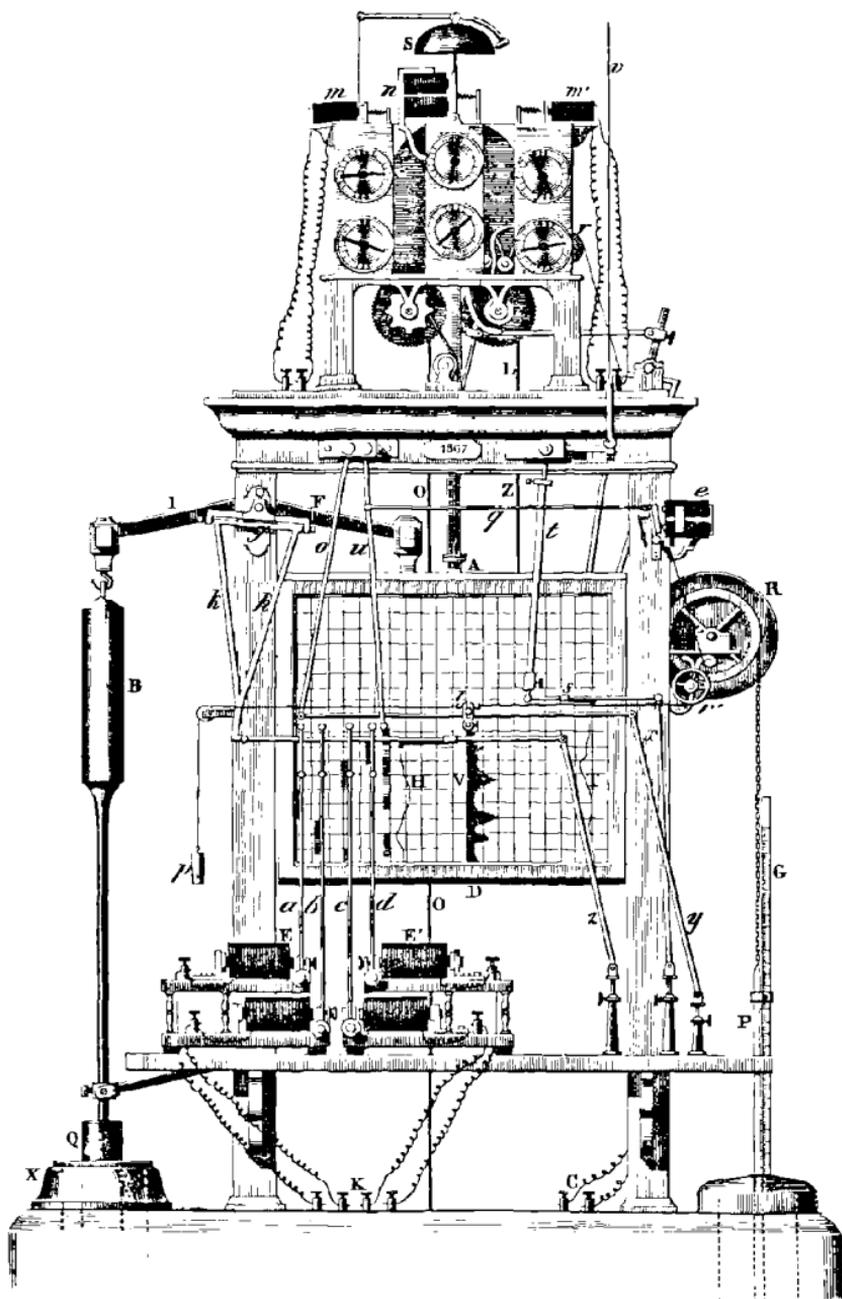


Fig. 807.

métalliques isolés les uns des autres. Sur chacun d'eux est une borne d'où part un fil de cuivre qui se rend à l'une des bornes K, sur le météorographe, et de là aux électro-aimants E, E'. Enfin, à la tige de la girouette est fixée une pièce de cuivre *o*, tournant avec elle, et en contact successivement avec chacun des secteurs. Or le courant de l'appareil, arrivant par un fil *a* à la tige de la girouette, gagne le curseur *o*, puis l'un des secteurs, qui le mène, par exemple, à l'électro-aimant du nord.

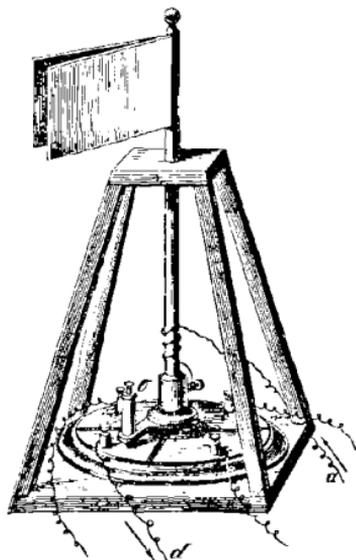


Fig. 808.

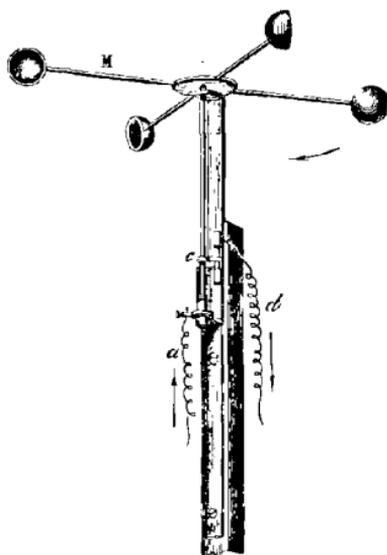


Fig. 809.

Si le courant continuait alors à passer sans interruption dans cet électro-aimant, le crayon porté par la tige *d* resterait immobile; mais de l'électro-aimant E' le courant va passer dans un second électro-aimant *n* placé au-dessus de l'horloge, et là, comme on va le voir ci-après en parlant de la vitesse du vent, le courant est alternativement ouvert et fermé. Par suite, l'armature de la tige *d*, successivement libre et attirée, oscille, et son crayon, qui est toujours pressé contre le tableau AD par l'élasticité même de la tige, trace, à mesure que le tableau descend et tant que le vent est nord, une série de traits parallèles. Si le vent devient ouest, par exemple, c'est aussitôt la tige *a* qui oscille, et c'est son crayon qui trace une nouvelle série de traits. La vitesse de déplacement du tableau étant connue, on a l'indication du vent régnant à un instant quelconque.

Ce mécanisme ne donne pas seulement les quatre vents principaux, mais les quatre intermédiaires. En effet, le vent est-il sud-ouest, les deux tiges *a* et *b* enregistrent alternativement les vents ouest et sud; ce qui est l'indice du vent du sud-ouest.

Vitesse du vent. — La vitesse du vent, donnée par le moulinet à coupes

hémisphériques du Dr Robinson, est enregistrée de deux manières : 1^o par deux compteurs qui marquent, en décimètres et en kilomètres, le chemin parcouru par le vent; 2^o par un crayon qui trace sur le tableau une courbe dont les ordonnées sont proportionnelles à la vitesse.

Le Dr Robinson a démontré que la vitesse du moulinet M (fig. 809) est proportionnelle à celle du vent; dans le météorographe, la longueur des bras du moulinet est calculée de manière qu'à chaque révolution corresponde une vitesse du vent de 10 mètres. Le moulinet, placé à une plus ou moins grande distance du météorographe, est relié avec lui par un fil de cuivre d qui se rend à l'électro-aimant n du compteur. De plus, sa tige porte en c un excentrique qui, à chaque tour, touche un contact métallique en communication avec le fil d . Le courant de la pile arrivant au moulinet par un fil a , à chaque tour, ce courant se ferme une fois, va à l'électro-aimant n , et fait avancer d'une division l'aiguille du cadran placé au-dessous; d'où les divisions de celui-ci, qui sont au nombre de 50, marquent les nombres de tours et par conséquent les décimètres. Le cadran inférieur marque les kilomètres.

Quant à la courbe des vitesses, elle est tracée sur le tableau par un crayon i fixé à une tige horizontale. Celle-ci est reliée à ses deux bouts à deux bras de rappel o et y qui la maintiennent parallèle à elle-même. Le crayon et la tige reçoivent un mouvement latéral d'une chaîne qui passe sur deux poulies r' et r , et va s'enrouler sur une poulie placée sur l'arbre du compteur, mais liée avec lui seulement par une roue à rochet et un encliquetage. Entraîné par le compteur et par la chaîne, le crayon trace sur le tableau, pendant une heure, un trait d'une longueur proportionnelle à la vitesse du vent. D'heure en heure, un excentrique mû par l'horloge détache de l'arbre du compteur la poulie sur laquelle s'enroule la chaîne, et cette poulie devenant folle, un poids p , lié au crayon i , ramène celui-ci à son point de départ. Toutes les lignes V, tracées successivement par le crayon, partent d'une même droite comme ordonnées, et leurs extrémités donnent la courbe des vitesses.

Le compteur central, qui enregistre la somme totale des kilomètres parcourus par les différents vents en 24 heures, devant remonter le poids p , est lui-même animé par un poids plus considérable. Quant aux compteurs placés à droite et à gauche, ils sont mus par des électro-aimants m , m' , et sont destinés à marquer la vitesse de vents spéciaux, par exemple des vents du nord et du sud, lorsqu'on fait communiquer leurs électro-aimants avec les secteurs nord et sud de la girouette (fig. 808).

Température de l'air. — Elle est donnée par les dilatations et contractions d'un fil de cuivre de 16 mètres de longueur, tendu, en se repliant sur lui-même, le long d'une poutre de sapin de 8 mètres, dont la dilatation est négligeable. Le tout étant placé à l'extérieur, sur les combles, par exemple, les dilatations et les contractions du cuivre se transmettent par un système de leviers à un fil v qui descend au météorographe, où il est lié à un levier coudé t . Celui-ci est articulé à une tige horizontale s qui porte un crayon et qui, à son autre extrémité, s'articule à un bras de rappel x . Le crayon, participant aux oscillations de tout le système, trace la courbe T des températures.

En outre, ce mécanisme donne indirectement l'état du ciel. En effet, si le temps est couvert, les inflexions de la courbe sont peu sensibles; si le soleil apparaît, il y a une inflexion considérable, et le passage d'un nuage suffit pour produire une inflexion brusque en sens contraire.

Pression atmosphérique. — La pression atmosphérique est enregistrée par les oscillations d'un baromètre suspendu à un balancier IF' à bras égaux, oscillant en son milieu sur un couteau. Le bras F' supporte un contre-poids; au bras I est suspendu le baromètre B, qui est de fer et à double section. Un cylindre de fer, ou flotteur Q, fixé à la partie inférieure du tube, plonge dans une cuvette X pleine de mercure, en sorte que la poussée du liquide fait équilibre à une partie du poids du baromètre. Par l'effet du grand diamètre de la chambre barométrique, une très-faible variation de niveau dans cette chambre fait osciller le tube barométrique et avec lui le balancier IF'. Or à l'axe de celui-ci est fixé un triangle *ghk* articulé à sa partie inférieure à une tringle horizontale, liée elle-même, à son autre extrémité, à un bras de rappel *z*. Cette tringle porte en son milieu un crayon qui, participant avec elle aux oscillations du triangle *ghk*, trace la courbe H des pressions. Les ordonnées de cette courbe varient de 3 millimètres pour une variation de 1 millimètre de la colonne de mercure. Un levier articulé, placé à la partie inférieure du tube barométrique et faisant parallélogramme avec le bras I du balancier, maintient le tube dans la position verticale.

Heure de la pluie. — L'heure de la pluie est enregistrée entre la direction des vents et la courbe H, par un crayon fixé à l'extrémité d'une tige *u* que fait marcher un électro-aimant *e*. Sur les combles est un entonnoir qui reçoit la pluie, et un long tube conduit l'eau à un petit balancier hydraulique à deux godets, placé près du météorographe (fig. 810). A l'axe du balancier arrive le courant de la pile; le godet de gauche, étant plein, bascule, et un contact *a* ferme le courant, qui se rend alors à une des bornes C et de là à l'électro-aimant *e*. Puis le godet de droite, se remplissant à son tour, bascule dans le sens opposé, et c'est le contact *b* qui conduit maintenant le courant à l'électro-aimant. En sorte qu'à chaque oscillation ce dernier attire son armature et, avec elle, la tringle *u*, qui fait marquer un trait à un crayon fixé à son extrémité. Si la pluie est abondante, les oscillations du balancier sont rapides, et les traits, très-rapprochés, donnent une teinte foncée; mais par une petite pluie les oscillations sont lentes, et les traits, plus espacés, donnent une teinte claire. Lorsque la pluie cesse, les oscillations s'arrêtent et le crayon ne marque plus aucun trait.

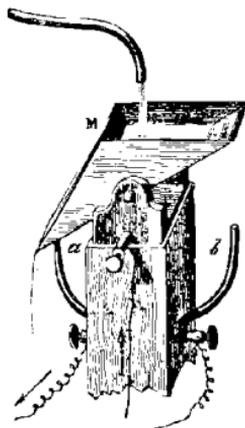


Fig. 810.

Pour compléter la description de la première face du météorographe, ajoutons que S est le timbre de la sonnerie de l'horloge: OO une corde

à laquelle est suspendu le poids qui fait marcher le mouvement des heures; LZ une seconde corde qui porte le poids qui fait marcher la sonnerie; enfin, la roue U, à 8 crans, placée au-dessous du mouvement d'horlogerie, sert à remonter le tableau AD quand il est arrivé au bas de sa course.

Deuxième tableau.

Le second tableau répète les hauteurs du baromètre et les heures de la pluie identiquement de la même manière que le premier, mais sur une plus grande échelle, puisqu'il descend cinq fois plus vite. Sa fonction principale est d'enregistrer l'humidité de l'air.

Psychromètre. — L'humidité de l'air s'inscrit au moyen du psychromètre (394). T et T' sont les thermomètres fixés sur deux planchettes (fig. 811). La mousseline qui recouvre le second est constamment humectée par de l'eau qui tombe goutte à goutte. A la partie inférieure des thermomètres sont soudés, dans le verre, deux fils de platine en contact avec le mercure. A leurs extrémités supérieures, les tiges thermométriques sont ouvertes, et dans ces tiges plongent deux fils de platine *m* et *n* suspendus à un châssis métallique A, mobile sur quatre galets supportés par une pièce fixe B. Le châssis A, en communication avec le courant de la pile, est suspendu à un fil d'acier L qui passe sur une poulie et se rend au météorographe (fig. 812). Là est un long levier triangulaire W qui porte une petite roue sur laquelle vient se fixer le fil L. Le levier W, qui tourne autour d'un axe *f*, est mis en mouvement par une tringle *a* au moyen d'un excentrique que fait marcher l'horloge tous les quarts d'heure. A chaque oscillation, le levier W transmet son mouvement à un chariot qui porte un électro-aimant α , et, en même temps, au fil d'acier L qui porte le châssis A (fig. 811). Le chariot, entraîné vers la gauche par la rotation de l'excentrique, laisse donc des-

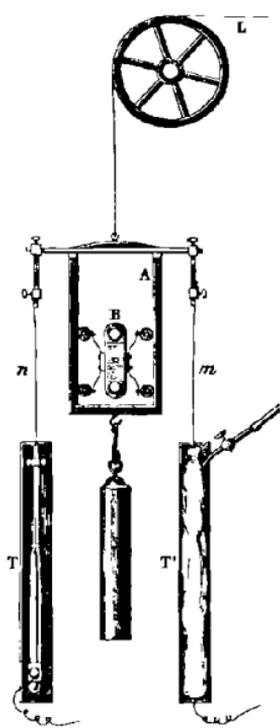


Fig. 811.

endre le châssis. Au moment où le premier fil de platine atteint la colonne de mercure du thermomètre sec, qui est la plus haute, le courant est fermé et va passer dans l'électro-aimant du chariot. Une armature aussitôt attirée fait marquer à un crayon, sur le tableau, un point qui est le commencement d'une ligne représentant la marche du thermomètre sec. Or, le châssis continuant à descendre, le second fil de platine vient toucher le mercure du thermomètre mouillé; à ce mo-

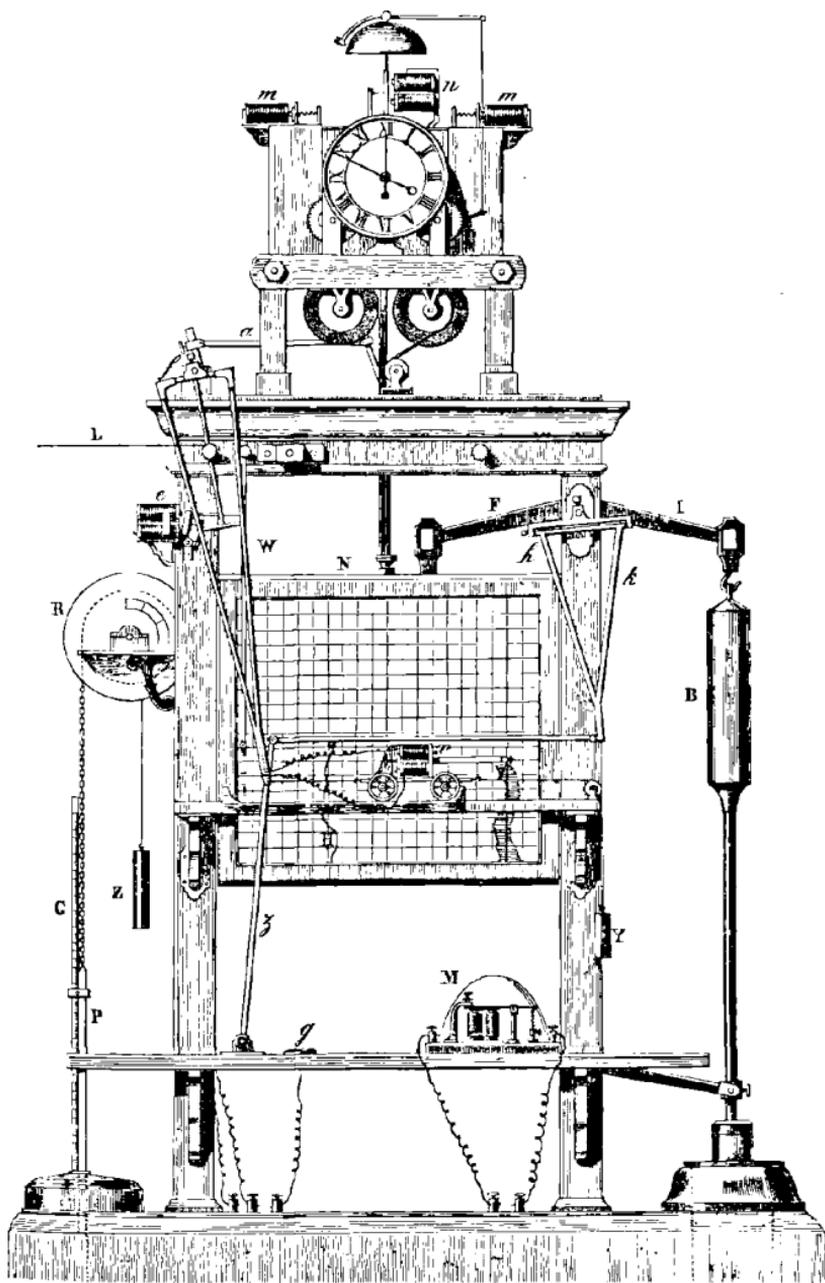


Fig. 812.

ment, le courant s'établit dans un relais translateur M, qui interrompt le circuit de l'électro-aimant α . Alors le crayon se détache et la ligne finit; puis, comme en revenant sur lui-même le chariot reproduit les fermetures et les ouvertures du courant en sens inverse, le crayon trace un autre point qui est la fin de la ligne. On a ainsi deux séries de points rangés sur deux courbes qui représentent, l'une la marche du thermomètre sec, l'autre celle du thermomètre mouillé. La distance horizontale de deux points de ces courbes est proportionnelle à la différence $t - t'$ des températures marquées dans le même moment par les thermomètres (391).

Quantité de pluie. — La quantité de pluie qui tombe dans un temps donné est enregistrée sur un disque de papier appliqué sur une poulie R. Sur la gorge de celle-ci s'enroule une chaîne à laquelle est suspendue une règle de laiton P. Cette règle est fixée, à sa partie inférieure, à un flotteur qui plonge dans un réservoir placé dans le soubassement du météorographe. A sa sortie du balancier hydraulique (fig. 810), l'eau arrive à ce réservoir, et comme la section en est quatre fois moindre que celle de l'entonnoir qui reçoit la pluie, la hauteur d'eau tombée est quadruplée; elle se mesure sur une échelle G divisée en millimètres.

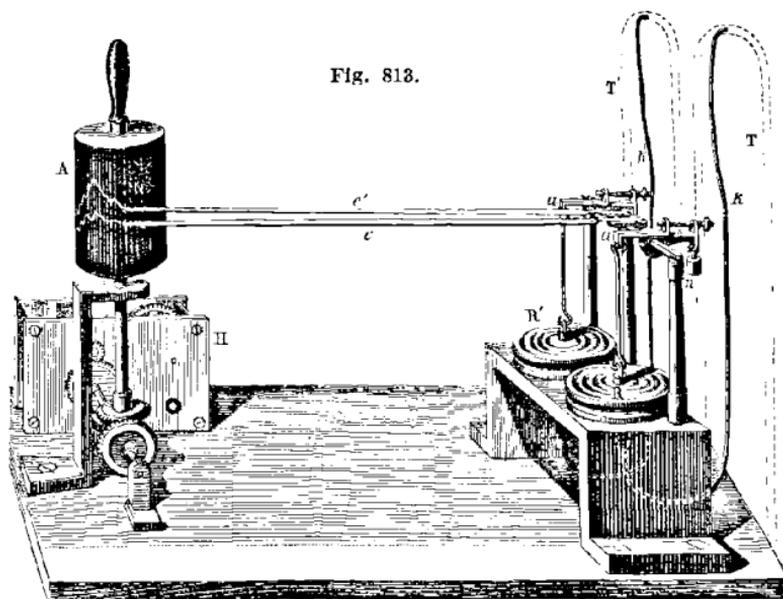
A mesure que le flotteur s'élève, un poids Z ramène la poulie en sens contraire, et sa rotation est proportionnelle à la hauteur d'eau tombée. Or un crayon avance en même temps sur le disque de papier, du centre à la circonférence, avec une vitesse de 5 millimètres par 24 heures; par suite, la quantité de pluie tombée chaque jour est inscrite à une place différente sur le disque de papier.

** Instruments qui fonctionnent à l'Observatoire de Montsouris.*

964. **Thermomètre-enregistreur de Niaudet.** — Nous réunissons ici quelques-uns des instruments de météorologie qui fonctionnent à Montsouris, où M. Marié Davy les a mis à notre disposition pour en prendre les dessins avec une bienveillance dont nous ne pouvons trop le remercier en notre nom et en celui de nos lecteurs. Nous omettons le pluviomètre et l'anémomètre de Robinson déjà décrits (929 et 963), tous les instruments magnétiques, qui appartiennent surtout à la physique du globe, et enfin tous les appareils destinés aux expériences agricoles.

Le thermomètre-enregistreur de M. Niaudet, construit par la maison Bréguet, comprend deux thermomètres, l'un sec, l'autre mouillé, de manière à former un véritable psychromètre (391). Ces thermomètres sont fixés sur une même table l'un à côté de l'autre (fig. 813), et comme ils sont identiques, il suffit d'en décrire un seul, celui placé sur le premier plan de la table. A l'extérieur d'un pavillon spécial qui renferme divers enregistreurs, et exposé à l'air libre, est le réservoir du thermomètre, consistant en un tube de cuivre T, recourbé en U, de 3 mètres de long sur 8 millimètres de diamètre intérieur. Ce réservoir est rempli d'alcool absolu, et, par un long tube capillaire k qui traverse la clôture, communique avec la partie inférieure

d'une boîte R, aussi remplie d'alcool. Les parois de cette boîte, toutes de maillechort mince, sont très-flexibles et très-élastiques; et la paroi supérieure est reliée, par une tige à double crochet, à un bras de levier *a* monté sur un couteau de balance, ainsi qu'une longue aiguille *c*, en aluminium. Le tout est équilibré par un contre-poids *r*



et une vis de rappel placée au-dessus de celui-ci permet d'allonger ou de raccourcir le bras de levier *a*. Enfin, l'aiguille *c* se termine par une pointe qui appuie légèrement sur un papier préparé au noir de fumée, comme dans l'appareil de Duhamel (223); ce papier est enroulé sur un cylindre A, qui est mû par un mouvement d'horlogerie et fait une révolution complète en 36 heures.

Ces détails connus, lorsque, par suite des variations de température, le volume de l'alcool augmente ou diminue dans le tube T, le couvercle de la boîte R se soulève ou s'abaisse, et transmettant son mouvement au levier *a*, au couteau et à l'aiguille *c*, celle-ci trace en blanc sur le papier une courbe qui sert à mesurer les variations de température. Pour cela, au moyen de la vis de rappel, on règle la longueur du bras de levier *a* de façon que, pour une variation de température de 1 degré, la pointe de l'aiguille monte ou descende d'une quantité déterminée, par exemple de 3 millimètres.

La figure 814 donne en vraie grandeur les courbes tracées par les deux thermomètres pendant 36 heures, les 29 et 30 mars 1875; la courbe supérieure est celle du thermomètre sec T, et l'inférieure celle du thermomètre mouillé T', dont le réservoir est recouvert d'une mous-

seline sur laquelle tombe goutte à goutte, d'une manière continue, de l'eau à la température ambiante.

Dans l'application du thermomètre-enregistreur, il est nécessaire de tenir compte de la dilatation irrégulière de l'alcool (315). Quant à la différence de température entre les tubes T, T' et les boîtes R, R', elle

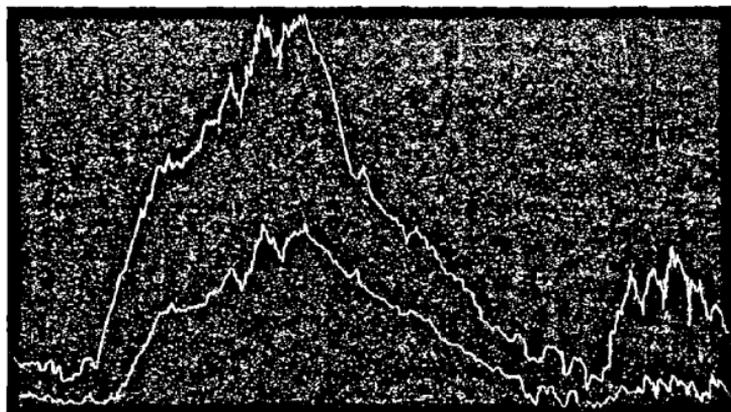


Fig. 814.

peut être négligée, la fenêtre du pavillon où est l'enregistreur restant ouverte jour et nuit, et la capacité des boîtes étant très-petite par rapport à celle des tubes.

965. **Baromètre-enregistreur.** — Les pressions atmosphériques s'inscrivent à l'aide d'un baromètre qui a beaucoup de rapport avec l'appareil qui précède. Seulement l'appareil est simple, le tube T est supprimé, et le vide est fait dans la boîte R. De plus, un ressort placé à l'intérieur tend constamment à soulever le fond supérieur de la boîte, tandis que la pression de l'air tend à le déprimer. De là des oscillations qui se transmettent à l'aiguille c et lui font tracer la courbe des pressions sur le cylindre A.

À l'Observatoire de Montsouris, des appareils construits sur le même système sont utilisés pour enregistrer l'état hygrométrique, la quantité de pluie et la force du vent. Ces appareils ne sont pas des instruments de précision, mais ils sont avantageux par la continuité de leurs indications et par la comparaison de leurs courbes respectives.

966. **Évaporomètre de Piche.** — L'évaporomètre est un petit instrument qui sert à mesurer le pouvoir évaporant de l'air, pouvoir qui dépend non-seulement du degré d'humidité de l'air, mais de la rapidité de son renouvellement et de la température. Comme la quantité d'eau qui s'évapore en un temps donné dépend encore de l'étendue de la surface libre du liquide et de son exposition plus ou moins à découvert, on doit toujours faire usage, dans chaque lieu d'observa-

tion, du même instrument, ou d'instruments identiques, soumis à la même exposition à l'air libre.

L'évaporomètre inventé il y a quelques années par M. Piche consiste en un tube de verre *a* de 25 centimètres de long et de 15 millimètres de diamètre (fig. 815). Soudé à la lampe à l'une de ses extrémités, il est rempli d'eau, et fermé à l'autre par une rondelle de papier épais et non collé, maintenue par un disque de cuivre *o* à l'aide d'un ressort à boudin qui peut glisser le long du tube. Enfin, celui-ci est gradué dans toute sa longueur en divisions qui donnent d'heure en heure, en centièmes de millimètre, l'épaisseur de la couche d'eau évaporée par la rondelle mouillée. L'instrument est suspendu à l'air dans la position que montre la figure, et près de lui est un thermomètre mouillé, qui donne la température de la rondelle, puisqu'il est placé dans la même condition d'humidité.

La vitesse du vent étant la même, l'évaporation est à son maximum aux heures les plus chaudes; elle augmente beaucoup pendant les grands vents, surtout si l'air est sec. La hauteur mensuelle d'eau évaporée est très-variable suivant les saisons. Dans trois années consécutives, à Montsouris, l'eau évaporée par l'évaporomètre Piche a été en millimètres :



Fig. 815.

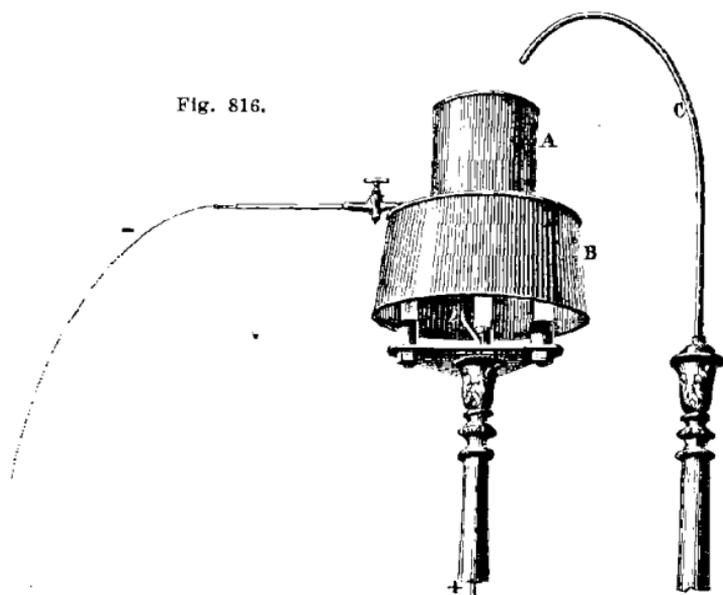
	1872-1873	1873-1874	1874-1875
Octobre	58	52	47
Novembre.	55	53	34
Décembre.	48	22	32
Juin.	97	143	92
Juillet.	122	150	81
Août.	130	131	85

967. Collecteur de l'électricité atmosphérique de W. Thomson. — En traitant des appareils qui servent à constater la présence de l'électricité dans l'atmosphère, tels que les électromètres de Saussure, de Palmieri, de Pelletier, les flèches de Becquerel, on a vu que tous ne donnent des signes d'électricité qu'à la condition qu'on les élève dans l'atmosphère. On arrive au même résultat, avec le *collecteur d'électricité* de M. W. Thomson, par l'écoulement d'un certain volume d'eau.

Cet appareil consiste en un vase métallique A, isolé sur trois tubes de verre pleins, qui sont fixés au sommet d'une colonne de fonte creuse, de deux mètres de hauteur (fig. 816). Le tout est établi à l'extérieur, dans un lieu découvert, et un chapeau de tôle B garantit les tubes de la pluie. Le vase A se remplit d'eau par un tube latéral C en communication avec un réservoir plus élevé; et l'on fait ensuite écouler l'eau du vase par une tubulure à robinet fixée à sa base. Enfin, un fil de cuivre *i*, recouvert de gutta-percha, est soudé au vase A, et descend dans l'intérieur de la colonne de fonte, d'où il se rend à un électromètre extrê-

mement sensible, dû aussi à M. Thomson, et placé dans un pavillon voisin (968).

Ces détails connus, soit le cas où la région supérieure de l'atmosphère est chargée d'électricité positive. Celle-ci, agissant par influence sur l'eau du vase A, en décompose l'électricité neutre, sans que l'électromètre en communication avec l'appareil donne encore aucun signe d'électricité; mais si on ouvre le robinet latéral, l'eau



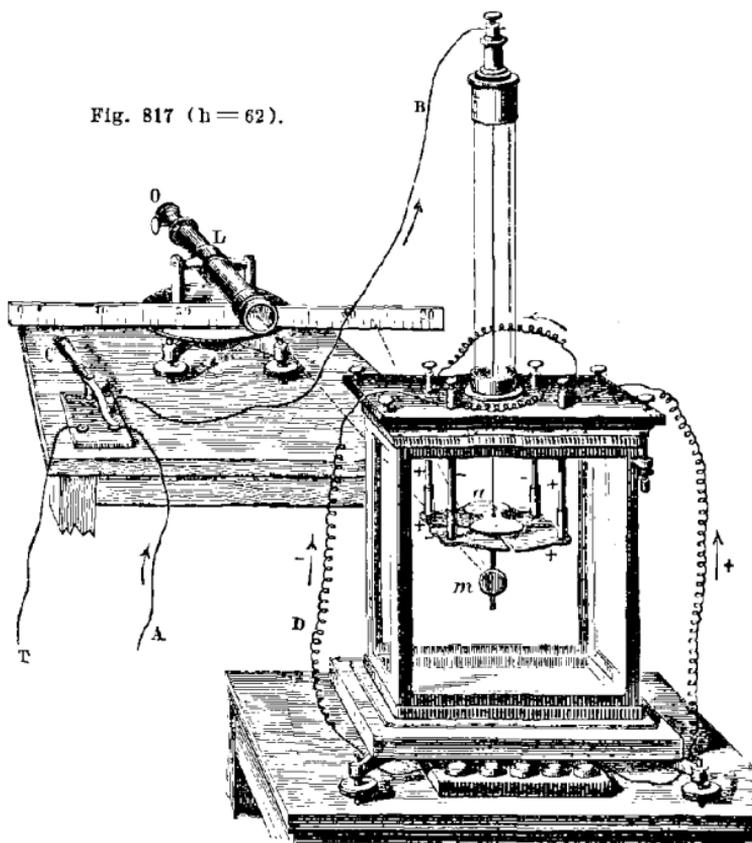
s'écoule, emportant avec elle l'électricité contraire à celle de l'atmosphère. Alors l'électricité positive, refoulée sur l'électromètre, le met en activité de la manière suivante.

968. **Électromètre à torsion et à réflexion de W. Thomson.** — Cet appareil, modifié par M. Branly, à Paris, se compose d'une cage rectangulaire de verre dont les montants sont d'ébonite, ainsi que le couvercle. A celui-ci sont fixées quatre tiges de laiton, supportant autant de secteurs de même métal, qui ne se touchent pas; à leur partie supérieure, les tiges se terminent par quatre bornes reliées entre elles deux à deux, en diagonale, par un fil de cuivre (fig. 817). De plus, les deux bornes antérieures sont en communication, l'une avec le pôle positif, l'autre avec le pôle négatif d'une pile de 50 éléments très-petits au sulfate de mercure (769). Par cette disposition, deux secteurs opposés, dans la cage, sont maintenus à une charge constante d'électricité $+$, et les deux autres à une charge constante d'électricité $-$.

Enfin, au centre du plateau d'ébonite est fixé un tube de verre de 28 centimètres de long, terminé à son sommet par une douille de laiton. Dans celle-ci tourne à frottement dur une tubulure à laquelle est suspen-

due, par un long fil de platine, une plaque mince d'aluminium *a*, métal très-léger. Cette plaque, taillée en forme de 8, étant orientée suivant une des droites de partage des quatre secteurs, elle demeure

Fig. 817 (h = 62).



en équilibre tant qu'elle est à l'état neutre; mais elle dévie, attirée par deux des secteurs et repoussée par les deux autres, aussitôt qu'elle reçoit de l'électricité du collecteur de Thomson (fig. 816), ou de toute autre source, par le fil de platine et les fils B et A. Le sens de la déviation vers les secteurs positifs ou négatifs fait alors connaître l'espèce d'électricité de l'atmosphère, et l'angle d'écart mesure la tension.

Pour cela, au-dessous de la plaque *a*, et tournant avec elle, est un petit miroir plan *m*, sur lequel se réfléchissent les divisions d'une échelle horizontale, disposée en avant du miroir sur le pied d'une lunette L. L'observateur, placé en O, lit dans la lunette les divisions dont le miroir lui renvoie l'image avant et après sa rotation; ce qui donne la tangente de l'angle de déviation et par suite l'arc, car les dé-

viations ne dépassant pas 6 à 7 divisions de l'échelle, l'arc se confond avec sa tangente.

La déviation observée étant de N divisions, il reste à en déduire la tension. Pour cela, mettant le fil B en communication avec une pile d'une tension connue T , on a une déviation n ; d'où $\frac{T}{n}$ est la dévia-

tion correspondante à une division, et $\frac{T}{n} \times N$ la tension cherchée; car tant que l'angle de déviation n'est que d'un petit nombre de degrés, l'expérience fait voir qu'il est proportionnel à la charge d'électricité.

Quant à la sensibilité de l'appareil, elle varie avec la longueur du fil de platine, avec la distance de la plaque d'aluminium aux secteurs, et enfin avec la tension de la pile qui les charge. Pour augmenter cette tension, M. Branly fait fonctionner l'électromètre de Thomson avec une pile de 100 couples zinc, platine et eau pure, disposés dans de petits tubes de verre de 3 centimètres de hauteur, isolés les uns des autres par de la paraffine, et fermés par des bouchons recouverts de la même substance, de manière à éviter toute évaporation.

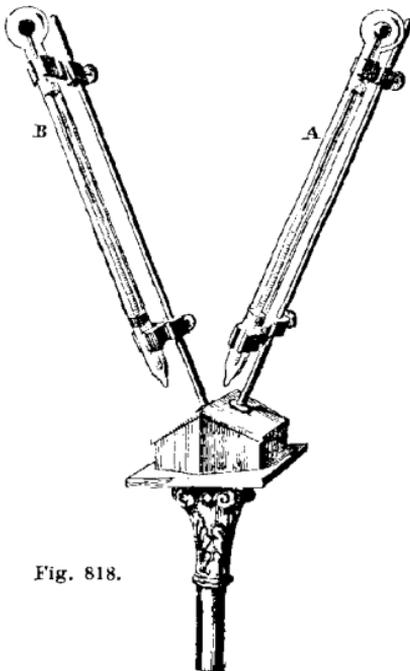


Fig. 818.

969. **Actinomètre d'Arago.** — Les *actinomètres* sont des instruments qui servent à mesurer la quantité de lumière, tant directe que diffuse, que nous envoie le soleil. Cette quantité est sensiblement la même toute l'année; mais l'air, la vapeur d'eau, les nuages en absorbent chaque jour une portion variable, d'autant plus considérable, que le soleil est plus voisin de l'horizon, car la couche atmosphérique que les rayons ont à traverser augmente alors rapidement.

On a construit plusieurs actinomètres. Celui d'Arago se compose d'un système de deux thermomètres à mercure identiques entre eux et renfermés respectivement dans des tubes de cristal A et B , d'un plus grand diamètre, dans lesquels on a fait le vide (fig. 818); le réservoir de l'un des thermomètres est recouvert de noir de fumée; le réservoir de l'autre est nu, c'est-à-dire conserve sa surface vitreuse. Disposés l'un à côté de l'autre comme le montre la figure, les deux thermomètres sont élevés d'un mètre

au-dessus d'un terrain gazonné, et exposés à l'air libre, loin de tout abri.

Dans l'obscurité, ils accusent constamment des températures égales; mais dès que le jour paraît, même par les temps les plus couverts, le thermomètre à réservoir noirci marque une température plus élevée que celui à réservoir nu. En représentant par T et t leurs températures respectives, on prend la différence $T-t$ pour *degré actinométrie*, c'est-à-dire pour mesure de la radiation solaire.

Si l'on connaissait la quantité de lumière S que recevrait l'actinomètre en dehors de notre atmosphère, le rapport $\frac{T-t}{S}$ donnerait la transparence de l'air. Cette quantité S ne peut se déterminer expérimentalement; mais à l'aide de formules établies par Lambert et par Bouguer, on a calculé des tables qui donnent la valeur de S pour l'heure de midi à différentes latitudes. Ces tables se trouvent dans l'*Annuaire météorologique de Montsouris*.

En représentant par 100 le degré moyen que marquerait l'actinomètre en dehors de notre atmosphère, les degrés actinométriques moyens observés à Montsouris, en 1874-75, sont les suivants :

Octobre.	23°,8	Avril	41°,6
Novembre	13°,8	Mal.	46°,9
Décembre.	9°,2	Juin	45°,3
Janvier.	11°,7	Juillet	45°,9
Février.	15°,2	Août	37°,8
Mars	24°,7	Septembre	24°,7

En 1873-74, la moyenne a été notablement plus élevée.

Les mesures actinométriques n'ont pas seulement un but théorique. On sait, en effet, aujourd'hui que, de même qu'il faut une quantité déterminée de chaleur pour la végétation des plantes, il leur faut aussi une somme donnée de rayons solaires; et la transparence de l'air pendant les mois de juin et juillet a une grande influence sur la maturité des céréales; ce qui explique comment, dans des années moins chaudes que d'autres, la moisson est cependant plus hâtive.

FIN

PROBLÈMES DE PHYSIQUE

AVEC SOLUTIONS, DONNÉS EN SUJET DE COMPOSITION A LA FACULTÉ
DES SCIENCES DE PARIS ET EN PROVINCE

PRÉCEPTES GÉNÉRAUX SUR LA RÉOLUTION DES PROBLÈMES DE PHYSIQUE

Objet des problèmes de physique. — Les problèmes de physique sont de véritables problèmes de mathématiques, mais dans lesquels c'est une loi physique qui lie les quantités connues à l'inconnue.

Ces problèmes étant une application de l'algèbre aux sciences physiques, on y représente, en général, non-seulement les quantités inconnues, mais encore les quantités connues, par des lettres : par exemple, les volumes par V , les densités par D , les poids par P , les températures par t , les forces élastiques par F .

En procédant ainsi, non-seulement on généralise et on obtient des expressions algébriques, ou *formules*, qui s'appliquent à toutes les questions de même forme, mais on simplifie et on abrège les calculs; à tel point, qu'il y a avantage pour les élèves, même dans un problème dont les données sont numériques, de représenter ces données par des lettres, de résoudre ainsi la question d'une manière générale, puis de remplacer, dans la formule à laquelle ils arrivent, les lettres par les valeurs particulières qui leur correspondent.

En suivant cette marche, les élèves opéreront plus vite, éviteront les erreurs toujours faciles à commettre dans un long calcul numérique; et si, enfin, la formule générale qu'ils ont obtenue est juste, les fautes de calcul qu'ils pourraient faire ensuite en remplaçant les lettres par leurs valeurs numériques seraient fortement compensées par l'exactitude du calcul algébrique.

Résolution des problèmes de physique. — Que les données d'un problème soient représentées en lettres ou en chiffres, sa résolution se compose toujours de deux parties bien distinctes : 1° *la mise en équation du problème*, c'est-à-dire la traduction en équation de la relation existant entre l'inconnue du problème et les quantités connues; 2° *la résolution de l'équation*.

La seconde partie, tout algébrique, consiste à savoir résoudre une équation du premier ou du deuxième degré, opération toujours facile et soumise à des règles invariables, avec lesquelles les élèves doivent se familiariser avant d'aborder les problèmes.

Quant à la mise en équation, on peut considérer deux cas : 1° celui où les problèmes sont compris dans l'une des formules déjà connues; 2° celui où, ne dépendant directement d'aucune formule donnée antérieurement, leur résolution exige un travail analytique spécial. De là deux genres de problèmes dont nous allons successivement nous occuper.

Problèmes qui s'appuient sur les formules données dans le cours. — Ces problèmes comprennent la presque totalité des questions élémentaires de physique, et ils offrent cet avantage, que la mise en équation se trouve toute faite par l'emploi de formules déjà connues; car celles-ci étant les équations de ces problèmes établies a priori d'une manière générale, il ne reste qu'à les résoudre, dans chaque cas particulier, par rapport à la lettre qui représente l'inconnue que l'on cherche.

Problèmes qui ne s'appuient pas sur les formules du cours. — Ces problèmes présentent plus de difficulté que ceux qu'on a considérés ci-dessus; car ici,

l'équation n'étant pas donnée d'avance, il faut la trouver. Or, si la résolution de l'équation d'un problème est soumise à des règles précises et invariables, il n'en est pas de même de sa mise en équation. En effet, la marche à suivre changeant, pour ainsi dire, avec chaque problème, on ne peut tracer aux élèves des règles sûres et constantes. Ce qu'il faut ici, c'est une grande habitude, et même un esprit de recherche et d'analyse qui ne s'acquiert pas toujours. Cependant on peut, dans beaucoup de cas, s'aider avantageusement de la règle suivante, donnée par Lacroix, pour mettre en équation les problèmes d'algèbre :

Représenter la quantité que l'on cherche par une lettre, puis, raisonnant sur cette lettre absolument comme si la quantité qu'elle représente était connue, indiquer successivement, sur elle et sur les quantités connues du problème, la même série d'opérations qu'on aurait à effectuer pour vérifier l'inconnue si elle était trouvée.

Ces préliminaires posés, nous passons à la résolution des problèmes sur les différentes branches de la physique, en choisissant de préférence ceux qui ont été donnés en sujet de composition.

PESANTEUR, GRAVITATION UNIVERSELLE

I. — Un corps étant placé successivement dans les deux plateaux d'une balance, il faut, pour lui faire équilibre dans le premier plateau, 180 grammes, et dans le second, 181; on demande le poids du corps à 1 milligramme près.

D'après la formule connue $x = \sqrt{pp'}$ (55), on a $x = \sqrt{180 \times 181} = 180^{\text{r}},499$.

II. — On suppose qu'un homme soulève à la fois 125 boulets de canon du poids de 2 kilogrammes; on demande quel serait le nombre de boulets pareils qu'il pourrait soulever, en déployant la même force musculaire, si la terre avait le volume de la lune, tout étant égal d'ailleurs. Le rayon de la terre étant pris pour unité, on prendra le rayon de la lune égal à 0,27234, et l'on ne tiendra pas compte de l'aplatissement de la terre et de la lune à leurs pôles.

Solent R le rayon de la terre et M sa masse; soient de même r et m le rayon et la masse de la lune; soient enfin N le nombre de boulets porté à la surface de la terre, le rayon étant R , N' celui qui serait porté si, la masse de la terre restant la même, son rayon était r ; et N'' le nombre qui serait porté, toujours à la surface de la terre, si, avec le rayon r , elle avait la masse m de la lune.

Les boulets pesant d'autant plus, qu'ils sont plus rapprochés du centre de la terre, N' est $< N$, et l'on a $\frac{N'}{N} = \frac{R^2}{r^2}$ [1] (41). Au contraire, les nombres N'

et N'' étant en raison inverse des masses qui les attirent, on a $\frac{N'}{N''} = \frac{m}{M}$; ou, ce

qui revient au même, à densité égale, $\frac{N'}{N''} = \frac{r^3}{R^3}$ [2], puisque, à densité égale, les masses sont proportionnelles aux volumes et ceux-ci aux cubes des rayons.

Multippliant les égalités [1] et [2] membre à membre, il vient $\frac{N}{N''} = \frac{r}{R}$; d'où

$$N'' = N \times \frac{R}{r} = \frac{125 \times 1}{0,27234} = 459 \text{ boulets.}$$

Pour d'autres problèmes sur la pesanteur, voir le paragraphe 68.

HYDROSTATIQUE, CORPS FLOTTANTS ET POIDS SPÉCIFIQUES

III. — La force avec laquelle on fait marcher une presse hydraulique est de 20 kilogr.; le bras de levier sur lequel agit cette force égale 5 fois celui de la

résistance; enfin, la surface du grand piston vaut 70 fois celle du petit. On demande la pression transmise sur le grand piston.

En représentant par F la puissance, et par p la pression exercée par le levier sur le petit piston, on a, d'après le principe des leviers (49), $p \times 1 = F \times 5$ [1]. Or soit P la pression transmise au grand piston; on a, d'après le principe d'égalité de pression (81), $P \times 1 = p \times 70$ [2]. Substituant dans cette égalité la valeur de p donnée par l'égalité [1], il vient $P = 70 \times 5 \times F = 70 \times 5 \times 20^k = 7\ 000^k$.

IV. — L'une des branches d'un siphon est remplie de mercure à une hauteur de $0^m,175$, l'autre est remplie d'un autre liquide à une hauteur de $0^m,42$; ces deux colonnes se faisant équilibre, on demande la densité du second liquide par rapport au mercure et par rapport à l'eau. La densité du mercure est 13,6.

En représentant par d la densité par rapport au mercure, et par d' la densité par rapport à l'eau, on a (91) $1 \times 0,175 = 0,42 \times d$, et $13,6 \times 0,175 = 0,42 \times d'$; d'où $d = 0,416$, et $d' = 5,666$.

V. — Quel effort exigerait, pour être soutenu dans du mercure à zéro, un décimètre cube de platine, la densité du mercure étant supposée égale à 13,6 et celle du platine à 21,5?

D'après la formule $P = VD$, le poids du décimètre cube de platine, en kilogrammes, est $1 \times 21,5 = 21^k,5$; et le poids du mercure déplacé par le platine est $1 \times 13,6 = 13^k,6$. Or, d'après le principe d'Archimède, le platine immergé perd une partie de son poids égale à celui du mercure qu'il déplace: son poids dans ce liquide est donc $21^k,5 - 13^k,6$, ou $7^k,9$; tel est donc l'effort cherché.

VI. — Étant donné un corps A, pesant dans l'air $7^sr,55$, dans l'eau $5^sr,17$, et dans un autre liquide B, $6^sr,35$, de ces données tirer la densité du corps A et celle du liquide B.

D'après l'énoncé, le poids du corps A perd dans l'eau $7^sr,55 - 5^sr,17 = 2^sr,38$; c'est le poids de l'eau déplacée. Dans le liquide B, il perd $7^sr,55 - 6^sr,35 = 1^sr,20$; c'est le poids du liquide B sous le même volume que celui du corps et de l'eau.

Donc le poids spécifique de A est $\frac{755}{238} = 3,172$, et celui de B $\frac{120}{238} = 0,504$ (103).

VII. — On a un cube de plomb de 4 centimètres de côté qu'on veut soutenir dans l'eau en le suspendant à une sphère de liège. Quel diamètre doit avoir celle-ci pour que sa poussée de bas en haut fasse équilibre au poids du cube de plomb, le poids spécifique de ce corps étant 11,35, et celui du liège 0,24.

Le volume du cube de plomb est 64 centimètres cubes; par conséquent, son poids dans l'air est $64 \times 11,35$, et son poids dans l'eau $64 \times 11,35 - 64 = 662^sr,40$.

Si l'on représente par r le rayon de la sphère de liège, en centimètres, son volume, en centimètres cubes, sera $\frac{4\pi r^3}{3}$; donc son poids, en grammes, sera $\frac{4\pi r^3 \times 0,24}{3}$. Cela posé, le poids de l'eau déplacée par la sphère de liège étant

évidemment, en grammes, $\frac{4\pi r^3}{3}$, il en résulte une poussée de bas en haut égale à

$$\frac{4\pi r^3}{3} - \frac{4\pi r^3 \times 0,24}{3} = \frac{4\pi r^3 \times 0,76}{3}.$$

Or cette poussée doit égaler le poids du plomb; donc $\frac{4\pi r^3 \times 0,76}{3} = 662^sr,40$,

$$\text{d'où } r = \sqrt[3]{\frac{1\ 987,20}{3,04 \times 3,1416}} = 5^e,925; \text{ donc le diamètre} = 11^e,85.$$

VIII.— Deux liquides, dont les densités sont 1 et $\frac{2}{3}$, sont disposés l'un au-dessus de l'autre et ne se mêlent pas. On plonge dans ces liquides une sphère dont la densité est $\frac{3}{4}$. On demande, lors de l'équilibre, le rapport des segments qui seront plongés dans les deux liquides.

Solent V le volume du segment supérieur et V' celui du segment inférieur, c'est-à-dire plongé dans le liquide le plus dense. Le poids de la sphère est $\frac{3(V+V')}{4}$, et celui des liquides déplacés $\frac{V \times 2}{3} + V'$. Or les deux poids sont égaux, donc $\frac{3(V+V')}{4} = \frac{2}{3}V + V'$, d'où $V = 3V'$.

IX. — Un morceau de bois, dont la densité est 0,729, a la forme d'un cône droit. On le fait flotter sur l'eau de manière que son axe soit vertical. En mettant d'abord le sommet en bas, puis le sommet en haut, on demande quelle fraction de la hauteur du cône s'enfoncera dans chaque cas.

1° Solent V le volume total du cône, et v le volume de la partie immergée; soient H et h les hauteurs des deux cônes, D la densité du bois, d celle de l'eau.

Les volumes V et v étant de même poids sont en raison inverse de leurs densités (45); on a donc $\frac{V}{v} = \frac{d}{D}$, ou $\frac{H^3}{h^3} = \frac{d}{D}$, puisque les volumes des cônes semblables sont entre eux comme les cubes des hauteurs; d'où $h^3 = \frac{H^3 D}{d}$. La densité d étant égale à 1, et faisant aussi $H = 1$, il vient $h = \sqrt[3]{D} = \sqrt[3]{0,729} = 0,9$ de H .

2° Dans la seconde position du cône, soit v le volume non immergé, on a

$$\frac{V}{V-v} = \frac{d}{D}, \text{ ou } \frac{H^3}{H^3 - h^3} = \frac{d}{D}; \text{ d'où } h^3 = \frac{H^3(d-D)}{d} = 1 - D,$$

en faisant $H = 1$ et $d = 1$. Donc on a $h = \sqrt[3]{1 - 0,729} = 0,647$ de H .

X. — On a un cylindre de platine de 0^m,02 de hauteur; on y adapte un cylindre de fer de même diamètre. Quelle hauteur faut-il donner au cylindre de fer pour que sa base supérieure se maintienne à la surface du mercure, lorsqu'on plonge les deux cylindres dans ce liquide; et si le diamètre des cylindres était 0^m,03, quel serait le poids du mercure déplacé? On sait que la densité du platine est 21,59, celle du mercure 13,596, et celle du fer 7,788.

1° Soient D la densité du platine, D' celle du fer et D'' celle du mercure; soient encore h la hauteur du cylindre de platine et x celle du cylindre de fer.

Le poids du platine est $\pi r^2 h D$;
celui du fer $\pi r^2 x D'$;
et celui du mercure déplacé $\pi r^2 (h+x) D''$.

$$\text{D'où } hD + xD' = (h+x)D'', \text{ et } x = \frac{h(D-D'')}{D''-D'} = \frac{2 \times 7,994}{5,808} = 2^c,75.$$

2° Le diamètre des cylindres étant 3^c, on a pour le poids du mercure déplacé

$$\frac{3,1416 \times 9(2+2,75)13,596}{4} = 456^c,497.$$

XI. — Un cylindre de bois de hêtre flottant horizontalement sur l'eau (fig. 819),

on demande le rapport du volume immergé au volume surnageant, sachant que le poids spécifique du hêtre est 0,852, et que celui de l'eau est 1.

Les deux volumes dont on cherche le rapport ayant même hauteur h , soient S et S' les segments de cercle qui leur servent de bases, le segment S étant immergé, et le segment S' surnageant.



Fig. 819.

Le volume immergé est Sh , le volume surnageant $S'h$, et le volume total du cylindre est $(S+S')h$. Le poids du cylindre est donc $(S+S')h \times 0,852$, et celui de l'eau déplacée Sh ; donc $(S+S')h \times 0,852 = Sh$; d'où $\frac{S'}{S} = 0,173$.

XII. — Quel est le poids de fer qu'il faut suspendre à un décimètre cube de liège pour faire affleurer le cube dans l'eau de mer dont la densité est 1,026. — La densité du liège est 0,24, et celle du fer 7,7.

Soit x le poids cherché en grammes. Le volume du liège en centimètres cubes étant 1000, son poids en grammes est $1000 \times 0,24$, d'après la formule $P = VD$; donc le poids des deux corps flottants est $x + 1000 \times 0,24$.

Le volume du fer étant $\frac{x}{7,7}$, le poids de l'eau de mer déplacée est

$$\left(1000 + \frac{x}{7,7}\right) \times 1,026.$$

Donc $x + 1000 \times 0,24 = \left(1000 + \frac{x}{7,7}\right) \times 1,026$; d'où $x = 906^{\text{gr}},8$.

XIII. — Un cône de fer ASB (fig. 820) plongeant dans le mercure par son sommet, on demande le rapport de la hauteur du cône immergé OS, à la hauteur totale CS, sachant que la densité du fer est d et celle du mercure d' .



Fig. 820.

Soient h la hauteur totale SC , h' la hauteur SO , R et r les rayons CB et OK . Le volume du grand cône est $\frac{\pi R^2 h}{3}$, et

son poids $\frac{\pi R^2 h d}{3}$, d'après la formule $P = VD$. De même,

le volume du cône immergé est $\frac{\pi r^2 h'}{3}$, et, par suite, le poids

du mercure déplacé par le cône de fer est $\frac{\pi r^2 h' d'}{3}$. Or ces

poids doivent être égaux; on a donc $R^2 h d = r^2 h' d'$; d'où $\frac{h'}{h} = \frac{R^2}{r^2} \times \frac{d}{d'}$ [1].

Les triangles BCS et KOS étant semblables, on a $\frac{R}{r} = \frac{h}{h'}$. Portant cette valeur

de $\frac{R}{r}$ dans l'égalité [1], $\frac{h'}{h} = \frac{h^2}{h'^2} \times \frac{d}{d'}$; d'où $\frac{h'^3}{h^3} = \frac{d}{d'}$. Extrayant la racine

cubique, il vient $\frac{h'}{h} = \sqrt[3]{\frac{d}{d'}}$. C'est-à-dire que les hauteurs des deux cônes sont

en raison inverse des racines cubiques des densités du corps immergé et du liquide, et cela quel que soit l'angle au sommet du cône.

XIV. — Un aréomètre de Baumé (pèse-acide), à tige bien cylindrique, s'enfonce jusqu'à la 66^e division dans l'acide sulfurique, dont la densité est 1,8. Cela posé, on demande : 1^o quelle est la densité de l'eau salée qui sert à la graduation de l'instrument; 2^o quel est le rapport du volume d'une division au volume de l'aréomètre jusqu'au zéro.

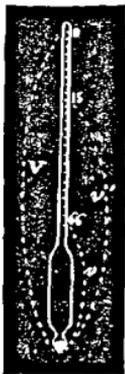


Fig. 821.

1^o Soient V le volume de l'aréomètre jusqu'au zéro de l'échelle, v le volume jusqu'à 66, et v' le volume jusqu'à 15 (fig. 821); les volumes de liquide déplacés dans l'eau et dans l'acide sulfurique étant en raison inverse des densités (99), on a $\frac{V}{v} = \frac{1,8}{1}$, ou $\frac{v+66}{v} = 1,8$, d'où $v = 82,5$, et $V = v + 66 = 148,5$. D'ailleurs de l'égalité $V - v' = 15$, on tire $v' = 133,5$; donc la densité d de l'eau salée est donnée par l'égalité $\frac{V}{v'} = \frac{d}{1}$;

$$\text{d'où } d = \frac{148,5}{133,5} = 1,112.$$

2^o Le rapport du volume d'une division au volume de l'aréomètre jusqu'au zéro est $\frac{1}{148,5}$.

XV. — Étant donnée une sphère de cuivre de 0^m,18 de rayon, creuse et contenant une sphère de platine de 0^m,05 de rayon, de telle sorte qu'il n'y ait aucun vide entre les deux sphères, on demande de calculer le poids de la masse ainsi formée, sachant que la densité du platine est 21,50, et celle du cuivre, 8,85.

$$\text{Poids du platine} = \frac{21,50 \times 4\pi r^3}{3}, \text{ poids du cuivre} = \frac{8,85 \times 4\pi (R^3 - r^3)}{3}.$$

$$\text{Somme des poids} = \frac{4\pi}{3} (21,5 r^3 + 8,85 R^3 - 8,85 r^3) =$$

$$4,1888 (12,65 \times 5^3 + 8,85 \times 18^3) = 222^{\text{r}}, 820^{\text{s}}, 92.$$

XVI. — On fabrique avec de l'or, dont la densité est 19,362, des feuilles qui ont un dix-millième de millimètre d'épaisseur; quelle surface pourrait-on recouvrir avec 10 grammes d'or?

En appelant x la surface demandée, en centimètres carrés, $x \times 0^{\text{e}}, 00001$ représente le volume des feuilles d'or, et $x \times 0^{\text{e}}, 00001 \times 19,362$ leur poids; donc on a $x \times 0^{\text{e}}, 00001 \times 19,362 = 10^{\text{g}}$; d'où $x = 5^{\text{m}}, 16^{\text{d}}, 47^{\text{c}}$.

XVII. — Un verre à vin de Champagne, de forme conique, a intérieurement 0^m,06 de diamètre au bord; il a été complètement rempli de mercure, d'eau et d'huile, en proportion telle, que la couche formée par chacun de ces liquides a 0^m,05 d'épaisseur. On sait que la densité du mercure est 13,596, celle de l'huile 0,915, et celle de l'eau 1. Calculer le poids du mercure, de l'eau et de l'huile, en négligeant l'influence de la température sur la densité de ces liquides.

D'après l'énoncé, on a $om = 3^{\circ}$ (fig. 822), et $ok = ki = ia = 5$. De plus, les triangles oma , kna et ipa étant semblables, il s'ensuit que $ip = \frac{1}{3} om = 1$, et $kn = \frac{2}{3} om = 2$.

Cela posé, le mercure se trouvant à la partie inférieure, puis l'eau et l'huile (90), le volume du cône abp occupé par le mercure égale $\pi \cdot ip^2 \times \frac{ai}{3} = \frac{3,1416 \times 1 \times 5}{3} = 5^{\text{cent}}, 236$.

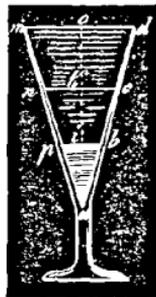


Fig. 822.

Les volumes de l'eau et de l'huile sont des troncs de cônes qui se mesurent au moyen de la formule connue $\pi(R^2 + r^2 + Rr) \times \frac{H}{3}$, dans laquelle R et r sont les rayons des bases du tronc, et H sa hauteur.

$$\text{Donc le volume d'eau } bcnp = \frac{3,14159 \times 5}{3} (4 + 1 + 2) = 36 \text{ cent.cub.}, 652,$$

$$\text{et le volume d'huile } c\bar{a}mn = \frac{3,14159 \times 5}{3} (9 + 4 + 6) = 99 \text{ cent.cub.}, 484.$$

Ces volumes connus, on aura les poids demandés, d'après la formule $P = VD$, en multipliant chaque volume par la densité correspondante. On trouve ainsi que le poids du mercure est $5,236 \times 3,596 = 718^r, 188$; celui de l'eau, $36,652 \times 1 = 368^r, 652$; et celui de l'huile, $99,484 \times 0,915 = 918^r, 027$.

XVIII. — Un fil cylindrique d'argent, de $0^m,0015$ de diamètre, pèse $38^r,2875$; on veut le recouvrir d'une couche d'or de $0^m,0002$ d'épaisseur; on demande le poids de l'or ainsi employé, sachant que le poids spécifique de l'argent est 10,47, et celui de l'or 19,26.

Solent r le rayon du cylindre d'argent, et R le rayon du même cylindre recouvert d'or, on a

$$r = 0^c,075, R = 0^c,095, r^2 = 0^{\text{cent.carr.}},005625, R^2 = 0^{\text{cent.carr.}},009025,$$

$$\text{Volume du cylindre d'argent} = \pi r^2 H = 0,0176715 \times H.$$

$$\text{Poids du même} = 0^{\text{carr.}},0176715 \times 10,47 \times H = 38^r,2875; \text{ d'où } H = 17^c,768.$$

$$\text{Volume de la couche d'or} = \pi H (R^2 - r^2) = 3,1416 \times 17,768 \times 0,0034 = 0^{\text{c.cub.}},189787; \text{ d'où le poids de l'or} = VD = 38^r,655.$$

XIX. — On demande le prix d'un tuyau de conduite de fonte, ayant $0^m,245$ de diamètre intérieur, $0^m,014$ d'épaisseur, et 2134^m de longueur; la densité de la fonte est 7,207, et son prix $0^f,20$ le kilogramme.

$$\text{Prix} = 35\ 039^f,48.$$

XX. — Déterminer les volumes de deux liquides dont les densités sont, pour l'un 1,3, et pour l'autre 0,7, sachant que, si on les mélange, le volume est égal à 3 litres et la densité à 0,9.

Solent v et v' les deux volumes demandés, on a d'abord $v + v' = 3^{\text{lit.}}$ [1]; et d'après la formule $P = VD$, le poids de chaque liquide étant $v \times 1,3$ et $v' \times 0,7$, on a $1,3v + 0,7v' = 0,9 \times 3$ [2]. Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $v = 1$, et $v' = 2$.

XXI. — Les décimes nouveaux pèsent 108^r , et sont composés d'un alliage de 0,95 de cuivre, 0,04 d'étain, et 0,01 de zinc; la densité du cuivre est 8,85, celle de l'étain 7,29, et celle du zinc 7,12; combien faudrait-il de ces pièces pour fournir le métal nécessaire à la fabrication d'une sphère de même alliage de $0^m,25$ de diamètre à zéro.

Le volume v d'une pièce de 10 centimes est, d'après l'énoncé et d'après la formule $V = \frac{P}{D}$, $v = \frac{9,5}{8,85} + \frac{0,4}{7,29} + \frac{0,1}{7,12} = \frac{17491735}{15311916}$.

Or, le volume de la sphère étant $\frac{4\pi R^3}{3}$, le nombre des pièces est

$$\frac{4\pi R^3}{3} : v = \frac{4 \times 3,1416 \times (12^c,5)^3}{3} \times \frac{15311916}{17491735} = 7161,7.$$

XXII. — Un vase de forme conique a 0^m,08 de diamètre à son ouverture et 0^m,12 de hauteur; il est placé d'aplomb, et rempli de mercure et d'eau dans des proportions telles, que le poids du mercure est le triple du poids de l'eau. La température est zéro, la densité du mercure 13,598, et celle de l'eau 1. On demande l'épaisseur de chaque couche liquide (fig. 823).

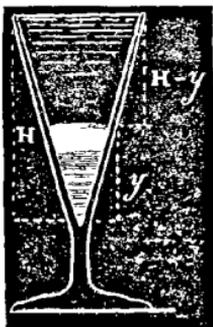


Fig. 823.

Or $\frac{R^2}{r^2} = \frac{H^2}{y^2} = \frac{144}{y^2}$; donc $y = \frac{144}{y^2} \times \frac{36}{16,598}$, d'où $y = \sqrt[3]{\frac{144 \times 36}{16,598}} = 0^m,0678$, et $H - y = 0^m,0522$.

XXIII. — Le poids spécifique du zinc étant 7, et celui du cuivre 9, quelles quantités de zinc et de cuivre doit-on prendre pour former un alliage qui pèse 50 grammes, et dont le poids spécifique soit 8,2, en admettant que le volume de l'alliage soit exactement la somme des volumes des métaux alliés?

Solent x et y les poids de zinc et de cuivre demandés.

On a d'abord $x + y = 50$ [1]; et, d'après la formule $P = VD$, qui donne

$V = \frac{P}{D}$, les volumes des deux métaux et de leur alliage sont respectivement

$\frac{x}{7}$, $\frac{y}{9}$ et $\frac{50}{8,2}$; on a donc $\frac{x}{7} + \frac{y}{9} = \frac{50}{8,2}$ [2].

Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = 17^r,07$, et $y = 32^r,93$.

XXIV. — Quel est l'effort F nécessaire pour soutenir une cloche pleine de mercure et plongée dans le même liquide, son diamètre intérieur étant de 6 centimètres, sa hauteur ob (fig. 824) au-dessus du niveau du bain, de 18 centimètres, et la hauteur du baromètre étant de 0^m,77?

A l'extérieur, cette cloche supporte, de haut en bas, une pression égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la section cd et pour hauteur celle du baromètre; par conséquent cette pression égale $\pi R^2 \times 0,77 \times 13,596$.

A l'intérieur, elle supporte, de bas en haut, une pression égale à la pression atmosphérique, moins le poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la section cd et pour hauteur ob ; c'est-à-dire que la pression de bas en haut égale

$$\pi R^2 (0,77 - 0,18) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,59 \times 13,596.$$

L'effort nécessaire pour soutenir la cloche sera donc égal à la différence de ces deux pressions, ou à

$$\pi R^2 (0,77 - 0,59) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,18 \times 13,596.$$

En faisant $R = 3$ centimètres, on trouve $F = 6^r,9198^r$.



Fig. 824.

XXV. — A quelle hauteur s'élève l'eau au premier coup de piston dans le tuyau d'aspiration d'une pompe, la course du piston étant de 0^m,50, la hauteur du tuyau d'aspiration de 6 mètres, et sa section $\frac{1}{10}$ de celle du piston?

Au commencement de l'expérience l'air, dans le tuyau d'aspiration, est à une pression égale à celle de 10 mètres d'eau.

En représentant par 1 la section du tuyau, celle du corps de pompe est 10, et les volumes du tuyau et du corps de pompe sont respectivement 6 et 5. Donc, en représentant par x la hauteur à laquelle s'élève l'eau dans le tuyau, les volumes d'air, dans la pompe, avant et après l'ascension du piston, sont 6 à la pression 10, et $5 + 6 - x$ à la pression $10 - x$; d'où $6 \times 10 = (11 - x)(10 - x)$. Résolvant, on trouve $x' = 18^m,26$, et $x'' = 2^m,74$.

La première valeur est une *solution étrangère* qui ne satisfait évidemment pas à la question; donc la hauteur à laquelle s'élève l'eau est 2^m,74.

LOI DE MARIOTTE ET MÉLANGE DES GAZ (156 et 165)

XXVI. — Dans un récipient de 3 litres on fait entrer : 1° 2 litres d'hydrogène à la pression de 5 atmosphères; 2° 4 litres d'acide carbonique à la pression de 4 atmosphères; 3° 3 litres d'azote à la pression de $\frac{1}{2}$ atmosphère. On demande la pression finale du mélange, la température étant supposée constante pendant l'expérience.

L'hydrogène passant du volume 2 au volume 3, sa pression diminue et devient $\frac{5 \times 2}{3}$; de même celle de l'acide carbonique devient $\frac{4 \times 4}{3}$, et celle de l'azote reste $\frac{1}{2}$. Or, d'après la troisième loi des mélanges des gaz (165), la force élastique du mélange doit égaler la somme des forces élastiques des gaz mélangés; donc la

$$\text{pression cherchée} = \frac{5 \times 2}{3} + \frac{4 \times 4}{3} + \frac{1}{2} = 9^{\text{atm.}} + \frac{1}{6}.$$

XXVII. — Un vase contenant 10 litres d'eau est d'abord exposé au contact de l'oxygène, à la pression 0^m,78, un temps suffisant pour que l'eau absorbe tout ce qu'elle peut en dissoudre; ce même vase étant ensuite placé dans une atmosphère limitée de 100 litres d'acide carbonique, à la pression 0^m,72, on demande les volumes des deux gaz dissous dans l'eau lorsque l'équilibre est établi. Le coefficient d'absorption de l'oxygène est 0,042, et celui de l'acide carbonique 1 (170).

Le coefficient d'absorption de l'oxygène étant 0,042, 10 litres d'eau en dissolvent 0^{lit},42. Or ce gaz, se comportant comme s'il était seul dans l'espace occupé par l'acide carbonique (169), occupe un volume de 100^{lit},42, savoir 100 litres à l'état gazeux, et 0^{lit},42 en dissolution dans l'eau. La tension de l'oxygène est donc $78 \times \frac{0,42}{100,42} = 0^c,326$.

De même, le coefficient de solubilité de l'acide carbonique étant 1, les 10 litres d'eau en dissolvent 10 litres, et le volume du gaz devient 110 litres, dont 100 à l'état gazeux et 10 en dissolution. La tension est donc $72 \times \frac{100}{110} = 65,454$; d'où la pression totale, après que l'équilibre s'est établi, est

$$0^c,326 + 65^c,454 = 65^c,780.$$

Donc le volume d'oxygène dissous, ramené à la pression 65^c,78, est

$$0^{\text{m}},42 \times \frac{0,326}{65,780} = 0^{\text{m}},00208;$$

et celui de l'acide carbonique, à la même pression, $10^{\text{m}} \times \frac{65,4545}{65,780} = 9^{\text{m}},95$.

PERTE DE POIDS DANS LES GAZ, AÉROSTATS
(173, 174 et 178)

XXVIII. — Pour faire équilibre au poids d'un lingot de platine placé dans le plateau d'une balance, on a placé dans l'autre plateau un poids de 27 grammes, de cuivre jaune. Combien aurait-il fallu en mettre, si la pesée avait été faite dans le vide? — On sait que la densité du platine est 21,5, celle du cuivre jaune 8,3; et que l'air à 0 degré et à la pression $0^{\text{m}},76$, condition dans laquelle on opère, pèse 770 fois moins que l'eau.

Le poids du laiton, dans l'air, n'est pas 27 grammes, car ce poids a été marqué dans le vide. Le vrai poids est 27 gr. moins le poids de l'air déplacé. Or, d'après la formule $P = VD$, le volume du laiton est $\frac{P}{D} = \frac{27^{\text{gr}}}{8,3}$; et le poids de l'air déplacé $= \frac{27^{\text{gr}}}{8,3 \times 770}$. Donc le poids réel du laiton dans l'air est $27^{\text{gr}} - \frac{27}{8,3 \times 770}$.

De même, si l'on représente par x le poids du platine dans le vide, son poids dans l'air le sera par x moins le poids de l'air déplacé, c'est-à-dire par $x - \frac{x}{21,5 \times 770}$.

Ce poids devant égalier celui du laiton, on a

$$x - \frac{x}{21,5 \times 770} = 27 - \frac{27}{8,3 \times 770}; \text{ d'où } x = 26^{\text{gr}},996.$$

XXIX. — La densité de l'air étant 1, celle de l'hydrogène 0,069, et celle de l'acide carbonique 1,524, à 0 degré et à la pression $0^{\text{m}},76$, un corps dans l'acide carbonique perd $1^{\text{gr}},15$ de son poids; on demande quelle serait sa perte de poids dans l'air et dans l'hydrogène.

On demande encore : 1° si le rapport des pertes de poids reste le même à la température de 200 degrés, la pression ne changeant pas; 2° si ce rapport reste le même à la pression de 30 atmosphères, la température étant 0 degré.

Un litre d'air à 0° et à la pression $0^{\text{m}},76$, pesant $1^{\text{gr}},3$, un litre d'acide carbonique, dont la densité est 1,524, pèse $1^{\text{gr}},3 \times 1,524 = 1^{\text{gr}},9812$. On aura donc le volume d'acide carbonique correspondant à $1^{\text{gr}},15$, en divisant $1^{\text{gr}},15$ par $1^{\text{gr}},9812$, ce qui donne pour quotient $0^{\text{m}},5804$. Or, ce volume étant celui du corps, celui-ci déplace $0^{\text{m}},5804$ d'air, et, par conséquent, sa perte de poids dans l'air (173) est $1^{\text{gr}},3 \times 0,5804 = 0^{\text{gr}},75452$. Quant à sa perte de poids dans l'hydrogène, elle est $0^{\text{gr}},75452 \times 0,069 = 0^{\text{gr}},052062$.

Le rapport des pertes de poids dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène ne reste pas le même quand la température ou la pression change, parce que ces deux gaz ne sont pas également dilatables ni également compressibles.

XXX. — Un corps perd dans l'air 7 grammes de son poids; combien perdrait-il dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène, sachant que la densité de l'acide carbonique est 1,524, et celle de l'hydrogène 0,069?

Le corps perdant 7 grammes de son poids dans l'air, perd, dans un gaz deux, trois fois plus dense, deux, trois fois davantage; donc, dans l'acide carbonique, perd $7^{\text{gr}} \times 1,524 = 10^{\text{gr}},668$, et dans l'hydrogène $7^{\text{gr}} \times 0,069 = 0^{\text{gr}},483$.

XXXI. — Deux ballons de verre sont en équilibre dans les plateaux d'une balance; l'air est sec, à zéro et à la pression $0^{\text{m}},76$; le diamètre de l'un des ballons est $0^{\text{m}},34$, et celui de l'autre $0^{\text{m}},18$; la température s'élève à 30 degrés,

et la pression devient 0^m,74. On demande si l'équilibre persistera. Dans le cas où il serait troublé, quel poids faudrait-il pour le rétablir, et dans quel plateau faudra-t-il le placer? Les ballons sont fermés, en sorte qu'il ne peut survenir aucune variation dans le poids du gaz qu'ils renferment. — Le poids d'un litre d'air à zéro et à 0^m,76 est 1^{sr},293; le coefficient de l'air est 0,00367, et le coefficient cubique du verre $\frac{1}{38700}$.

En représentant par D et d les diamètres respectifs des deux ballons en décimètres, en posant $\alpha = 0,00367$, $\delta = \frac{1}{38700}$, $t = 30$, et x étant le poids cherché, le volume du premier ballon, à 0°, est $\frac{\pi D^3}{6}$, d'après la formule connue du volume de la sphère; et le poids de l'air déplacé, à 0° et à la pression 76, est $\frac{1^{sr},293 \times \pi D^3}{6}$.

Or le volume du même ballon à t degré est $\frac{\pi D^3(1 + \delta t)}{6}$, et le poids de l'air déplacé, à t degré et à la pression 74, est $\frac{1^{sr},293 \times \pi D^3(1 + \delta t) 74}{6(1 + \alpha t) 76}$.

74 étant plus petit que 76, et $\delta < \alpha$, cette seconde perte de poids est moindre que la première, et le ballon pèse en plus la différence de ces deux poids, ou

$$\frac{1^{sr},293 \times \pi D^3}{6} \left[1 - \frac{(1 + \delta t) 74}{(1 + \alpha t) 76} \right] \quad [1].$$

De même, le second ballon, à t degrés et à la pression 74, pèse en plus

$$\frac{1^{sr},293 \times \pi d^3}{6} \left[1 - \frac{(1 + \delta t) 74}{(1 + \alpha t) 76} \right] \quad [2].$$

Or, à cause de $d < D$, c'est le second ballon qui est le plus léger, et il faut lui ajouter un poids x égal à la différence des deux augmentations [1] et [2].

Donc
$$x = \frac{1^{sr},293 \times \pi}{6} \left[1 - \frac{(1 + \delta t) 74}{(1 + \alpha t) 76} \right] (D^3 - d^3).$$

Remplaçant et effectuant les calculs, on trouve $x = 2^{sr},770$.

XXXII. — Calculer la force ascensionnelle d'un ballon sphérique de taffetas, qui, étant vide, pèse 63^k,620, et qui est rempli d'hydrogène impur, sachant que le taffetas verni pèse 0^k,250^{sr} le mètre carré, le mètre cube d'air 1^k,300^{sr}, et le mètre cube d'hydrogène 0^k,100^{sr}.

La surface du ballon = $\frac{63^k,620}{0^k,250} = 254^{m.carr.},48$. Or, la surface du ballon, étant celle d'une sphère, est égale à $4\pi R^2$; on a donc $4\pi R^2 = 254^{m.carr.},48$; d'où

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{254,48}{3,1416}} = \frac{1}{2} \sqrt{81,0033} = 4^m,50;$$

$$\text{et } V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times (4,5)^3}{3} = 381^{m.cub.},7044.$$

Le poids de l'air déplacé est donc $1^k,3 \times 381,7044 = 496^k,216^{sr}$.

Le poids de l'hydrogène est $0^k,1 \times 381,7044 = 38^k,1704$; donc la force ascensionnelle est $496^k,216 - 38^k,170 - 63^k,620 = 294^k,426^{sr}$.

XXXIII. — On donne un ballon dont le rayon est de 1 mètre; ce ballon est rempli aux trois quarts de gaz hydrogène; on demande le poids qu'il pourrait enlever, sachant que la densité de l'hydrogène est 0,069, et qu'un litre d'air pèse 1^{sr},3. L'air et l'hydrogène sont à la pression 0^m,76 et à la température 0 degré.

Volume du ballon = $\frac{4\pi R^3}{3}$, dont les $\frac{3}{4} = \frac{4\pi R^3}{3} \times \frac{3}{4} = \pi R^3 = 3^{m.cub.},1416$. Un

mètre cube d'air pesant $1^k,300^r$, le poids de l'air déplacé par le ballon est $1^k,300 \times 3,1416 = 4^k,084^r$. Quant au poids de l'hydrogène qui remplit le ballon, il est $4^k,084 \times 0,069 = 0^k,281$. Donc le poids que le ballon peut enlever, y compris son propre poids, est $4^k,084 - 0^k,281 = 3^k,803^r$.

XXXIV. — On a un aérostat sphérique de 4 mètres de diamètre; on l'empli d'hydrogène impur, qui pèse 100 grammes le mètre cube; le taffetas verni dont est formée l'enveloppe pèse 250 grammes le mètre carré. On demande combien il faut d'hydrogène pour le remplir, et à quel poids il peut faire équilibre, sachant que l'air pèse 1300 grammes le mètre cube.

$$\text{On a } V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times 8}{3} = 33^m.\text{cub},510,$$

$$\text{et } S = 4\pi R^2 = 4 \times 3,1416 \times 4 = 50^m.\text{car},2656.$$

Par conséquent, le poids de l'hydrogène contenu dans le ballon est, d'après l'énoncé, $100^r \times 33,510 = 3^k,351$; et celui de l'enveloppe égale $250^r \times 50,2656 = 12^k,566$. Le poids total du ballon, y compris celui de l'hydrogène et de l'enveloppe, est donc $3^k,351 + 12^k,566 = 15^k,917$.

Mais le poids de l'air déplacé par le ballon, et, par suite, la poussée de bas en haut (173), est, d'après l'énoncé, $1^k,300 \times 33,510 = 43^k,563$. Donc le poids auquel le ballon peut faire équilibre est $43^k,563 - 15^k,917 = 27^k,646$.

MACHINES PNEUMATIQUE ET DE COMPRESSION (184 et 187)

XXXV. — Le volume d'air, dans le manomètre d'une machine de compression, est égal à 152 parties. Par le jeu de la machine, ce volume est réduit à 37, et le mercure s'est élevé, dans le tube manométrique, à $0^m,48$. On demande dans quel rapport s'est accrue la masse d'air dans le récipient.

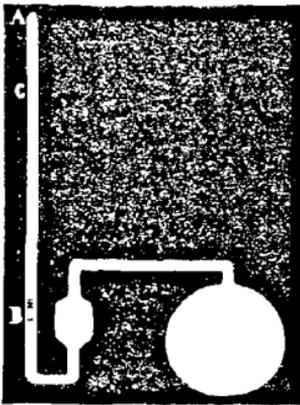


Fig. 825.

On a $AB = 152$ parties, $AC = 37$ parties, et $BC = 0^m,48$ (fig. 825). La pression de l'air en AC est donc, d'après la loi de Mariotte, $\frac{152}{37} = 4^k,108 = 3^m,122$, puisqu'une atmosphère est représentée par $0^m,76$. La pression dans le récipient M , où l'on comprime l'air, est donc $3^m,122 + 0^m,48 = 3^m,602$. Or la masse de l'air ayant augmenté comme la pression, elle est actuellement, dans le récipient, $\frac{3^m,602}{0,76} = 4,7$.

C'est-à-dire qu'elle est devenue 4 fois $\frac{7}{10}$ plus

grande.

XXXVI. — Sachant que la capacité du corps de pompe d'une machine pneumatique est $\frac{1}{3}$ de la capacité du récipient, calculer après combien de coups de piston simples la pression intérieure sera la deux-centième partie de ce qu'elle était primitivement.

Soient 1 la pression atmosphérique et 1 le volume du récipient. Après l'ascension du piston, ce volume sera $1 + \frac{1}{3}$, et par conséquent la pression de l'air

sous le récipient sera $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$, puisqu'elle est en raison inverse du volume. De

même, au second coup de piston, elle est $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$ de ce qu'elle était après le pre-

mier, c'est-à-dire $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$ de $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$, ou $\frac{1}{(1 + \frac{1}{3})^2}$.

On trouvera ainsi qu'après n coups de piston, la pression est $\frac{1}{(1 + \frac{1}{3})^n}$ [1].

On a donc $\frac{1}{(1 + \frac{1}{3})^n} = \frac{1}{200}$, d'où $(1 + \frac{1}{3})^n = 200$, ou $(\frac{4}{3})^n = 200$.

Prenant les logarithmes, il vient $n = \frac{\log 200}{\log 4 - \log 3} = 18,4$.

La formule [1] ci-dessus pourrait aussi se déduire de la formule $F = H \left(\frac{V}{V + v} \right)^n$ donnée au paragraphe 184, en y faisant $H = 1$, $V = 1$, et $v = \frac{1}{3}$.

XXXVII. — Un manomètre à air comprimé est divisé en 110 parties d'égale ca-

pacité : quand la pression extérieure est de 0^m,76, le mercure, dans l'intérieur du tube et dans la cuvette, se tient au zéro de l'échelle. On porte le manomètre sous le récipient d'une machine à comprimer l'air, et on voit le mercure s'élever jusqu'à la 80^e division; mesurant alors la hauteur du mercure dans le tube, on la trouve de 0^m,45; on demande la pression dans la machine.

Soit P la pression, en atmosphères, de l'air en AB (fig. 826); la portion de l'échelle correspondante à AB étant 80, on a $\frac{P}{76} = \frac{110}{30}$, d'où $P = 2^m,787$. En y ajoutant la hauteur 0^m,450 du mercure dans le tube, la pression totale est 3^m,237.

Pour la réduire en atmosphères, il n'y a qu'à diviser 3^m,237 par 0^m,76, ce qui donne 4^{mm} + $\frac{1}{4}$.

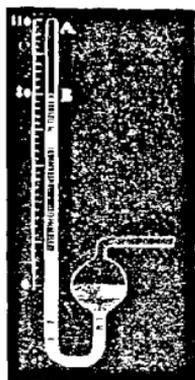


Fig. 826.

XXXVIII. — On fait jouer le piston d'une machine pneumatique; la capacité du récipient est de 7^{lit},53, et il est rempli d'air à la pression 0^m,76 et à la température 0°. On demande : 1° le poids de l'air lorsque la pression est réduite à 0^m,021; 2° le poids de l'air extrait par le piston; 3° le poids de l'air qui resterait dans la cloche à la température de 15 degrés.

1° A 0° et 0^m,76 de pression, 7^{lit},53 d'air pèsent 1^{gr},293 \times 7,53 = 9^{gr},736.

A 0° et 0^m,021 de pression, le même volume pèse donc $\frac{9^{gr},736 \times 21}{760} = 0^{gr},269$.

2° Le poids de l'air retiré égale 9^{gr},736 — 0^{gr},269 = 9^{gr},467.

3° Le poids de l'air qui resterait, à 15°, serait $\frac{0^{gr},269}{1 + 0,00367 \times 15} = 0^{gr},255$.

XXXIX. — La cloche d'une machine pneumatique renferme $3^{m},17$ d'air; un

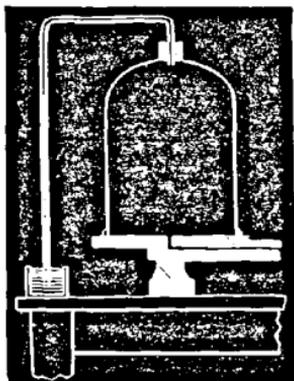


Fig. 827.

baromètre communiquant avec la partie supérieure de la cloche, marque zéro quand celle-ci est en communication avec l'atmosphère (fig. 827). On ferme la cloche et on fait jouer la machine; le mercure s'élève alors dans le baromètre de $0^{m},65$. Un second baromètre, placé près de la machine, a marqué $0^{m},76$ pendant toute l'expérience. On demande le poids de l'air qu'on a retiré de la cloche et le poids de celui qui reste, la température étant zéro.

A 0° et à $0^{m},76$, le poids de l'air dans la cloche est $1^{r},3 \times 3,17 = 4^{r},121$.

A 0° et à la pression $76 - 65 = 11$, le poids de l'air qui reste dans la cloche est

$$\frac{1^{r},3 \times 3,17 \times 11}{76} = 0^{r},596.$$

Done le poids de l'air retiré de la cloche est $4^{r},121 - 0^{r},596 = 3^{r},525$.

ACOUSTIQUE (210, 242, 245, 254 et 258)

XL. — Le bruit du canon a mis 15 secondes à se transmettre d'un lieu à un autre, la température étant de 22 degrés; on demande la distance entre ces deux lieux, sachant que la vitesse du son à zéro est de 333 mètres.

On a vu (210) que la vitesse du son dans l'air, à t degrés, est donnée par la formule $v' = v\sqrt{1 + \alpha t}$, α étant le coefficient de dilatation de l'air, et égal à 0,00367, et v étant la vitesse du son à zéro.

Donc la vitesse, à 22 degrés, égale $333\sqrt{1 + 0,00367 \times 22} = 346^{m}$. Or cette vitesse étant le chemin parcouru par le son en une seconde, le chemin parcouru en 15 secondes est $346^{m} \times 15 = 5190$ mètres; c'est la distance demandée.

XLI. — La densité du fer étant 7,8, celle du cuivre 8,9, on demande quel doit être le rapport des diamètres de deux fils cylindriques, l'un de fer, l'autre de cuivre, de longueurs égales et également tendus, pour qu'ils rendent la même note lorsqu'on les fait vibrer transversalement.

D'après la formule sur les vibrations transversales des cordes, $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{P}{\pi d}}$ (242), les poids, les longueurs et les nombres de vibrations étant les mêmes pour les deux fils, on a

$$\frac{1}{rl} \sqrt{\frac{P}{\pi d}} = \frac{1}{r'l'} \sqrt{\frac{P}{\pi d'}}, \text{ ou, simplifiant, } \frac{1}{r} \sqrt{\frac{1}{d}} = \frac{1}{r'} \sqrt{\frac{1}{d'}};$$

$$\text{d'où } \frac{r^2}{r'^2} = \frac{d'}{d} = \frac{8,9}{7,8}, \text{ donc } \frac{r}{r'} = \sqrt{\frac{8,9}{7,8}} = 1,068.$$

XLII. — Ayant laissé tomber une pierre dans un puits, le son qu'elle produit en rencontrant l'eau ne se fait entendre que 3 secondes après qu'on l'a lâchée. Quelle est la profondeur du puits, sachant que le son parcourt 337 mètres par seconde.

Représentons par v la vitesse du son, par x la profondeur du puits jusqu'à

l'eau, et par T le temps qui s'écoule entre le commencement de la chute et la perception du son. De la formule $e = \frac{1}{2}gt^2$ (60), on tire $t = \sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{\frac{2x}{g}}$; c'est le temps que la pierre met à tomber.

Pour trouver le temps qu'il faut au son pour arriver à l'oreille de l'observateur, remarquons que l'espace qu'il parcourt par seconde étant v , il lui faudra, pour l'espace x , autant de secondes que x contient de fois v , c'est-à-dire $\frac{x}{v}$.

$$\text{Donc } \sqrt{\frac{2x}{g}} + \frac{x}{v} = T, \text{ ou } \sqrt{\frac{2x}{g}} = T - \frac{x}{v}; \text{ d'où } \frac{2x}{g} = T^2 - \frac{2Tx}{v} + \frac{x^2}{v^2}.$$

Ou, en réduisant, $gx^2 - 2v(v + gT)x + v^2gT^2 = 0$.

$$\text{Résolvant, on trouve } x = \frac{v}{g} \left\{ gT + v \pm \sqrt{v(2gT + v)} \right\}.$$

Remplaçant v , g et T par leurs valeurs, on trouve

$$x = \frac{337}{9,81} \left\{ 9,81 \times 3 + 337 \pm \sqrt{337(2 \times 9,81 \times 3 + 337)} \right\}; \cdot$$

$$\text{d'où } x = \frac{337}{9,81} (366,43 \pm 365,24);$$

ce qui donne les deux solutions $x' = 25134^m,9$, et $x'' = 40^m,8$. La première est à rejeter, car elle représente un espace plus grand que celui que parcourt le son en 3 secondes. C'est une *solution étrangère*, due à l'élevation au carré du radical $\sqrt{\frac{2x}{g}}$ dans l'équation du problème. La profondeur du puits est donc $40^m,8$.

XLIII. — Quelle doit être la tension, en kilogrammes, d'une corde de cuivre de $0^m,50$ de longueur et de $0^m,25$ de rayon, pour qu'elle fasse 800 vibrations par seconde? La densité du cuivre est 8,87.

Comme il s'agit ici du nombre absolu de vibrations, on doit faire usage de la formule $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$ (242). Remplaçant dans cette formule les lettres par les données du problème, et prenant pour unité le décimètre, il vient

$$800 = \frac{1}{0,0025 \times 5} \sqrt{\frac{98,088 \times P}{3,1415 \times 8,87}}; \text{ d'où } P = 28^k,392^m,8.$$

XLIV. — Un projectile est lancé horizontalement avec une vitesse de 200 mètres à la seconde. 5 secondes après l'instant du départ on entend le bruit produit par le choc du projectile contre un obstacle. La température est zéro. On demande à quelle distance l'observateur, placé au point de départ, est de l'obstacle.

$$\frac{e}{200} + \frac{e}{333} = 5^s, \text{ d'où } e = 624^m,5.$$

XLV. — Deux cordes de matières différentes, de même longueur et de même section, ont des densités d et d' . Chacune étant tendue par un poids égal à son propre poids, on demande le rapport des sons qu'elles peuvent rendre.

$$\text{En s'appuyant sur la formule } n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{P}{\pi d}}, \text{ on trouve } \frac{n}{n'} = 1.$$

Pour d'autres problèmes sur les vibrations des cordes, voir le paragraphe 245, et pour les problèmes sur les tuyaux sonores, le paragraphe 259.

ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES

XLVI. — Un thermomètre centigrade marque 35 degrés; que doivent marquer dans le même moment un thermomètre Réaumur et un thermomètre Fahrenheit?

D'après les rapports qui existent entre les trois échelles (283),

le thermomètre Réaumur marque $35 \times \frac{4}{5} = 28^{\circ}$; et le thermomètre Fahrenheit $35 \times \frac{9}{5} + 32 = 95$.

XLVII. — A quelle température le thermomètre centigrade et le thermomètre Fahrenheit marquent-ils le même nombre de degrés?

x étant cette température, on a $(x - 32) \times \frac{5}{9} = x$, d'où $x = -40^{\circ}$.

XLVIII. — On a deux thermomètres à mercure construits avec le même verre : l'un a une boule dont le diamètre intérieur est $0^m,0075$, et un tube dont le diamètre intérieur est $0^m,0025$; l'autre a une boule de $0^m,0082$ de diamètre, et un tube de $0^m,0015$ de diamètre intérieur. On demande quel est le rapport de longueur d'un degré du premier thermomètre à un degré du second.

Solent A et B les deux thermomètres donnés, D et D' les diamètres des boules, d et d' les diamètres des tubes (fig. 828). Si l'on conçoit un troisième thermomètre C qui ait la même boule que B et le même tube que A, et si l'on représente par l , l' , l'' , les longueurs respectives d'un degré dans les trois thermomètres, les thermomètres A et C ayant des tiges de mêmes diamètres, les longueurs l et l'' sont directement proportionnelles aux volumes des boules D et D', ou, ce qui est la même chose, aux cubes de leurs diamètres; et les thermomètres B et C ayant mêmes boules, les longueurs l'' et l' sont inversement proportionnelles aux sections des tiges, ou, ce qui revient au même, au carré de leurs diamètres.

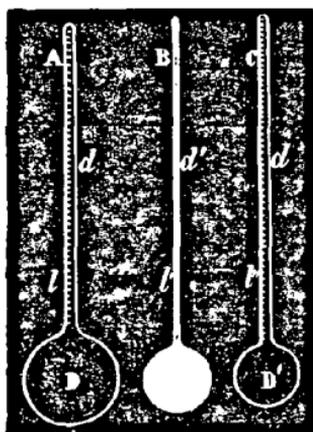


Fig. 828.

On a donc $\frac{l}{l''} = \frac{D^3}{D'^3}$; et $\frac{l''}{l'} = \frac{d'^2}{d^2}$;

multipliant membre à membre, il vient

$$\frac{l}{l'} = \frac{D^3 d'^2}{D'^3 d^2} = \frac{421875 \times 225}{238328 \times 625} = 0,638.$$

DILATATION DES SOLIDES (301, 305 et 306)

XLIX. — On a une barre de 3 mètres d'un métal qui a pour coefficient de dilatation $\frac{1}{754}$; une autre barre de 5 mètres, d'un autre métal, se dilate, pour un même nombre de degrés, autant que la première : en trouver le coefficient de dilatation.

Soit k le coefficient de dilatation de cette seconde barre, on a

$$5 \times k = 3 \times \frac{1}{754}, \text{ d'où } k = \frac{3}{3770}.$$

L. — On veut faire avec de l'acier et du laiton un pendule compensateur dont la longueur constante soit de 0^m,50. On sait que le coefficient de dilatation de l'acier employé à cet usage est de 0,000010788, et celui du laiton de 0,000018782. On demande quelle disposition on devra donner à ce pendule et les longueurs des barres d'acier et de laiton pour que la compensation ait lieu.

Pour satisfaire aux conditions de ce problème, il faut : 1° que la tige du pendule soit formée d'un système de barres de laiton et d'acier disposées de manière que leur dilatation se produise en sens contraires; 2° que les longueurs respectives du laiton et de l'acier soient en raison inverse de leurs coefficients de dilatation (308). On satisfait à ces conditions en disposant le pendule comme on l'a déjà vu (fig. 265).

En représentant par x la longueur totale des barres d'acier, et par y celle des barres de laiton, on a, d'après l'équation [1] du paragraphe 308, $x - y = 50$ [1].

De plus, les longueurs x et y devant être en raison inverse des coefficients, on a

$$\frac{x}{y} = \frac{18782}{10788} \quad [2].$$

Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = 1^m,1747$, et $y = 0^m,6747$.

LI. — Un aréomètre de Fahrenheit pèse 80^{gr}. Lorsqu'il est chargé de 45^{gr}, il affleure dans un liquide dont la température est de 20°, et dont la densité à la même température est 1,5. On demande le volume à 0° de la portion immergée de l'instrument.

Le poids du liquide déplacé est 125^{gr}, et son volume, à 20°, est $\frac{P}{D} = \frac{125}{1,5}$.

Tel est donc, à cette température, le volume de la portion immergée; d'où

le volume à 0° est (305) $\frac{125}{1,5} \times \frac{1}{1 + 0,00002584 \times 20} = 83^{\text{cc}},290$,

0,00002584 étant le coefficient de dilatation cubique du verre.

LII. — La dilatation du fer pour chaque degré d'élévation de température étant de 0,0000122 de la longueur mesurée à zéro, quelle sera, à 60 degrés, la surface d'un disque circulaire de tôle, qui, à zéro, a 2^m,75 de diamètre?

$$S = \pi R^2 (1 + \lambda t)^2 = 3,1416 \times (1^m,375)^2 (1 + 0,0000122 \times 60)^2 = 5^{\text{m}^2},94^{\text{d}^{\text{e}}}.$$

LIII. — Une règle de platine de 2 mètres de longueur est divisée, à l'une de ses extrémités, en quarts de millimètre: une règle de cuivre de 1^m,950 étant appliquée dessus, à zéro, en diffère de 0^m,050, c'est-à-dire de 200 divisions de la règle de platine. On demande quelle est la température commune aux deux règles lorsqu'elles diffèrent de 164 divisions de la règle de platine, le coefficient de dilatation du platine étant 0,000008842, et celui du cuivre, 0,000017182.

La longueur de la règle de platine, qui est de 8000 divisions à zéro, est, à t degrés

$$8000 (1 + 0,000008842 \times t) \quad (305).$$

La règle de cuivre, qui vaut 7800 divisions à zéro, vaut, à t degrés,

$$7800 (1 + 0,000017182 \times t).$$

Enfin les 164 divisions apparentes équivalent en réalité à

$$164 (1 + 0,000008842 \times t). \text{ On a donc}$$

$$8000 (1 + 0,000008842 \times t) - 7800 (1 + 0,000017182 \times t) = 164 (1 + 0,000008842 \times t),$$

$$\text{d'où l'on tire } t = \frac{36}{0,0647337} = 55^{\text{c}}.$$

LIV. — Le rapport entre le poids spécifique du cuivre à zéro et celui de l'eau à 4° est 8,88. Le coefficient de dilatation cubique du cuivre est $\frac{1}{58200}$, et la fraction qui représente la dilatation totale de l'eau, entre 4 et 15 degrés, est $\frac{1}{1360}$. Cela posé, on demande quel est, à 15 degrés, le rapport des poids spécifiques de ces deux corps.

L'eau pesant 1 à 4°, à 15° elle pèse $\frac{1}{1 + \frac{11}{1360}}$ (306, prob. V).

A zéro, le cuivre pèse 8,88; à 15°, il pèse $\frac{8,88}{1 + \frac{15}{58200}}$. Donc le poids spécifique du cuivre à 15° est $\frac{8,88}{1 + \frac{15}{58200}} : \frac{1}{1 + \frac{11}{1360}} = \frac{8,88 \times 58200}{58215} \times \frac{1371}{1360} = 8,94$.

LV. — De combien s'allongera, en passant de -15 à +30 degrés, un fil de fer de 170 kilomètres? Le coefficient de dilatation du fer est $\frac{1}{81900}$. — A1. = 93^m,4.

DILATATION DES LIQUIDES (312 à 319)

LVI. — Le poids spécifique du mercure étant 13,59 à zéro, on demande quel est, à 85°, le volume de 30 kilogrammes de ce métal. On prendra pour coefficient de dilatation du mercure $\frac{1}{5550}$.

Le volume à zéro est $\frac{P}{D} = \frac{30}{13,59}$; d'où le volume à 85° est $\frac{30}{13,59} \left(1 + \frac{1}{5550} \times 85 \right) = 2^{\text{m}}, 241$.

LVII. — Les hauteurs de deux baromètres A et B ont été observées, l'une à -10°, l'autre à +15°; on demande quelle correction il faut leur faire subir pour les ramener l'une et l'autre à ce qu'elles eussent été à la température de zéro, sachant que le coefficient de dilatation cubique du mercure est $\frac{1}{5550}$. On supposera A haut de 737 millimètres, et B de 763.

Cette question se résout au moyen de la formule $h = \frac{H}{1 + Dt}$ (317), en prenant t avec le signe + pour les températures au-dessus de zéro, et avec le signe - pour les températures au-dessous. De cette formule on tire, pour le baromètre A, $h = 737 \times \frac{5550}{5550 - 10} = 738^{\text{mm}}, 3$; et pour le baromètre B, $h = 763 \times \frac{5550}{5550 + 15} = 760^{\text{mm}}, 9$.

LVIII. — Dans un thermomètre à mercure, on sait que chaque division est $\frac{1}{6480}$ de la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation. Cela posé, si l'on

vide un semblable thermomètre et qu'on y introduise jusqu'au zéro, dans la glace fondante, un liquide dont le coefficient de dilatation absolue soit $\frac{1}{2000}$, on demande jusqu'à quelle division s'élèvera ce liquide à 20°, le coefficient de dilatation cubique du verre étant $\frac{1}{38700}$.

Le coefficient de dilatation apparente du mercure dans le verre est $\frac{1}{6480}$, et celui du liquide donné est $\frac{1}{2000} - \frac{1}{38700} = \frac{367}{774000}$. Or, la hauteur h et la hauteur 20 qu'atteignent respectivement ce liquide et le mercure dans la tige du thermomètre étant évidemment proportionnelles aux dilatations apparentes, on a

$$\frac{h}{20} = \frac{367}{774000} : \frac{1}{6480}, \text{ d'où } h = 61^{\circ},45.$$

LIX. — Une colonne d'eau de 1^m,55 de hauteur, et une colonne d'un autre liquide de 3^m,17 de hauteur, se font équilibre dans les branches d'un siphon, la température des deux liquides étant 4 degrés; on demande quelle est la densité du second liquide par rapport à l'eau, et quelle serait la hauteur à laquelle il s'élèverait si sa température était portée à 25 degrés, celle de l'eau restant 4°, et le coefficient de dilatation absolue du liquide étant $\frac{1}{6000}$.

1° Les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre étant en raison inverse des densités (91), on a 1^m,55 × 1 = 3^m,17 × d , d'où $d = 0,4889$, à 4°.

2° En représentant par h la hauteur du même liquide à 25 degrés, par d sa densité à 4 degrés, et par d' sa densité à 25 degrés, on a 3^m,17 × $d = h \times d'$ [1]; or

$$d' = \frac{d}{1 + \frac{1}{6000} \times 25} \quad (306, \text{ prob. V}). \text{ Portant cette valeur dans l'égalité [1], il vient}$$

$$3^{\text{m}},17 = \frac{h}{1 + \frac{25}{6000}}, \text{ d'où } h = 3^{\text{m}},183.$$

LX. — Un tube de verre cylindrique, fermé à la partie inférieure et lesté avec du mercure, s'enfonce des $\frac{3}{4}$ de sa longueur dans de l'eau à 4°; on demande de combien il plongerait dans de l'eau à 20°. On sait que de 4 à 20 degrés, l'eau se dilate de 0,00179 de son volume, et l'on néglige la dilatation du verre de 4 à 20 degrés.

La densité de l'eau à 4° étant 1, à 20° elle sera en raison inverse du volume qu'a pris l'eau, c'est-à-dire $\frac{1}{1,00179}$. Or, la portion immergée du tube étant en

$$\text{raison inverse de la densité, on a } \frac{x}{\frac{3}{4}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{1,00179}\right)}, \text{ d'où } x = 0,7513.$$

LXI. — Un tube capillaire étant divisé en 180 parties d'égale capacité, on trouve qu'une colonne de mercure occupant 25 de ces divisions pèse 1^r,2 à zéro. Cela posé, voulant faire de ce tube un thermomètre, on demande le rayon intérieur du réservoir sphérique qu'on doit lui souder pour que ses 180 divisions comprennent 150 degrés centigrades.

Puisque 25 divisions du tube contiennent $1^{\text{sr}},2$ de mercure, une seule division contient $\frac{1^{\text{sr}},2}{25}$, et les 180 divisions contiennent $\frac{1,2 \times 180}{25} = 8^{\text{sr}},64$. Ces 180 divisions devant comprendre 150 degrés, il s'ensuit que le poids de mercure correspondant à un seul degré est $\frac{8^{\text{sr}},64}{150}$. Mais la dilatation correspondante à un degré n'étant autre que la dilatation apparente du mercure dans le verre (312), le poids $\frac{8^{\text{sr}},64}{150}$ doit être $\frac{1}{6480}$ du poids du mercure contenu dans le réservoir, poids égal à $\frac{4\pi R^3 \times 13,596}{3}$, R étant le rayon du réservoir, et le poids spécifique du mercure étant 13,596; donc on a $\frac{4\pi R^3 \times 13,596}{3} \times \frac{1}{6480} = \frac{8,64}{150}$; d'où $R = 1^{\text{c}},85$.

DILATATION DES GAZ (321 à 329)

LXII. — On a renfermé un baromètre dans un large tube qu'on a ensuite fermé à la lampe. La température du tube, au moment de sa fermeture, est 13° , et la hauteur du baromètre, 76. On demande, à 0,001 près, à quelle hauteur s'éleva le mercure dans le baromètre quand la température de l'air dans le tube sera de 30° .

En ne tenant d'abord compte que de la dilatation du mercure dans le tube barométrique en passant de 13° à 30° , on a $h = \frac{76 \left(1 + \frac{30}{5550}\right)}{1 + \frac{13}{5550}} = \frac{76 \times 5580}{5563}$; mais

comme dans le tube fermé la force élastique de l'air augmente dans le rapport de $1 + 13\alpha$ à $1 + 30\alpha$, la hauteur barométrique doit augmenter dans le même rapport; donc enfin on a $h = \frac{76 \times 5580 (1 + 30\alpha)}{5563 (1 + 13\alpha)} = 80^{\text{r}},771$.

LXIII. — Un ballon de verre d'une capacité de 5 litres à 0° est rempli d'acide carbonique à 0° et à la pression 76. On chauffe à 100° après l'avoir ouvert pour permettre la sortie du gaz. La pression étant alors 75, on demande le poids de l'acide carbonique sorti du ballon.

Le coefficient de dilatation de l'acide carbonique est 0,00367; la dilatation cubique du verre $\frac{1}{38700}$; 1 litre d'air à 0° et à la pression 76 pèse $1^{\text{sr}},293$; et enfin la densité de l'acide carbonique est 1,5.

À 100° et à la pression 75, le volume de l'acide carbonique devient

$$\frac{5 (1 + 0,00367 \times 100) 76}{75} = 6^{\text{lit}},926.$$

À la même température, le volume du ballon est $5 \left(1 + \frac{100}{38700}\right) = 5^{\text{lit}},013$.

Donc le volume du gaz sorti est $6,926 - 5,013 = 1^{\text{lit}},913$.

Pour avoir le poids de ce gaz, sachant que les 5 litres d'acide carbonique à 0° et à 76 pèsent $1^{\text{sr}},293 \times 5 \times 1,5 = 9^{\text{sr}},697$, et que, par suite, les $6^{\text{lit}},926$ à 100° et à 75 pèsent autant, on posera la proportion $\frac{x}{9^{\text{sr}},697} = \frac{1^{\text{lit}},913}{6^{\text{lit}},926}$, d'où $x = 2^{\text{sr}},678$.

LXIV. — Une vessie à parois flexibles contient 4 litres d'air à 30° et à la pression 76. La pression atmosphérique restant la même, on demande ce que de-

viendra le volume d'air si l'on descend la vessie à une profondeur de 100 mètres dans un lac dont la température est de 4°.

Une colonne d'eau de 10^m,33, à 4°, représentant une atmosphère (144), on convertit 100 mètres d'eau en atmosphères en divisant 100 par 10^m,33, ce qui donne pour quotient 9^m,68. La vessie, au fond de l'eau, est donc soumise à une pression de 10^m,68. Le problème prend donc cette forme : on a 4 litres d'air à 30° et à 1^m. de pression, quel en sera le volume à 4° et 10^m,68 ?

$$\text{Donc (321, prob. III) } V = \frac{4(1 + 0,00367 \times 4)}{1 + 0,00367 \times 30} \times \frac{1}{10,68} = 0^{\text{m}},342.$$

LXV. — Dans un ballon de verre dont la capacité à 0° est 250 c. cubes, on introduit une certaine quantité d'air sec capable d'occuper 25 c. cubes à 0° et à la pression 76. Ayant fermé le ballon et chauffé à 100°, on demande la pression intérieure.

Le coefficient de dilatation de l'air étant 0,00367, et la dilatation cubique du verre $\frac{1}{38700}$, à 100° la capacité du ballon est $250 \left(1 + \frac{100}{38700}\right) = \frac{250 \times 388}{387}$.

À 100° et à la pression 76, le volume d'air libre serait $25(1 + 0,00367 \times 100) = 25 \times 1,367$; tandis que son volume réel est $\frac{250 \times 388}{387}$ à une pression inconnue

z. Or, au volume $25 \times 1,367$ correspond la pression 76 ;

au volume 1, la pression $76 \times 25 \times 1,367$;

et au volume $\frac{250 \times 388}{387}$, la pression $\frac{76 \times 25 \times 1,367 \times 387}{250 \times 388} = 10^{\text{m}},36$.

LXVI. — Un corps pesé dans l'air, à 0° et à la pression 76, perd 6^{sr},327 de son poids. On demande : 1° le volume du corps ; 2° sa perte de poids à 15° et à la

pression 1^m,25. — On sait que la densité de l'air par rapport à l'eau est $\frac{1}{770}$, que son coefficient de dilatation est 0,00367, et l'on néglige la dilatation du corps.

1° Un décimètre cube d'eau pesant 1000^{sr}, le même volume d'air, à 0° et à 76, pèse $\frac{1000}{770} = \frac{100}{77}$. Donc le volume d'air déplacé, et par suite le volume du corps,

est 6^{sr},327 : $\frac{100}{77} = \frac{6,327 \times 77}{100} = 4^{\text{de}} \text{ cub.}, 872$.

2° Pour avoir la perte de poids à 15° et à la pression 125°, il faut chercher le poids de 4^{lit},872 d'air à cette température et à cette pression. Or ce poids est $\frac{100}{77} \times \frac{4,872 \times 125}{(1 + 0,00367 \times 15) 76} = 9^{\text{sr}}, 86$. Telle est donc la perte de poids cherchée.

LXVII. — A quelle température un litre d'air sec pèse-t-il 1 gramme, sous la pression 0^m,77, le coefficient de dilatation de l'air étant 0,00367, et le poids d'un litre d'air sec, à 0° et à la pression 0^m,76, étant 1^{sr},293 ?

On a $\frac{1,293 \times 77}{(1 + 0,00367 \times t) 76} = 1^{\text{sr}}$, d'où $t = 84^{\circ}$.

LXVIII. — Quelle est, à 10°,8, la perte de poids, dans l'air, d'un corps dont le volume à cette température est 5182 m. cubes; et quelle serait, à 25°,13, la perte de poids du même corps, son coefficient de dilatation étant $\frac{1}{2400}$?

A 10°,8, la perte de poids est $\frac{1^{\text{sr}}, 293 \times 1000 \times 5182}{1 + 0,00367 \times 10,8} = 6445^{\text{k}}, 1$.

A 25^o,13, le volume du corps est $\frac{5182 \left(1 + \frac{3 \times 25,13}{2400}\right)}{1 + \frac{3 \times 10,8}{2400}}$, et, par suite, sa perte de poids est $\frac{16\text{r},293 \times 1000 \times 5182 \left(1 + \frac{3 \times 25,13}{2400}\right)}{(1 + 0,00367 \times 25,13) \left(1 + \frac{3 \times 10,8}{2400}\right)} = 6242\text{k},947$.

DENSITÉS DES GAZ (329 à 332)

LXIX. — Un ballon vide pèse 150^r,475; plein d'air, il pèse 160^r,158; plein d'un autre gaz, 162^r,235. 1^o La pression étant invariable, on demande la densité de ce gaz par rapport à l'air; 2^o quelle correction on aurait eu à faire si la pression avait été 0^m,75 pendant la pesée de l'air, et 0^m,77 pendant la pesée du gaz.

1^o Poids de l'air = 160^r,158 — 150^r,475 = 9^r,683; poids du gaz = 162^r,235 — 150,475 = 11^r,760; d'où la densité du gaz = $\frac{11,760}{9,683} = 1,2145$.

2^o La correction à faire est de ramener le poids de l'air et celui du gaz à la pression 0^m,76. Pour cela, le poids de l'air étant 9^r,683 à la pression 0^m,75, il est $\frac{9\text{r},683}{75}$ à la pression 1^o, et $\frac{9\text{r},683 \times 76}{75}$ à la pression 76. On trouvera de même

que le poids du gaz à la pression 76 est $\frac{11,760 \times 76}{77}$. Donc la densité cherchée est $\frac{11,760 \times 76}{77} : \frac{9,683 \times 76}{75} = \frac{11,760 \times 75}{9,683 \times 77} = 1,183$.

LXX. — Un ballon vide pèse 137^r,435; plein d'air, il pèse 145^r,237; plein d'un autre gaz, 152^r,118. On demande : 1^o la densité du gaz par rapport à l'air, lorsque la pression et la température sont restées invariables; 2^o la même densité dans le cas où la pression aurait été de 75 centimètres pendant la pesée de l'air, et de 77 centimètres pendant la pesée de l'autre gaz; 3^o quel genre de correction aurait-il fallu faire, si la température avait été de 8 degrés pendant la pesée de l'air, et de 11 degrés pendant celle du gaz?

1^o 145,237 — 137,435 = 7^r,802; 152,118 — 137,435 = 14^r,683; densité du gaz = $\frac{14,683}{7,802} = 1,8819$.

2^o Le poids de l'air à 75^o de pression étant 7^r,802, à la pression 76^o il est $\frac{7,802 \times 76}{75}$; celui du gaz, à la pression 76, est $\frac{14,683 \times 76}{77}$; donc la densité du

gaz, dans le second cas, est $\frac{14,683 \times 75}{7,802 \times 77} = 1,833$.

3^o Il faudrait ramener le poids des deux gaz à zéro, en multipliant le poids de l'air par 1 + 0,00367 × 8, et celui du gaz par 1 × 0,00367 × 11.

CHALEURS SPÉCIFIQUES (395 à 400)

LXXI. — Dans 25^k,45 d'eau à 12^o,5, on met 6^k,17 d'un corps à la température de 80 degrés; le mélange prend une température de 14^o,17; on demande quelle est la chaleur spécifique de ce corps.

En représentant par c la chaleur spécifique demandée, d'après la formule $mc(t' - t)$ (395), la chaleur perdue par le corps chaud est représentée par

6^k,17 (80 — 14,17) c, et celle absorbée par l'eau l'est par 25^k,45 (14,17 — 12,5); or ces deux quantités de chaleur étant nécessairement égales, on a

$$6^k,17(80-14,17)c = 25^k,45(14,17-12,5); \text{ d'où } c = 0,104.$$

LXXII. — La capacité de l'or pour la chaleur est 0,0298, celle de l'eau étant prise pour unité; on demande combien il faudra de ce métal à 45 degrés pour élever de 12°,3 à 15°,7 la température de 1^k,000^{cc},58 d'eau.

Soit x le poids cherché, en kilogrammes; d'après la formule $m(t' - t)c$, la chaleur cédée par l'or, en se refroidissant de 45 degrés à 15°,7, est $x(45 - 15,7) 0,0298$, et celle absorbée par l'eau, en s'échauffant de 12°,3 à 15°,7, est 1^k,000^{cc},58 (15,7 — 12,3). Or, la quantité de chaleur cédée par l'or étant nécessairement égale à celle qui est absorbée par l'eau, on a

$$x(45-15,7) 0,0298 = 1^k,00058(15,7-12,3), \text{ d'où } x = 3^k,896.$$

LXXIII. — On a une sphère de platine de 0^m,05 de rayon à 95 degrés, on la plonge dans 2 litres d'eau à 4 degrés; on demande la température de l'eau lorsque l'équilibre s'est établi. La capacité calorifique du platine est 0,0324; son coefficient de dilatation linéaire est 0,000008842, et sa densité 22,07.

Soient V' le volume de la sphère à 95 degrés, V le volume à zéro, et P son poids; on a $V' = V(1 + 3Kt)$, d'où $V = \frac{V'}{1 + 3Kt}$;

$$\text{Or } V' = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,141592 \times 125^{\text{cc.cub.}}}{3} = 523^{\text{cc.cub.}}, 598;$$

$$\text{d'où } V = \frac{523,598}{1 + 0,000008842 \times 3 \times 95} = 522^{\text{cc.cub.}}, 282, \text{ et } P = 11^k,526^{\text{gr.}}$$

Par conséquent, la masse de platine, en se refroidissant de 95 à x degrés, cède, d'après la formule $m(t' - t)c$, une quantité de chaleur égale à $11^k,526 \times (95 - x) \times 0,0324$, et les 2 litres d'eau, en s'échauffant de 4 à x degrés, absorbent $2 \times (x - 4)$.

On a donc $2(x - 4) = 11,526 \times 0,0324(95 - x)$; d'où $x = 18°,3$.

LXXIV. — Calculer la puissance calorifique du stère de bois qui pèse 400 kilogrammes, et qui se compose d'un mélange de bois de chêne et de bois de sapin, sachant que le chêne pèse 450 kilogrammes le mètre cube, et le sapin 325 kilogrammes; et que la quantité d'eau dont la température est élevée de 0 degré à 100 degrés par la combustion d'un mètre cube de bois, est de 12150^k pour le chêne, et de 8775^k pour le sapin.

Soient x le volume du chêne qui entre dans le stère, et y le volume du sapin, on a $x + y = 1$ [1].

Un mètre cube de chêne pesant 450^k, le volume x pèse 450 x ; de même le volume de sapin pèse 325 y ; on a donc $450x + 325y = 400$ [2].

... Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = \frac{3}{5}$, et $y = \frac{2}{5}$.

Or la puissance calorifique d'un mètre cube de chêne étant 12150, celle du volume x est $12150 \times \frac{3}{5}$, de même celle de y est $8775 \times \frac{2}{5}$; donc la puissance calorifique demandée est $\frac{12150 \times 3 + 8775 \times 2}{5} = 10800$.

LXXV. — La chaleur spécifique du sulfure de cuivre est 0,1212; celle du sulfure d'argent 0,0746. Un mélange de ces deux corps, porté à 40 degrés et plongé dans 6 kilogrammes d'eau à 7,67 degrés, en élève la température à 10 degrés. Combien ce mélange contient-il de chaque sulfure ?

$$0,1212 \times 30x + 0,0746 \times 30(5 - x) = 6(10 - 7,67), \text{ d'où } x = 2^k, \text{ et } 5 - x = 3^k.$$

CHALEURS LATENTES (403 à 407)

LXXVI. — Combien faut-il de kilogrammes de glace à zéro pour amener à 10 degrés centigrades l'eau contenue dans un bassin à bord circulaire et à fond horizontal, dont la circonférence supérieure est de 8^m,30, la circonférence inférieure de 6^m,15, et la hauteur de 1^m,76; ce bassin étant rempli d'eau à moitié de sa hauteur, et la température de l'eau étant de 30 degrés?

Solent R le rayon OB (fig. 829) de la base supérieure, r le rayon CD de la base inférieure, r' le rayon IE, et h la hauteur IC du liquide contenu dans le bassin.

$$\text{On a } R = \frac{8,30}{2\pi} = 1^m,3210, \quad r = \frac{6,15}{2\pi} = 0^m,9788, \quad IC = 0^m,88,$$

$$\text{et } r' = \frac{R+r}{2} = 1^m,1499,$$

Cela posé, le volume V du liquide étant celui d'un tronc de cône dont la hauteur est h, et dont les rayons des bases sont r et r', on a, d'après un théorème connu de géométrie,

$$V = \frac{\pi h}{3} (r'^2 + r^2 + rr') = 3^m, \text{cub.}, 138,605,$$

volume qui représente un poids d'eau de 3138^k,605^{gr}.

Soit actuellement x le poids de glace nécessaire pour refroidir cette masse d'eau de 30 à 10 degrés. Comme on a vu (404) qu'en se fondant, 1 kilogramme de glace absorbe 79 unités de chaleur, x kilogrammes de glace absorbent 79x, pour donner x kilogrammes d'eau à zéro.

Or, d'après les données de la question, cette dernière masse, devant elle-même être portée à 10 degrés, absorbe, en outre, une quantité de chaleur égale à 10x (395). D'un autre côté, la chaleur cédée par l'eau est égale à 3138^k,605 × (30—10), ou 62772,1. On a donc l'égalité

$$79x + 10x = 62772,1, \quad \text{d'où } x = 705^k,304.$$

LXXVII. — Chercher combien il faut de kilogrammes de vapeur d'eau pour porter un bain de 246 kilogrammes d'eau de 13 à 28 degrés, sachant que la chaleur latente de la vapeur d'eau est 540.

Soit x le poids de vapeur demandé; 1 kilogramme de vapeur qui se condense pour donner 1 kilogramme d'eau à 100 degrés, cédant 540 unités de chaleur, x kilogrammes de vapeur cèdent 540 × x; de plus, les x kilogrammes d'eau formés, se refroidissant ensuite de 100 degrés à 28, cèdent eux-mêmes un nombre d'unités représenté par (100—28) x. Or, les 246 kilogrammes d'eau qui constituent le bain dans lequel la vapeur se condense, s'échauffant alors de 13 à 28 degrés, absorbent une quantité de chaleur égale à 246 (28—13). On a donc l'équation

$$540x + (100—28)x = 246(28—13), \quad \text{d'où } x = 6^k,029^g.$$

LXXVIII. — Une cuve cylindrique, à fond plat et horizontal, a 1^m,30 de diamètre et 0^m,75 de hauteur intérieurement; elle est à moitié pleine d'eau à 4 degrés, et l'on chauffe ce liquide en y faisant arriver de la vapeur à 100 degrés fournie par 5^k,250 d'eau. On demande quelle sera la température du bain ainsi chauffé et quel en sera le volume. On négligera la température du vase, et on prendra pour coefficient de dilatation de l'eau $\frac{1}{2200}$

$$\text{Le volume de l'eau} = \pi R^2 \times \frac{H}{2} = 3,1416 \times (0^m,65)^2 \times \frac{0^m,75}{2} = 497^m,747.$$

θ étant la température finale, et 540 la chaleur de vaporisation de l'eau, on a donc (407, prob. V),

$$5^k,250 \times 540 + 5,250(100 - \theta) = 497,747(\theta - 4); \text{ d'où } \theta = 10^o,6.$$

Le volume total d'eau après la condensation est, à 4 degrés,

$$497^{\text{lit}},747 + 5^{\text{lit}},250 = 502^{\text{lit}},997.$$

Donc, à 10°6, c'est-à-dire lorsque la température s'élève de 6°6, le volume devient

$$502^{\text{lit}},997 \left(1 + \frac{6^o,6}{2200} \right) = 504^{\text{lit}},509.$$

LXXXIX. — La chaleur latente de la vapeur d'eau étant supposée égale à 540, on demande à quelle température on élèvera 20 litres d'eau à 4 degrés, en y condensant 1 kilogramme de vapeur à 100 degrés et à la pression 0^m,76.

Soit θ la température finale, la chaleur cédée par 1 kilogramme de vapeur sera 540, et celle cédée par l'eau, résultant de la condensation, sera 100— θ ; on aura donc $540 + 100 - \theta = 20(\theta - 4)$, d'où $\theta = 34^o,28$.

LXXX. — Combien faut-il de kilogr. de glace à zéro pour liquéfier et ramener à zéro 25 kilogr. de vapeur, dégagés d'un appareil où le thermomètre marque 100°, le baromètre marquant 0^m,76? La chaleur de fusion de la glace est 79.

$$\text{On a } 79x = 25 \times 540 + 25 \times 100, \text{ d'où } x = 202^k,532^g.$$

LXXXI. — 11 kilogr. de glace à zéro ont été mélangés avec P kilogr. d'eau à 45°; le mélange a pris la température de 12°; on demande le poids P.

$$\text{On a } P(45 - 12) = 79 \times 11 + 12 \times 11, \text{ d'où } P = 30^k,333^g.$$

LXXXII. — Dans quelles proportions faut-il partager 1 kilogramme d'eau à 50 degrés pour que la chaleur que l'une de ses parties abandonnerait en passant à l'état de glace à zéro fût suffisante pour transformer l'autre en vapeur à 100 degrés, à la pression 760^{mm}? — Chaleur de fusion de la glace 79,25, et chaleur de vaporisation de l'eau 535. On a

$$50x + 79,25x = (1 - x)50 + (1 - x)535; \text{ d'où } x = 0^k,819^g, \text{ et } 1 - x = 0^k,181^g.$$

LXXXIII. — On sait (340) que, dans des conditions convenablement choisies, un corps peut rester liquide à des températures inférieures à celle de sa solidification normale. Cela posé, on demande de combien de degrés au-dessous du point de sa fusion il faut refroidir du phosphore liquide pour que, par sa solidification brusque et complète, il remonte au point de fusion. — Chaleur de fusion du phosphore 5,4; chaleur spécifique dans le voisinage du point de fusion 0,20.

$$\text{On a } 5,4 = t \times 0,2, \text{ d'où } t = 27^o.$$

LXXXIV. — On a abaissé du phosphore liquide jusqu'à 30 degrés; à ce moment on y détermine un commencement de solidification. On demande si la solidification sera complète, et, si elle ne l'est pas, quelle sera la portion du poids total qui se solidifiera? — Le phosphore fond à 44°2, sa chaleur de fusion est 5,4, et sa chaleur spécifique, à l'état solide ou liquide, dans le voisinage de la fusion, est 0,2.

$$\text{On a } (44,2 - 30) \times 0,2 = 5,4x, \text{ d'où } x = 0,525.$$

VAPEURS (375, 376 et 392)

LXXXV. — Dans un vase vide, d'une capacité de 2^{lit},02, on a introduit d'abord 1 litre d'air sec sous la pression 0^m,76, puis de l'eau en quantité telle, qu'il en reste définitivement 20 centimètres cubes à l'état liquide. On demande la pression intérieure, en supposant que la température soit de 30° au moment de l'expérience, et que la tension maximum de la vapeur d'eau, à cette température, soit de 0^m,031.

La capacité du ballon étant réduite des 20 centimètres d'eau qui y restent

à l'état liquide, elle n'est en réalité que $2^{\text{lit}},02$, moins $0^{\text{lit}},020$ ou 2 litres. Le volume d'air se trouve donc doublé, et, par conséquent, sa tension, qui était $0^{\text{m}},76$, n'est plus que $0^{\text{m}},38$. Ajoutant à cette pression celle de la vapeur, qui est $0^{\text{m}},031$, on a pour la pression intérieure totale $0^{\text{m}},411$.

LXXXVI. — Une certaine quantité d'air pèse $5^{\text{gr}},2$, à la température de 0 degré et sous la pression $0^{\text{m}},76$. On la chauffe à 30° sous la pression $0^{\text{m}},77$, en lui permettant de se saturer de vapeur d'eau. On demande quel sera alors le volume qu'elle occupera. La tension maximum de la vapeur à 30 degrés est de $0^{\text{m}},0315$, et on prendra $1^{\text{gr}},3$ pour poids du litre d'air sec à la température de 0° et sous la pression $0^{\text{m}},76$.

Le poids d'un litre d'air sec étant $1^{\text{gr}},3$, le volume correspondant à $5^{\text{gr}},2$ égale $\frac{5,2}{1,3} = 4$ litres, à 0 degré et à la pression $0^{\text{m}},76$. A 30° il est $4(1 + 0,00367 \times 30)$;

lequel, à la pression $0^{\text{m}},77$, devient $\frac{4 \times (1 + 0,00367 \times 30) 76}{77}$, l'air étant sec.

Mais lorsque l'air est saturé de vapeur dont la tension est $0^{\text{m}},0315$, c'est cette tension, plus la force élastique de l'air, qui, d'après la deuxième loi des mélanges des gaz et des vapeurs (375), font équilibre à la pression $0^{\text{m}},77$; donc la pression de l'air est $0^{\text{m}},77 - 0^{\text{m}},0315$, et, par conséquent, le volume demandé est

$$\frac{4 \times (1 + 0,00367 \times 30) 76}{77 - 3,15} = 4^{\text{lit}},56.$$

LXXXVII. — Le poids d'un litre d'air, à zéro et à la pression $0^{\text{m}},76$, est $1^{\text{gr}},293$, et la densité de la vapeur d'eau prise par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$. Cela posé, on demande quel est, à 30 degrés et à la pression $0,77$, le poids d'un mètre cube d'air dont l'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$, la tension maximum de la vapeur à 30 degrés étant $0^{\text{m}},0315$.

Commençons par observer que la tension de la vapeur saturée étant $0^{\text{m}},0315$, cette tension n'est plus que les $\frac{3}{4}$ de $0^{\text{m}},0315$ lorsque la vapeur est à l'état hygrométrique $\frac{3}{4}$. De plus, l'air dont on demande le poids n'est pas, d'après la loi des mélanges (375), à la pression 77 , mais à cette pression moins celle de la vapeur, c'est-à-dire à la pression $(0^{\text{m}},77 - \frac{3}{4} \cdot 0^{\text{m}},0315)$.

Le problème revient donc à chercher d'abord le poids d'un mètre cube d'air sec à 30° et à la pression $(0^{\text{m}},77 - \frac{3}{4} \cdot 0^{\text{m}},0315)$, puis celui d'un mètre cube de vapeur à 30° et à la tension $\frac{3}{4} \cdot 0^{\text{m}},0315$, puis à faire la somme des deux poids.

1° A 30° et à la pression $0^{\text{m}},77 - \frac{3}{4} \cdot 0^{\text{m}},0315 = 0^{\text{m}},7464$, 1 mètre cube d'air sec pèse

$$\frac{1293^{\text{gr}} \times 74,64}{(1 + 30\alpha) 76} [1];$$

2° A 30° et à la pression $\frac{3}{4} \cdot 0^{\text{m}},0315$, 1 mètre cube de vapeur pèse

$$\frac{1293^{\text{gr}} \times 3^{\text{c}},15 \times 5 \times 3}{(1 + 30\alpha) 76 \times 8 \times 4} [2].$$

Faisant la somme des formules [1] et [2], on a, pour le poids demandé

$$\frac{1293^{\text{gr}}}{(1 + 30\alpha) 76} \left[74^{\text{c}},64 + \frac{3^{\text{c}},15 \times 5 \times 3}{8 \times 4} \right] = 1166^{\text{gr}},6.$$

LXXXVIII. — On a 3 litres d'air à 30° et à la pression 76, dont l'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$. On demande ce que deviendra ce volume d'air, à la même température et à la même pression, si on l'agite avec de l'acide sulfurique concentré, et quel sera l'accroissement de poids que prendra l'acide.

La tension maximum de la vapeur à 30° est 0^m,0315, et la densité de la vapeur par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$.

La tension maximum étant 3^e,15, à l'état hygrométrique $\frac{3}{4}$ elle est $\frac{3}{4}$ de 3^e,15 = 2^e,36. D'où les 3 litres d'air humide sont à la pression 76 — 2,36 = 73,64. Il s'agit donc de chercher ce que deviennent ces 3 litres en passant de la pression 73,64 à la pression 76, ce qui donne pour le volume cherché $\frac{3 \times 73,64}{76} = 2^{\text{lit}},906$.

Quant au poids des 3 litres de vapeur à 30° et à la pression 2,36, il est

$$\frac{1^{\text{er}}.293 \times 2,36 \times 5 \times 3}{(1 + 0,00367 \times 30) 76 \times 8} = 0^{\text{gr}},067.$$

C'est donc là l'accroissement de poids que prendra l'acide sulfurique.

LXXXIX. — Étant donnés 6^{lit},85 d'air saturé de vapeur d'eau à 11° et sous la pression 0^m,768, on demande quel sera le volume de cet air desséché à la température de 15 degrés et à la pression 0^m,750. — On sait qu'à 11 degrés la tension de la vapeur à l'état de saturation est 0^m,010074.

La pression primitive du gaz est 768 — 10,074 = 757,926. Donc son volume à

la pression 750 et à 11° est $\frac{6^{\text{lit}},85 \times 757,926}{750}$; d'où, à zéro et à la pression 750,

son volume est $\frac{6^{\text{lit}},85 \times 757,926}{(1 + 0,00367 \times 11) 750}$. Donc, enfin, à 15° et à la pression 750,

le volume est $\frac{6^{\text{lit}},85 (1 + 0,00367 \times 15) 757,926}{(1 + 0,00367 \times 11) 750} = 7^{\text{lit}},02$.

XC. — Dans un tube en U contenant de la ponce sulfurique, on fait passer 1 mètre cube d'air à la température de 15 degrés. Le tube en U, pesé avant et après l'expérience, accuse, après le passage de l'air, un excès de poids de 3^{er},95; on demande l'état hygrométrique de l'air. — On sait que la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$, et que la tension maximum à 15 degrés est 12^{mill},69.

Le poids d'un mètre cube d'air, à zéro et à la pression 760^{mill}, étant 1293^{er}, à

15° et à la pression 12^{mill},69, son poids est $\frac{1293^{\text{er}} \times 12,69}{(1 + 15\alpha) 760}$; donc le poids d'un

mètre cube de vapeur saturée, à 15 degrés, est $\frac{1293^{\text{er}} \times 12,69 \times 5}{(1 + 15\alpha) 760 \times 8} = 12^{\text{er}},78$.

Mais le poids de la vapeur contenue dans l'air n'est que de 3^{er},95; donc, en représentant par E l'état hygrométrique cherché, on a (383) E = $\frac{3,95}{12,78} = 0,309$.

XCI. — Une marmite de Papin contient 3^k,25 d'eau à 142 degrés. En ouvrant la soupape, une portion de l'eau se vaporise, et l'autre se refroidit à 100 degrés. On demande le poids de vapeur produit, la chaleur de vaporisation étant 540.

Soit x le poids de la vapeur. La chaleur passée à l'état latent sera 540x; et celle perdue par le refroidissement de 3^k,25 d'eau de 142° à 100° sera 3^k,25 × 42. Donc on a 540x = 3^k,25 × 42, d'où x = 0^k,253^{er}.

XCH. — Calculer le volume d'air qui, à l'état hygrométrique 0,70, contient 600 grammes de vapeur à 30 degrés, la tension maximum à 30 degrés étant 31^{mm},548, et la densité de la vapeur $\frac{5}{8}$.

Soit x le volume cherché, lequel est le même pour l'air et pour la vapeur. On sait que le poids d'un litre de vapeur à 30° et à l'état hygrométrique 0,7, est $1\text{r},293 \times 31,548 \times 0,7 \times 5$ (392, probl. II). Or autant de fois le poids 600 grammes contiendra le poids d'un litre, autant le volume demandé contiendra de litres.

$$\text{Donc } x = 600 : \frac{1\text{r},293 \times 31,548 \times 0,7 \times 5}{(1 + 0,00367 \times 30) 760 \times 8} = \frac{600(1 + 0,00367 \times 30) 760 \times 8}{1,293 \times 31,548 \times 0,7 \times 5} = 28364 \text{ litres.}$$

XCHH. — On demande, à zéro degré et sous la pression 0^m,760, le poids d'un volume d'air sec, sachant que ce volume saturé, à 18 degrés et à la pression 0^m,78, pèse 16^{sr},25. — La force élastique de la vapeur d'eau à 18 degrés est 0^m,01535, et sa densité égale $\frac{5}{8}$ de celle de l'air.

Pour avoir le volume d'air qui, à l'état de saturation, à 18 degrés et à la pression 780, pèse 16^{sr},25, cherchons le poids d'un litre d'air saturé dans les mêmes conditions. Ce poids, qui se compose du poids d'un litre d'air sec, plus du poids d'un litre de vapeur, est

$$1\text{r},293 \frac{(780 - 15,35)}{(1 + 0,00367 \times 18) 760} + \frac{1\text{r},293 \times 15,35 \times 5}{(1 + 0,00367 \times 18) 760 \times 8} \quad (376, \text{prob. III}).$$

Réduisant au même dénominateur et simplifiant, on trouve, pour poids d'un litre d'air saturé à 18° et à 780^{mm}. de pression, $\frac{1\text{r},293(780 \times 8 - 15,35 \times 3)}{(1 + 0,00367 \times 18) 760 \times 8}$.

Divisant le poids donné 16^{sr},25 par le poids d'un litre, on a pour le volume cherché

$$\frac{16\text{sr},25(1 + 0,00367 \times 18) 760 \times 8}{1\text{r},293(780 \times 8 - 15,35 \times 3)}$$

Or c'est ce volume dont on demande le poids à zéro et à 760, quand il ne contient que de l'air sec. On aura donc le poids demandé en multipliant ce volume par 1^{sr},293, ce qui se obtient en supprimant ce facteur dans le dénominateur; donc on a pour solution $\frac{16\text{sr},25(1 + 0,00367 \times 18) 760 \times 8}{780 \times 8 - 15,35 \times 3} = 17\text{sr}.$

XCV. — La densité de l'éther liquide à zéro est 0,75; celle de l'éther gazeux rapporté à l'air 2,5. On demande l'épaisseur que doit avoir, à zéro, une couche cylindrique d'éther pour que, transformée en vapeur à 38 degrés, dans un tube de même section et de 1 mètre de long, elle donne une vapeur à la tension de 0^m,70. — Le poids du litre d'air sec est 1^{sr},293, et le coefficient de dilatation des gaz 0,00367; l'éther entre en ébullition à 36 degrés, à la pression 0^m,76.

Solent 100^{cc}. la section du tube, et x l'épaisseur de la couche d'éther liquide; son poids, en grammes, est $100 \times x \times 0,75$. Quant à la vapeur, son volume, en litres, est 10, et son poids est $\frac{1\text{r},293 \times 10 \times 2,5 \times 70}{(1 + 0,00367 \times 38) 76}$. Égalant ce poids au premier poids $100x \times 0,75$, et résolvant, on trouve $x = 3\text{mm},5$.

XCV. — On a refroidi, de 30 à 10 degrés, un volume d'air de 500 litres, saturé d'humidité à la pression 760^{mm}. Quel est le poids de la vapeur condensée, et quel est le volume de l'air refroidi à 10 degrés, à la même pression. — Densité de la vapeur d'eau $\frac{5}{8}$; tension maximum, à 30 degrés 30^{mm},3, à 10 degrés

9^{mm},43; poids d'un litre d'air sec 1^{sr},293; coefficient de dilatation des gaz $\frac{1}{273}$.

Poids de la vapeur condensée 10^{sr},1; volume de l'air refroidi 454 litres.

OPTIQUE

XCVI. — Voulant comparer l'intensité d'une lampe Carcel à celle d'une bougie, au moyen du photomètre de Rumford (fig. 374, page 445), on trouve que les ombres portées sur l'écran paraissent de même intensité, lorsque, la bougie étant à 2 mètres de l'écran, la lampe en est à 4^m,74. Quelle est l'intensité de la lampe, celle de la bougie étant prise pour unité ?

Soit i l'intensité de la lampe à l'unité de distance, à la distance de 4^m,74 elle sera $\frac{i}{(4,74)^2}$ (487); de même, celle de la bougie, qui est 1 à l'unité de distance, sera $\frac{1}{4}$ à la distance de 2 mètres. Mais, à ces distances, les deux intensités sont égales; on a donc $\frac{i}{(4,74)^2} = \frac{1}{4}$, d'où $i = \frac{(4,74)^2}{4} = 5,617$.

XCVII. — Une lampe et une bougie sont distantes l'une de l'autre de 3^m,15, et l'intensité de la lumière de la bougie étant 1, à l'unité de distance, celle de la lampe est 5,6; à quelle distance de la lampe, sur la ligne droite qui joint les deux lumières, doit-on placer un écran, pour qu'il soit également éclairé par l'une et par l'autre, sachant que l'intensité d'une lumière est en raison inverse du carré de la distance ?

Soit x la distance à laquelle l'écran doit être placé de la lampe; sa distance à la bougie sera 3^m,15 — x . L'intensité de la lampe, qui est 5,6 à l'unité de distance, est $\frac{5,6}{x^2}$ à la distance x ; et celle de la bougie étant 1 à l'unité de distance, est $\frac{1}{(3,15-x)^2}$ à la distance 3^m,15 — x . Mais alors les intensités sont égales; donc $\frac{5,6}{x^2} = \frac{1}{(3,15-x)^2}$, ou $\left(\frac{3,15-x}{x}\right)^2 = \frac{1}{5,6} = \frac{10}{56} = \frac{5}{28}$.

En extrayant la racine, $\frac{3,15-x}{x} = \pm \sqrt{\frac{5}{28}} = \pm 0,422$; d'où l'on déduit les deux valeurs $x' = 2^m,21$, et $x'' = 5^m,45$. La première correspond à un point situé entre les deux lumières; la seconde donne un point situé sur le prolongement de la droite qui les joint.

XCVIII. — Devant un miroir sphérique concave de 0^m,95 de rayon, on place, à la distance de 3^m,40, un objet BD (fig. 397, page 465) dont la hauteur est de 0^m,12; on demande la distance de l'image au miroir et sa grandeur.

Ce problème se résout par la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$, donnée en optique (509), dans laquelle p représente la distance de l'objet au miroir, p' la distance de l'image, et R le rayon de courbure du miroir. D'après l'énoncé, on a, en centimètres, $p = 340$, et $R = 95$; substituant dans l'équation ci-dessus, il vient

$$\frac{1}{340} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{95}; \text{ d'où } p' = 55^c,2.$$

Pour calculer la grandeur ab de l'image, il faut se rappeler ce qui a été dit au paragraphe 511, dans lequel on a vu que les triangles BDC et Cdb (fig. 397) étant semblables, on a $\frac{bd}{BD} = \frac{Co}{CK}$, d'où $bd = \frac{BD \times Co}{CK}$. Or, par hypothèse,

$$BD = 12, \quad CK = p - R = 3^m,4 - 0^m,95 = 2^m,45;$$

et d'après la valeur de p' , on a $Co = CA - Ao = 95^c - 55^c,2 = 39^c,8$; donc

$$bd = \frac{12 \times 39,8}{245} = 1^c,95.$$

XCIX. — Quelle est la hauteur *minima* que doit avoir un miroir plan, placé verticalement, pour qu'une personne se tenant debout devant ce miroir s'y voie par réflexion de la tête aux pieds? Établir la position du miroir.

Soient A le sommet de la tête, B les pieds, O l'œil, et mm' le plan du miroir (fig. 830). On sait que

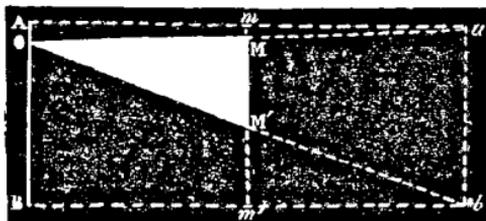


Fig. 830.

les images des points A et B se font aux points a et b , qui leur sont symétriques (494), et que par suite l'image ab est de même grandeur que l'objet, et la distance ma égale à mA . Or l'œil voyant l'image ab sous l'angle aOb , il suffit que la hauteur du miroir soit égale à la portion de la droite mm' comprise dans cet angle, c'est-à-dire à MM' ; mais, dans le triangle Oab , OM étant la moitié de Oa , $MM' = \frac{ab}{2} = \frac{AB}{2}$; donc la hauteur du miroir doit être au moins la moitié de celle de l'objet.

Quant à la position du miroir, elle est déterminée par les points où les droites Oa et Ob rencontrent le plan mm' . Le triangle ObB fait voir que Bm' étant la moitié de Bb , $m'M'$ est la moitié de BO ; c'est-à-dire que le miroir doit être placé, au-dessus du plan horizontal sur lequel posent les pieds de l'observateur, à une distance égale à la demi-hauteur de l'œil au-dessus du même plan. Dans toute autre position, plus haute ou plus basse, les points A et B ne se trouveraient pas simultanément dans le champ du miroir.

C. — Sur un miroir plan, tournant autour d'un axe vertical, tombe un rayon de lumière horizontale fixe; lorsque le miroir tourne d'un certain angle α , de quel angle tourne, dans le même temps, le rayon réfléchi?

Soient mn la première position du miroir, $m'n'$ la deuxième quand il a tourné d'un angle α , et OD le rayon incident fixe (fig. 831). Si du centre de rotation C, avec un rayon arbitraire, on décrit une circonférence Omn , et que du point O, où elle coupe le rayon incident, on abaisse les cordes OO' et OO'' perpendiculaires sur mn et sur $m'n'$; les points O' et O'' étant les images du point O dans les deux positions du miroir, l'arc $O'O''$ mesure la déviation angulaire de l'image, et, par suite, du rayon réfléchi, tandis que l'arc mm' mesure celle du miroir. Or, les deux angles $O'OO''$ et mCm' sont égaux comme ayant les côtés perpendiculaires chacun à chacun; mais l'angle $O'O''$, qui est inscrit, a pour mesure la moitié de l'arc $O'O''$, et l'angle mCm' , qui est un angle au centre, tout l'arc mm' . Donc $O'O''$ est double de mm' ; ce qui fait voir que le miroir ayant tourné d'un angle α , le rayon réfléchi a tourné de 2α .

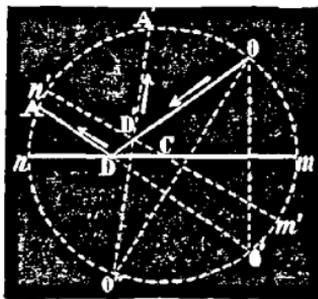


Fig. 831.

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE PREMIER

MATIÈRE, FORCES ET MOUVEMENT

<i>Notions générales.</i>	1	Équilibre	13
Objet de la physique.	1	Caractères, unité et représentation	
Matière, corps, atomes, molécules.	1	des forces.	13
Masse, trois états des corps	2	Résultantes et composantes	14
Phénomènes physiques.	3	Composition et décomp. des forces.	14
Lois et théories physiques.	3	<i>Notions sur les mouvements.</i>	16
Agents physiques, éther, théorie		Mouvement uniforme.	16
dynamique.	3	Vitesse et loi de ce mouvement.	17
Division de la physique.	4	Mouvement varié.	17
<i>Propriétés générales.</i>	4	Vitesse et lois du mouvement uni-	
Étendue, vernier.	5	formément accéléré.	17
Vis micrométrique, cathéromètre.	6	Proportionnalité des forces aux	
Divisibilité, porosité.	8	accélération.	18
Volume réel et volume apparent.	9	Quantité de mouvement.	18
Compressibilité, élasticité.	10	Forcée vive, travail mécanique.	19
Mobilité, mouvement, repos.	11	Relation entre le travail méca-	
Inertie, applications.	12	nique et la force vive.	19
<i>Forces.</i>	12	Principe général des forces vives.	20

LIVRE II

PESANTEUR, ATTRACTION UNIVERSELLE, FORCES MOLÉCULAIRES

Attraction universelle, ses lois.	21	Machine d'Atwood.	41
Pesanteur, verticale, horizontale.	22	Machine de Morin	45
Fil à plomb.	23	Formules sur la chute des corps.	47
<i>Densités et poids.</i>	24	Causes qui modifient la pesanteur.	48
Poids absolu, poids relatif.	24	Mesure de la pesanteur.	49
Centre de gravité, sa détermination.	25	<i>Pendule.</i>	50
Équilibre des corps pesants.	27	Lois des oscillations du pendule.	51
Divers états d'équilibre.	28	Longueur du pendule composé.	53
Leviers.	29	Vérification des lois du pendule.	54
Balances.	30	Usages du pendule.	55
Conditions de précision.	31	Problèmes sur la pesanteur.	56
Conditions de sensibilité.	33	<i>* Propriétés particulières.</i>	57
Balances de précision.	35	Élasticité de traction.	57
Méthode des doubles pesées.	38	Id. de torsion et de flexion.	58
<i>Lois de la chute des corps.</i>	38	Ténacité, adhésion.	59
Plan incliné.	40	Ductilité, dureté, trempé.	60

LIVRE III

DES LIQUIDES

<i>Hydrostatique.</i>	61	Principe d'égalité de pression.	64
Caractères généraux des liquides.	61	<i>Pression dans les liquides.</i>	66
Compressibilité des liquides.	61	Pression de haut en bas, ses lois.	66

Poussée de bas en haut.	66	Méthode de l'aréomèt. de Nicholson.	88
La pression est indépendante de la forme des vases.	67	Méthode du facon.	90
Appareil de de Haldat.	68	Cas des corps solubles dans l'eau.	91
Appareil de Masson.	69	Table des poids spécif. des solides.	91
Pression sur les parois latérales.	69	Poids spécifiques des liquides.	91
Tourniquet hydraulique.	70	Méthode de la balance hydrostatiq.	91
Paradoxe hydrostatique.	71	Mét. de l'aréomètre de Fahrenheit.	91
<i>Conditions d'équilibre des liquides.</i>	72	Méthode du facon.	92
Équilibre dans un seul vase.	72	Table des poids spécif. des liquides.	93
Id. dans les vases communiquants.	73	Usage des poids spécifiques.	93
Équilibre des liquides superposés.	74	<i>Aréomètres à volume variable.</i>	93
Équilibre de deux liquides hétérog.	74	Aréomètre de Baumé.	93
<i>Applications</i>	76	Alcomètre de Gay-Lussac.	95
Presse hydraulique.	76	Pèse-sels	96
Niveau d'eau.	78	Densimètres.	97
Niveau à bulle d'air.	79	* <i>Capillarité.</i>	97
Cours d'eau, puits artésiens.	80	Ses lois dans les tubes.	98
<i>Corps plongés dans les liquides.</i>	81	Ses lois entre deux lames.	99
Pression qu'ils supportent.	81	Attractions et répulsions dues à la capillarité	99
Principe d'Archimède.	82	Cause de la courbure des surfaces.	100
Détermination des volumes.	83	Influence de cette courbure.	100
Équilibre des corps plongés et des corps flottants, métacentre	84	Effets divers de la capillarité.	101
Ludion	85	* <i>Diffusion, osmose, absorption et dialyse des liquides.</i>	102
Vessie natatoire, natation.	86	Diffusion des liquides, ses lois	102
<i>Poids spécifiques des solides.</i>	87	Osmose, endosmose et exosmose.	103
Températures adoptées.	87	Absorption et imbibition.	104
Méthode de la balance hydrostatiq.	88	Absorp. dans les plantes et les ani.	104
		Dialyse	106

LIVRE IV

DES GAZ

<i>Propriétés des gaz.</i>	106	Baromètre fixe de Regnault.	119
Caractères physiques des gaz.	106	Baromètre de Gay-Lussac.	119
Théorie dynamique des gaz.	106	Conditions auxquelles doit satis- faire un baromètre.	121
Force expansive et poids des gaz.	107	Correction relative à la capillarité.	122
Densité de l'air par rapport à l'eau.	108	Correction relative à la températ.	123
Pressions exercées par les gaz.	108	Variations de la hauteur baromét.	124
Principe de Pascal et principe d'Ar- chimède applicables aux gaz.	109	Leurs causes	125
Transvasement des gaz.	109	Relations entre les variations ba- rométriques et l'état du ciel.	126
Atmosphère, sa composition.	110	Baromètre à cadran	127
Pression et hauteur de l'atmosph.	110	Mesure des hauteurs par le baromét.	127
Crève-vessie, hémisphères de Mag- debourg.	111	<i>Mesure de la force élastique des gaz.</i>	128
<i>Baromètres</i>	112	Loi de Mariotte.	128
Expérience de Torricelli	112	Expérience de Dulong et Arago.	131
Expériences de Pascal.	113	Conséquences de la loi de Mariotte.	134
Valeur de la pression atmosphériq.	114	Problèmes sur la loi de Mariotte.	134
Baromètre à envette.	115	Manomètres.	135
Baromètre de Fortin.	116	Manomètre à air libre.	135

Manomètre à air comprimé.	135	<i>Appareils fondés sur les propriétés de l'air.</i>	154
Manomètre baromét. de Regnault.	138	Machine pneumatique.	154
Manomètre de Bourdon.	138	Éprouvette de la machine pneumat.	159
<i>Diffusion, osmose et absorption des gaz.</i>	139	Robinet à double épulsement.	159
Diffusion ou mélange des gaz.	139	Machine pneumat. de Ducrétet	161
* Effusion, transpiration et osmose.	141	Usages de la machine pneumatique.	162
* Absorption des gaz par les solides.	142	Problèmes sur la machine pneumat.	163
* Perméabilité et pouvoir absorbant des métaux à une haute température.	143	* Machine pneumat. à double effet.	165
* Occlusion.	143	* Machine pneumat. à mercure.	165
Absorption des gaz par les liquides.	143	Machine de compression.	167
Coefficient d'absorption.	144	Pompe de compression.	169
Problème sur les mélanges des gaz et des liquides.	145	* Fontaine de Héron.	170
Équilibre des fluides.	145	* Fontaine intermittente.	171
<i>Corps plongés dans l'air.</i>	146	* Siphon.	172
Principe d'Archimède app. aux gaz.	146	* Siphon à écoulement constant.	174
Baroscope.	146	* Siphon intermittent.	174
Correction des pesées dans l'air.	147	<i>Pompes.</i>	175
Aérostats.	148	Pompe aspirante.	175
Parachute.	153	Pompe foulante.	177
Poids qui peut enlever un ballon.	153	Pompe aspirante et foulante.	178
		Pompe à incendie.	178
		Charge que porte le piston.	179
		* Flacon de Mariotte.	179

LIVRE V

ACOUSTIQUE

Objet de l'acoustique.	181	* Composition de deux mouvements vibratoires parallèles	201
Son et bruit, cause du son	181	* Id. de deux mouvements rectang.	202
Sonnerie dans le vide.	182	* Flammes manométriq. de Kœnig.	204
Mode de propagation du son.	183	<i>Théorie physique de la musique.</i>	206
Causes qui font varier l'intensité.	185	Qualités du son musical.	206
Influence des tuyaux sur l'intensité.	186	Hauteur, intensité, timbre.	206
Vitesse du son dans les gaz.	186	Unisson, battements.	207
Formule de Newton.	188	Accords, intervalles.	207
* Expérience de M. Regnault sur la propagation des ondes.	189	Harmoniques.	208
Vitesse du son dans les liquides et dans les solides	189	Échelle musicale, gamme.	208
Réflexion du son.	190	Valens des intervalles.	209
Échos et résonances.	191	Accords parfaits, diapason.	210
Réfraction du son.	192	Notation des gammes, nombre absolu de vibrations.	211
Porte-voix, cornet acoustique	193	Longueur des ondes.	211
Stéthoscope.	194	<i>Vibrations transversales des cordes.</i>	212
<i>Mesure du nombre de vibrations.</i>	194	Sonomètre.	212
Sirène.	194	Lois des vibrations des cordes.	213
Soufflerie.	196	Vérification expérimentale.	214
Roue de Savart.	197	Nœuds et lignes nodales.	215
Limite des sons perceptibles.	198	Probl. sur les vibrat. des cordes	216
Méthode graphique.	199	Vibrations longitudin. des cordes.	217
* Phonautographe de Scott	200	<i>Vibrations de l'air dans les tuyaux.</i>	217
* Méthode optique de Lissajous.	201		

Tuyaux à bouche.	218	* <i>Vibrations des verges.</i>	229
Tuyaux à anche.	219	Vibrations des plaques.	230
Sons harmoniq. d'un même tuyau.	221	Vibrations des membranes.	231
Nœuds et ventres de vibration.	221		
Expériences qui les démontrent.	222	* <i>Analyse et synthèse des sons.</i>	231
Leur disposition	224	Sons simples et sons composés.	231
Origine des nœuds et des ventres.	225	Analyse des sons par les résonna-	
Formules des tuyaux sonores.	226	teurs.	231
Loi des longueurs.	227	Appareil pour l'analyse des sons.	232
Lois de Bernoulli.	227	Synthèse des sons.	233
Elles ne sont qu'approchées.	227	Cause du timbre.	235
Problèmes sur les tuyaux sonores.	228	Perception des sons.	235

LIVRE VI

CHALEUR

Hypothèses sur la nature de la chaleur, théorie dynamique.	237	Mesure des coefficients de dilatat.	265
Travail interne et travail externe.	238	Méthode de Lavoisier et Laplace.	265
Historique de la théorie dynamiq.	239	Méthode de Roy et Ramsden.	267
Effets de la chaleur, dilatation.	239	Table des coefficients de dilatation.	268
Expér. qui montrent la dilatat.	240	Les coefficients de dilatation aug-	
Travail dans la dilatation.	241	mentent avec la température.	269
Mesure des températures.	242	Formules sur les dilatations	269
Thermomètres.	242	Problèmes sur les dilatations	270
Calibrage du tube.	243	Applications des dilatations.	271
Remplissage du thermomètre.	244	Pendule compensateur.	271
Graduation.	245	Lames compensatrices.	272
Détermination du zéro.	245		
Détermination du point 100.	245	<i>Dilatation des liquides.</i>	273
Construction de l'échelle.	247	Dilatat. apparente et dilat. absolue.	273
Différentes échelles thermométriq.	248	Dilatation absolue du mercure.	274
Déplacement du zéro.	250	Dilatation apparente du même.	275
Limites du thermomètre à mercure.	250	Thermomètre à poids.	276
Conditions de sensibilité.	251	Coefficient de dilatation du verre.	276
Thermomètre à alcool.	251	Coefficients de dilatat. des liquides.	276
Thermomètre différentiel de Leslie.	253	Table des coefficients des liquides.	277
Thermoscope de Rumford.	254	Application du thermom. à poids.	277
Thermomètre de Bréguet.	255	Correction de la hauteur baromét.	277
Thermomèt. à maxima et à minima.	256	Maximum de densité de l'eau.	278
* Thermom. à maxima de Negretti.	256	Table des densités de l'eau	279
* Thermomètre id. de Walferdin.	257	Correction des poids spécifiques.	280
Pyromètres	258		
Thermomètre électrique.	259	<i>Dilatation et densité des gaz</i>	281
<i>Notions sur les aimants et sur les</i> <i>piles thermo-électriques.</i>	259	Méthode de Gay-Lussac.	281
Aimant et aiguille aimantée.	259	Formules et problèmes.	283
Piles et courants thermo-électriq.	260	Méthode de M. Regnault.	285
Action des courants sur les aimants.	262	Deuxième méthode du même.	288
Notions sur le galvanomètre.	262	Troisième méthode du même	290
Thermo-multiplicateur de Melloni.	263	Travail dans la dilat. des gaz.	291
		* Thermomètre à air.	292
<i>Dilatation des solides.</i>	264	* Pyromètre à air.	292
Dilatation linéaire et dilatation cu-		* Zéro absolu.	292
blique, coefficients de dilatation.	264	Densités des gaz par rapport à l'air.	293
		Méthode de M. Regnault.	294
		Gaz qui attaquent le cuivre.	297

Densités des gaz par rapp. à l'eau.	297	Liquéfaction du protoxyde d'azote.	337
<i>Changements d'état.</i>	298	<i>Mélanges des gaz et des vapeurs.</i>	339
Fusion, ses lois.	298	Lois de Dalton.	339
Températures de fusion	299	Problèmes sur les mélanges des gaz et des vapeurs.	341
Chaleur de fusion, travail.	299	* <i>État sphéroïdal.</i>	342
Dissolution.	300	* <i>Densités des vapeurs.</i>	343
Solidification, ses lois, travail.	300	Méthode de Gay-Lussac.	343
Cristallisation.	301	Méthode de Dumas.	344
Formation de la glace.	301	Table des densités des vapeurs.	346
Régulation de la glace.	302	Procédé de Sainte-Claire Deville.	346
Causes qui retardent la congélation, surfusion.	302	Rapport entre un volume de li- quide et celui de sa vapeur.	346
Mélanges réfrigérants.	304	<i>Hygrométrie.</i>	346
<i>Vapeurs.</i>	305	État hygrométrique.	347
Vaporisation.	305	Hygromètre chimique.	348
Force élastique des vapeurs.	305	Hygromètre à cheveu.	349
Formation des vapeurs dans le vide.	306	Table de Gay-Lussac.	351
Espace saturé, maxim. de tension.	307	* Hygromètre de Daniell.	352
Vapeurs non saturées.	308	* Hygromètre de Regnault.	354
Tension au-dessous de zéro.	309	Hygrosopes.	355
Tension de zéro à 100 degrés.	310	* Psychromètre.	356
Tension au-dessus de 100 degrés.	312	Problèmes sur l'hygrométrie.	357
Méthode de M. Regnault.	313	<i>Calorimétrie.</i>	358
Table des forces élastiques.	315	Objet de la calorimétrie, calorie.	358
Tension des vapeurs de divers li- quides.	316	Chaleurs spécifiques.	359
Tension des dissolutions salines.	316	Expérience de Tyndall.	359
Tension dans deux vases inéga- lement chauds.	317	Mesure de la chaleur absorbée par un corps qui s'échauffe.	360
Évaporation.	318	Méthode des mélanges.	360
Causes qui l'accélèrent.	319	Appareil de M. Regnault.	361
Ébullition, ses lois.	319	Méthode du calorimètre de glace.	362
Températures d'ébullition.	320	Puits de glace.	363
Influence des substances en disso- lution sur la temp. d'ébullition.	320	Chaleurs spécifiques des liquides.	364
Influence de la nature des vases.	321	Table des chaleurs spécifiques.	364
Influence de l'air en dissolution.	321	* Loi de Dalton et Petit.	365
Influence de la pression.	322	* Chaleurs spécifiques des gaz.	365
Bouillant de Franklin.	323	Chaleur latente de fusion.	366
Mesure de la hauteur des monta- gnes par la température d'ébullit.	324	Chaleur de fusion de la glace.	366
Production de la vapeur en vase clos.	324	Chaleur latente des vapeurs.	367
Marmite de Papin.	325	Calorimètre à mercure de Fabre et Silbermann.	368
Chaleur et travail de vaporisat.	326	Problèmes sur les chaleurs spéci- ques et sur les chaleurs latentes.	370
Froid produit par l'évaporat., cryo- phore, congélation du mercure.	327	* <i>Équivalent mécan. de la chaleur.</i>	372
Congélateur de Carré.	328	Expériences de Joule.	372
<i>Liquéfaction des vapeurs et des gaz.</i>	329	Applications de la thermodynam.	373
Distillation, alambics.	330	* <i>Décomposition par la chaleur.</i>	374
Alambic de Salleron.	331	Dissociation.	374
Absorption, tubes de sûreté.	333	<i>Conductibilité.</i>	375
Liquéfaction des gaz.	334	Conductibilité des solides.	375
Liquéfaction et solidification de l'acide carbonique.	335	Conductibilité des liquides.	377

Mode d'échauffement des liquides.	378	Expérience de Tyndall.	407
Conductibilité des gaz.	378	Chaleur due à la pression et à la percussion	408
Conductibilité de l'hydrogène.	379	Expérience de Tyndall sur la compression des gaz.	409
Convection	379	Chaleur engendrée par le choc.	410
Applications de la conductibilité.	379	<i>Sources physiques.</i>	411
<i>Rayonnement de la chaleur.</i>	380	Radiation solaire.	411
Lois du rayonnement.	381	Chaleur terrestre.	412
Intensité de la chaleur rayonnante, ses lois	382	Chaleur dégagée par l'imbibition.	413
Équilibre mobile de température.	385	<i>Sources chimiques.</i>	414
Loi de Newton sur le refroidiss.	385	Combinaisons, combustion.	414
Conséquences de la loi de Newton.	386	Chaleur dégagée par la combustion.	415
<i>Réflexion de la chaleur.</i>	386	Calorimètre à eau de Fabre et Silbermann	415
Lois de la réflexion.	386	Lois de la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques.	417
Leur démonstration par l'appareil de Melloni	387	Appareils pour obtenir de très-hautes températures.	418
Réflexion irrégulière, diffusion.	388	<i>Chauffage.</i>	418
Réflexion par les miroirs.	389	Cheminées.	419
Expérience des miroirs conjugués.	390	Tirage des cheminées.	419
Miroirs ardents.	391	Poêles.	421
Réflexion dans le vide.	391	Chauffage par la vapeur	421
Réflexion apparente du froid	392	Chauffage par l'air chaud.	421
Pouvoir réflecteur.	392	Chauff. par circulat. d'eau chaude.	422
Pouvoir absorbant.	394	<i>Sources de froid.</i>	424
Pouvoir émissif.	396	Froid par la dilatation des gaz.	424
Comparaison des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs.	397	Rayonnement nocturne.	424
Expérience de Ritchie	398	<i>Machines à vapeur.</i>	425
Causes qui modif. les trois pouvoirs	399	Générateur de vapeur.	425
Applications	401	Machines à double effet.	427
<i>Pouvoir diathermane</i>	402	Régulateur à force centrifuge	429
Expériences de Melloni	402	Pompe alimentaire.	429
Causes qui modifient le pouv. diat.	404	Distribution de vapeur	430
Diathermanité des gaz.	405	Locomotive.	431
Applications	405	Machines à réaction, éolipyle.	433
Différentes espèces de rayons calorifiques.	406	Machines à basse, à haute et à moyenne pression.	434
<i>Sources de chaleur</i>	406	Id. à détente et sans détente.	434
Différentes sources de chaleur.	406	Cheval-vapeur.	434
<i>Sources mécaniques.</i>	407		
Chaleur due au frottement	407		

LIVRE VII

LUMIÈRE

Hypothèses sur la lumière.	435	Expérience de Fizeau.	444
Corps lumineux, diaphanes, opaqs.	436	Lois de l'intensité de la lumière.	444
Propagation de la lumière, rayon et faisceau lumineux	436	Photomètres.	445
Ombre, pénombre, reflet.	437	Vérificat. de la 1 ^{re} loi de l'intensité.	446
Images par de petites ouvertures.	439	<i>Réflexion de la lumière.</i>	447
Vitesse de la lumière.	440	Lois de la réflexion.	447
Expérience de Foucault	442	Réflexion irrégul., lumière diffuse.	449

Intensité de la lumière réfléchie	449	* Aberration de sphéricité, caustiq.	492
<i>Miroirs plans</i>	450	* Laryngoscope	493
Formation des images	450	<i>Dispersion</i>	493
Images virtuelles et images réelles	451	Spectre solaire	493
Images multiples dans un miroir	452	Couleurs simples	495
Id. dans deux miroirs	452	Recomposition de la lumière	497
<i>Miroirs sphériques</i>	454	Théorie de Newton sur les couleurs	499
Foyers des miroirs concaves	455	Couleurs complémentaires	499
Leur détermination expérimentale	458	Composition du spectre	499
Id. graphique	458	Pouvoir lumineux des divers fais- ceaux, expériences de Draper	500
Construction des images réelles	459	Pouvoir calorifique, expérience de Müller	500
Construction des images virtuelles	461	Pouvoir chimiq., expér. de Stokes	502
Miroirs convexes, foyers	461	* Analogie entre la chaleur et la lumière	503
Détermination des foyers	462	* Raies du spectre	504
Construction des images	463	* Applications des raies du spectre	504
Formules des miroirs sphériques	463	* Spectroscope, analyse spectrale	505
Discussion	464	* Expériences avec le spectroscope	507
Calcul de la grandeur des images	465	* Spectres des divers ordres, ren- versement des raies	507
Aberration de sphéricité, caustiq.	465	* Analyse de l'atmosphère solaire	508
Applications des miroirs	465	* Coloration au travers d'un prisme	508
Miroirs paraboliques	466	* Aberration de réfrangibilité	509
<i>Réfraction simple</i>	467	* Achromatisme	509
Lois de la réfraction	468	* Absorption par les milieux trans- parents	510
Indice de réfraction	470	<i>Instruments d'optique</i>	511
Effets produits par la réfraction	470	Divers instruments d'optique	511
Angle limite, réflexion interne	471	<i>Instruments qui grossissent</i>	511
Mirage	472	Microscope simple	511
<i>Transmission de la lumière à tra- vers les milieux diaphanes</i>	473	Conditions de netteté des images	513
Milieux à faces parallèles	473	Diamètre apparent	514
Prismes	474	Mesure du grossissement	515
Marche des rayons dans les prismes	474	Microscope composé	516
Polyprisme, prisme à angle variab.	475	Microscope de Nachet	517
Application du prisme rectangle	476	Calcul du grossissement	520
* Condition d'émergence	476	Micromètre, chambre claire	520
* Déviation minimum	477	* Microscop. binoculaire de Nachet	522
* Mesure des indices de réfraction des solides	478	Achromatisme du microscope	523
* Id. des liquides	478	Oculaire négatif et ocul. positif	525
* Id. des gaz	479	Champ, diaphragme, point oculaire	526
* Table des indices de réfraction	480	Applications du microscope	526
<i>Lentilles, leurs effets</i>	480	<i>Instruments qui rapprochent</i>	526
Différentes espèces de lentilles	480	Lunette astronomique	526
Foyers dans les lentilles biconv.	481	Réticule, axe optiq., ligne de visée	528
Centre optique, axes secondaires	483	Grossis. et éclat dans la lun. astron.	529
Détermination expér. des foyers	485	Lunette terrestre	530
Détermination graphique	485	Lunette de Galilée	531
Construction des images réelles	487	Télescopes	532
Relation entre la grandeur de l'i- mage et celle de l'objet	488	<i>Instruments de projection</i>	537
Construction des images virtuelles	489	Chambre obscure	537
Foyers des lentilles biconcaves	489	* Chambre claire	539
Construction des images dans id.	490		
* Formule des lentilles	491		

Lanterne magique	540	Rayon ordinaire et rayon extraor.	569
Microscope solaire	541	Lois dans les cristaux à un axe . .	570
* Microscope photo-électrique . .	543	Lois dans les cristaux à deux axes.	570
Lentilles à échelons, phares . . .	544	* <i>Diffraction et franges</i>	570
<i>Photographie</i>	546	Interférences	571
Daguerreotype	546	Longueur des ondulations, causes	
Photogr. sur verre collodionné . .	550	des couleurs	573
Épreuves positives sur verre . . .	551	Couleurs des lames minces, an-	
Photographie sur verre albuminé.	551	neaux de Newton	573
<i>Vision</i>	553	Réseaux	574
Structure de l'œil humain	553	* <i>Polarisation</i>	575
Marche des rayons dans l'œil . . .	555	Polarisation par réflexion	575
Renversement des images	555	Angle et plan de polarisation . . .	575
Angle optique, angle visuel	555	Polarisation par simple réflexion.	575
Appréciation des distances	558	Polarisation par double réfraction.	576
Distance de la vue distincte	557	Polariscopes ou analyseurs	576
Vue simple avec les deux yeux . .	558	Appareil de Noremborg	577
Cause du relief apparent des corps.	558	* <i>Polarisation rotatoire</i>	579
Stéroscope	559	Coloration par la polaris. rotatoire.	579
Partie insensible de la rétine . . .	560	Pouvoir rotatoire des liquides . .	580
Persistance de l'impr. sur la rétine.	560	Saccharimètre	581
Images accidentelles	560	Application du saccharimètre . . .	585
Irradiation	561	* <i>Coloration par l'interférence des</i>	
Auréoles accidentelles, contraste.	561	<i>rayons polarisés</i>	585
Non-achromatisme de l'œil	561	Lois de l'interfér. des rayons polar.	585
Myopie, presbytie	562	Teintes par les lames minces . . .	588
Besicles, diplopie	563	Influence de l'épaisseur des lames.	588
Achromatopsie, ophthalmoscope .	563	Théorie de la coloration de la lu-	
* <i>Sources de lumière</i>	565	mière polarisée	587
Phosphorescence	565	Anneaux par la lumière polarisée	
Phosphoscope	566	à travers les lames biréfring. . .	587
Fluorescence	568	Anneaux dans les cristaux à 2 axes.	588
* <i>Double réfraction</i>	568	Coloration par le verre trempé . .	589
Cristaux à un axe	569	Polarisation de la chaleur	590

LIVRE VIII

MAGNÉTISME

Aimants naturels et artificiels . .	591	Boussole de déclinaison	601
Pôles et ligne neutre	592	Méthode du retournement	602
Actions mutuelles des pôles	593	Boussole marine	603
Fluides magnétiques	594	Inclinaison, équateur magnétique.	604
Théorie d'Ampère sur le magnétis.	594	Boussole d'inclinaison	606
Substances magnétiques	594	Aiguille astatique	607
Aimantat. par influence, fantômes		<i>Aimantation</i>	607
magnétiques, lignes de force . .	595	Sources d'aimantation	607
Force coercitive	596	Méthode de la simple touche . . .	608
Expérience des aimants brisés . .	597	Méthode de la touche séparée . . .	608
Action des aimants sur tous les		Méthode de la double touche . . .	608
corps; corps diamagnétiques . .	597	Aimantat. par l'action de la terre.	609
<i>Magnétisme terrestre</i>	598	Faisceaux magnétiques	609
Action directrice de la terre . . .	598	* <i>Loi des actions magnétiques</i> . . .	611
Couple magnétique terrestre . . .	599	Intensité et distribution du ma-	
Méridien magnétique, déclinaison.	599	gnétisme terrestre	613
Variations de la déclinaison	600		

LIVRE IX

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Hypothèses sur la nature de l'élect.	614	Soins à donner aux mach. élect.	646
Électricité statique et dynamique.	615	Tension maxima.	646
Électrisation par le frottement.	615	Électromètre de Henley.	647
Pendule électrique.	616	Conducteurs secondaires.	648
Corps conducteurs.	616	Mach. de Nairne et de Van Marum.	648
Corps isolants, réservoir commun.	617	Machine d'Armstrong.	649
Deux espèces d'électricité.	618	Machine de Holtz.	651
Théories de Symmer et de Franklin.	618	Machine diélectrique de Carré.	654
Théorie moderne de l'électricité.	619	<i>Expériences diverses</i>	656
Application à cette théorie du lan-		Étincelle électrique.	656
gage ancien.	620	Durée de l'étincelle.	657
Actions mutuelles des deux élect.	621	Tabouret électrique.	659
Loi de l'électrisation par frottem.	621	Carillon électrique.	660
Diverses sources d'électricité.	622	Tourniquet électrique, insufflation.	661
<i>Mesure des forces électriques.</i>	623	Poisson volant de Franklin.	662
Lois des attractions et des répul.	623	<i>Condensation de l'électricité</i>	664
* Expériences de Harris.	626	Condensateurs, leur théorie.	664
Accumulation de l'électricité à la		Décharge lente du condensateur.	666
surface des corps, tension.	627	Déch. instant. et déch. secondaire.	667
Influence de la forme des corps.	630	Limite de charge.	668
Pouvoir des pointes.	631	Calcul de la force condensante.	668
Électrisation des corps en contact.	631	Carreau fulminant.	668
Déperdition de l'électric. dans l'air.	632	Bouteille de Leyde.	669
Déperdition dans le vide.	633	Bouteille à armatures mobiles.	672
<i>Électrisation par influence.</i>	633	Jarres et batteries.	672
Appareil de Riess.	636	Électromètre condensateur.	674
Limite à l'électrisat. par influence.	636	<i>Effets de l'électricité.</i>	676
* Théorie de Faraday.	637	Effets physiologiques.	676
Communication de l'électricité à		Effets lumineux, œuf électrique.	677
distance, décharge disruptive.	639	Bouteille, tube et carreau étincel.	678
Mouvements des corps électrisés.	640	Effets calorifiques, portraits élect.	680
Électroscope à feuilles d'or.	641	Effets mécaniques.	681
<i>Machines électriques.</i>	642	Effets chimiques.	683
Électrophore.	642	Pistolet de Volta.	683
Machine électrique de Ramsden.	644	Eudiomètre.	684

LIVRE X

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

Expérience et théorie de Galvani.	686	Pile de Wollaston.	694
Expériences de Volta.	687	Pile sèche de Zamboni.	696
Théorie du contact, de Volta.	689	* Électromètre de Bohnenberger.	696
Pile de Volta.	690	* Appareil à rotation.	697
Distribut. de l'élect. dans la pile.	691	<i>Théorie chimique de la pile.</i>	698
Tension de la pile.	692	Électricité due aux actions chimiq.	698
Pôles, électrodes, courant.	693	Lois du dégagement de l'électricité	
<i>Diverses modifications de la pile.</i>	693	dans les actions chimiques.	698
Pile à auges.	693	Théorie électro-chimiq. d'Ampère.	699

Théorie chimique de la pile.	700	Dorure galvanique.	734
La force électromotrice varie avec		Argenture	735
les métaux et les acides.	701	<i>Effets magnétiques des courants.</i>	736
Courants secondaires.	702	Expérience d'Ersted, loi d'Ampère.	736
Polarité.	702	Galvanomètre, sa théorie.	737
<i>Piles cloisonnées à deux liquides.</i>	703	Sa construction.	738
Objet des piles à deux liquides.	703	Sa graduation.	740
Pile de Daniell	703	Ses usages	741
Pile à ballon	705	Conditions de sa construction.	741
Pile de Grove.	706	Boussole galvanométrique.	742
Pile à charbon de Bunsen.	707	<i>Courants thermo-électriques.</i>	742
Manipulation de la pile de Bunsen.	709	Expérience de Seebeck.	742
Propriété du zinc amalgamé.	710	Causes des courants thermo-électr.	743
* <i>Nouvelles piles.</i>	710	Pouvoir thermo-électr. des métaux.	744
Pile au bichromate de potasse.	710	Propriétés des cour. thermo-électr.	744
Pile au sulfate de mercure.	710	Couple et pile thermo-électriques.	745
Pile de Callaud.	711	Lois des courants thermo-électr.	746
Pile de Minotto	712	* Pile de Ed. Becquerel.	746
<i>Effets divers des courants</i>	712	Applicat. des cour. thermo-électr.	748
Effets physiologiques.	713	* Thermomét. élect. de Becquerel.	748
<i>Effets calorifiques.</i>	714	* Pyromètre élect. d'Ed. Becquerel.	748
Lois de la chaleur due au passage		* <i>Mesure et lois de l'intensité des</i>	
des courants.	715	<i>courants.</i>	751
Cause de la chaleur dégagée dans		Intensité des courants	751
la pile, travail correspondant.	715	Boussole des sinus	751
<i>Effets lumineux.</i>	716	Rhéostat de Wheatstone	752
Arc voltaïque.	716	Unité et lois des résistances.	753
Transport par l'arc voltaïque.	718	Conductibilité pour les courants.	754
Projection des deux charbons.	719	Lois de Ohm sur les courants thermo-électriques.	754
* Régulateur de la lumière électri-		Leur vérification expérimentale.	755
que de Foucault.	719	Formules sur les lois de Ohm, long-	
Propriétés et intensité de la lum-		gueur réduite.	755
nière électrique.	723	Mesure de la force électromotrice.	756
<i>Effets mécaniques.</i>	724	Application des lois de Ohm aux	
Transports mécan. par les courants.	724	courants hydro-électriques.	756
Expérience de L. Daniel sur l'ac-		Formules générales sur les piles.	756
tion mécanique des courants.	725	Combinaisons diverses des couples.	757
<i>Effets chimiques</i>	726	Condition pour l'effet maximum.	759
Décomp. de l'eau, électrolyse.	726	Vitesse de l'électricité	759
Voltmètre, unité d'intensité,		État permanent et état variable.	760
équivalent électrique	727	Courants dérivés, lois de la déri-	
Lois de l'action électrolysante.	727	vation	760
Loi de Faraday sur les décomposi-		<i>Électro-dynamique.</i>	761
tions électro-chimiques	728	Actions mutuelles des courants	761
Décomposition des oxydes, des aci-		Lois des courants parallèles.	761
des et des composés binaires.	728	Lois des courants angulaires.	764
Décomposition des sels ternaires.	730	Loi des courants sinucux	765
Effets secondaires de l'électrolyse.	731	<i>Direction des courants par les cour.</i>	768
Théorie de Grotthus.	731	Action d'un courant indéfini sur un	
Transports électro-chimiques.	732	courant perpendic. à sa direct.	768
<i>Galvanoplastie</i>	733	Action d'un courant indéfini sur un	
		courant rectangulaire ou circul.	768

<i>Rotation des courants par les cour.</i>	769	<i>Induction.</i>	815
Rotation d'un courant horizontal		Induction par les cour. discontinus	815
par un courant horizontal.	769	Induction par les courants continus.	817
Rotation d'un courant vertical par		Conditions pour qu'il y ait induction,	
un courant circulaire horizontal.	769	loi de Lenz	818
<i>Électro-magnétisme.</i>	770	Induction par l'électricité statique	818
Actions des courants sur les aimants.	770	Induction par les aimants.	819
Action directrice des aimants sur		Induction par les aimants sur les	
les courants.	771	corps en mouvement.	821
Rotation des aimants par les cour.	772	Induction par l'action de la terre.	822
Rotation des courants par les aimants.	774	Induction d'un courant sur lui-même,	
Rotation des liquides par les cour.	775	extra-courant d'ouverture	824
Commutateur de Berlin.	777	Extra-courant de fermeture.	825
<i>Solénoïdes.</i>	778	Induct. dans les circuits non fermés.	826
Action des courants sur les solén.	778	Courants induits de différ. ordres.	826
Action de la terre sur les solénoïdes.	779	<i>Bobine de Ruhmkorff.</i>	826
Actions mutuelles des aimants et		Interrupteur à mercure de Fouc.	830
des solénoïdes	779	Effets de la bobine de Ruhmkorff.	832
Actions mutuelles des solénoïdes.	780	Effluve électrique.	835
Théorie d'Ampère sur le magnétis.	780	* Expérience de Hiltorf.	836
Direction des courants d'Ampère.	781	* Stratification de la lumière élect.	837
Courant terrestre.	782	* Tubes de Geissler.	838
<i>Action de la terre sur les courants.</i>	782	* Application, fusée de Statcham.	840
Action sur les courants verticaux.	782	<i>Applicat. des courants d'induct.</i>	841
Action sur les courants horizont.	783	Machines magnéto-électriques et	
Action sur les courants circulaires.	784	dynamo-électriques.	841
Courants astatiques.	785	Machine de Pixil.	841
<i>Aimantation par les courants.</i>	785	Machine de Clarke.	842
Électro-aimants.	786	* Machine de Nollet.	848
Magnétisme rémanent.	788	* Bobine de Siemens.	852
* Mouvement vibratoire et sons produits		* Machine de Ladd.	852
par les courants.	789	* Machine de Gramme.	854
<i>Télégraphes électriques.</i>	789	* Réversibilité par cette machine.	856
Principe général de ces télégraph.	789	* <i>Propriétés, intensité et direction</i>	
Leurs parties constituant.	790	<i>des courants induits.</i>	856
Fil de ligne.	790	* Comparaison des courants induits	
Télégraphe à cadran.	793	inverse et direct.	856
Télégraphe écrivant de Morse.	795	* Lois de l'intensité des courants	
Récepteur de Morse.	795	induits.	857
Manipulateur id.	797	* Propriétés des courants induits.	857
Parafoudre.	798	* Leur direction sur les disques	
Relais.	800	tournants.	857
Sonnerie électrique.	801	* <i>Effets des aimants puissants.</i>	859
* Télégraph. Imprimant de Hughes.	801	* Effets optiques.	859
* Récepteur id.	806	* Chaleur développée par l'induction,	
* Régulateur id.	808	expérience de Foucault.	860
* Modification du chariot de id.	809	* Expérience de de la Rive sur la	
* Télégraphe électro-chimique.	810	rotation des jets électriques.	862
* Télégraphe transatlantique.	811	* <i>Diamagnétisme.</i>	863
* Galvanomètre récept. de Thomson	812	* Substances diamagnétiques et	
* Moteur électro-magnétique.	814	substances paramagnétiques.	863
		* Effets diamagnétiques.	863
		* Théorie du diamagnétisme.	865

MÉTÉOROLOGIE ET CLIMATOLOGIE

Objet de la météorologie.	867	<i>Climatologie</i>	895
<i>Météores aériens</i>	867	Températures moyennes.	895
Vents, leur cause	867	Causes qui modifient la température de l'air.	895
Direction et vitesse des vents.	868	Lignes isothermes.	897
Vents réguliers ou alizés.	868	Climats	898
Région des calmes	870	Distribution de la température à la surface du globe.	900
Vents périodiq., moussons, brise	870	Température des mers, courants marins.	900
Vents variables.	871	Températ. des lacs et des sources.	901
Loi de la rotation des vents.	872	Distribution des eaux sur le globe.	902
Cyclones.	872	<i>Prévision du temps</i>	902
Tornados, trombes.	873	Observatoires météorologiques.	902
<i>Météores aqueux</i>	875	Signes du temps.	903
Nuages	875	Pronostics tirés des vents et des tourbillons.	903
Pluie, pluviomètre.	877	Pronostics tirés de la hauteur du baromètre	904
Brouillards	878	Pronostics tirés du baromètre et de l'hygromètre	905
Rosée, serain, gelée blanche.	878	Pronostics tirés des mouvements de l'aiguille aimantée.	905
Neige, grésil, verglas.	879	Service des ports.	905
Grêle.	880	Signaux des perturbations.	905
<i>Météores électriques</i>	881	<i>Instruments de météorologie.</i>	906
Électricité atmosphérique.	881	Appareils enregistreurs	906
Appareils pour l'apprécier.	881	Météorographe du P. Secchi.	907
Électromètre à conducteur mobile de Palmieri	883	Thermographe de Naudet.	914
Électricité habituelle de l'atmosphère et des nuages, sa cause.	886	Baromètre enregistreur de id.	916
Éclairs	887	Évaporomètre de Piche	916
Bruit du tonnerre.	888	Collecteur d'électricité de Thomson.	917
Effets de la foudre.	888	Électromètre à réflexion de id.	918
Choc en retour.	889	Actinomètre d'Arago.	920
Paratonnerre.	889		
Aurore boréale	891		
<i>Météores lumineux.</i>	893		
* Arc-en-ciel	893		
* Halos et parhélies.	895		
RECUEIL DE PROBLÈMES.			923

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

COURS DE PHYSIQUE

PUREMENT EXPÉRIMENTALE ET SANS MATHÉMATIQUES

A l'usage des gens du monde, des candidats au baccalauréat ès lettres, des écoles normales primaires, des institutrices, des pensions de demoiselles, etc.

OUVRAGE DE LUXE

illustré de 396 magnifiques gravures intercalées dans le texte
et d'une planche coloriée

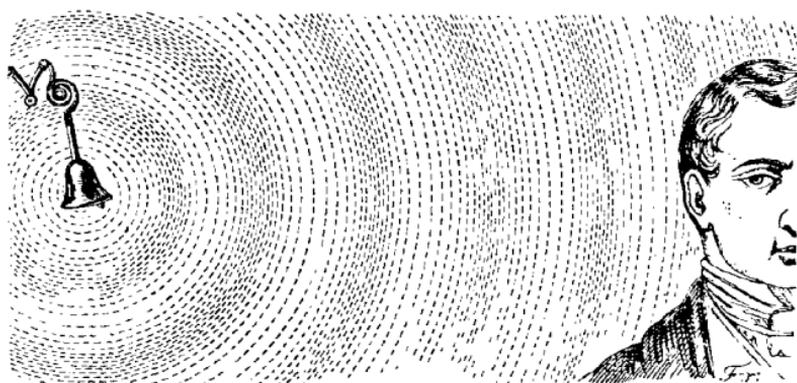
PAR A. GANOT

SIXIÈME ÉDITION

Augmentée de plusieurs vignettes

Un volume in-12 de 534 pages. — Prix, broché, 5 fr. 50 c.

Même prix par la poste, en adressant *franco* un mandat sur la poste,
à M. GANOT, 8, rue du Jardinnet.

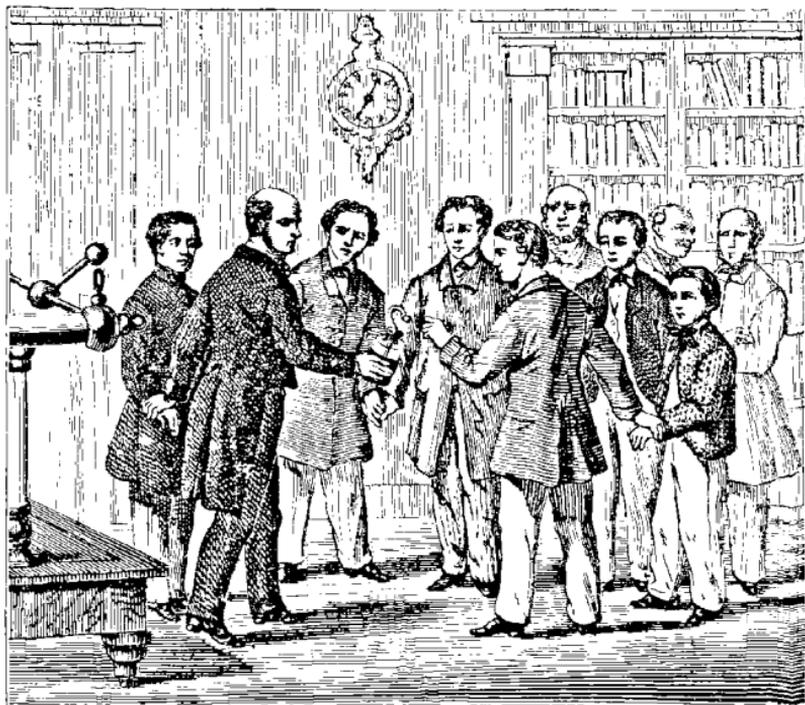


Propagation du son.

Ce livre n'est point un abrégé du TRAITÉ DE PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE ET APPLIQUÉE, ET DE MÉTÉOROLOGIE, du même auteur. Le

texte en diffère entièrement ; sauf un très-petit nombre, il en est de même des vignettes, ainsi que le montrent les spécimens ci-joints.

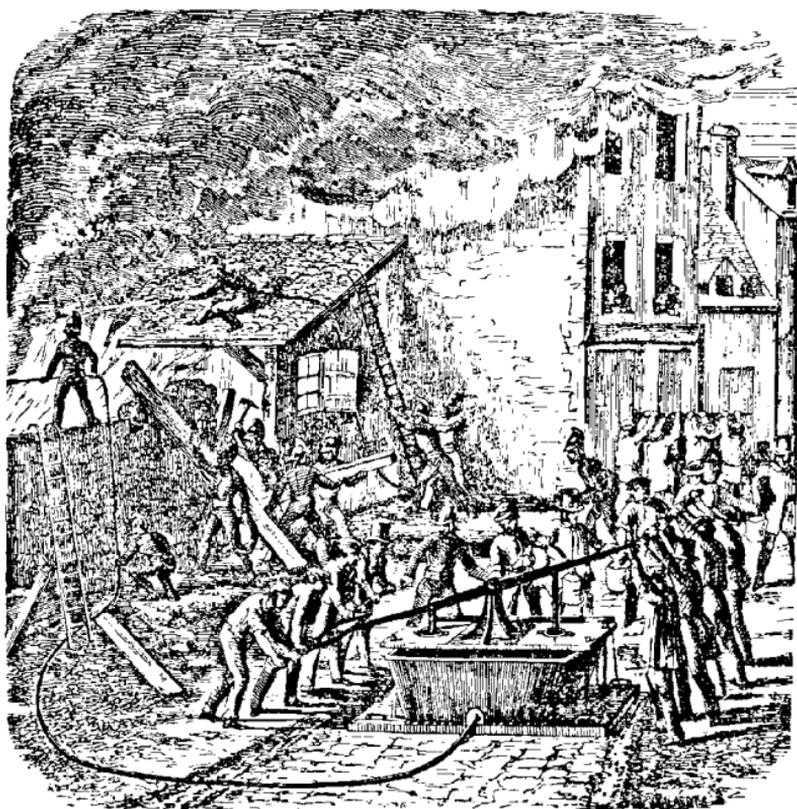
Comme son titre l'indique, le COURS DE 'PHYSIQUE PUREMENT



Chaîne électrique.

EXPÉRIMENTALE est destiné aux lecteurs étrangers aux études mathématiques. Il ne faudrait pas en conclure que les matières qu'il renferme ne soient traitées que sous une forme superficielle et incomplète. En effet, un très-grand nombre de phénomènes physiques, comme les propriétés des gaz et des liquides, la plus grande partie de l'acoustique, de la chaleur et de la lumière, la photographie, toute l'électricité, l'argenteure et la dorure par la

pile, la galvanoplastie, la télégraphie électrique, peuvent être démontrés par l'expérience et parfaitement compris sans le secours des mathématiques. C'est pourquoi, tout en s'abstenant de formules et de théories abstraites, l'auteur a pu décrire avec des



Pompe à incendie.

développements suffisants les progrès des sciences physiques depuis un siècle, et leurs nombreuses applications.

LE COURS DE PHYSIQUE PUREMENT EXPÉRIMENTALE s'adresse donc, non-seulement aux personnes qui désirent acquérir des connaissances élémentaires exactes sur la physique et sur ses belles

applications, mais aux instituteurs, aux institutrices, aux pensions de demoiselles, aux écoles normales primaires, etc.

Enfin, les candidats au baccalauréat ès lettres y trouveront toutes les matières exigées pour la physique dans leur examen.



Effet de réflexion.

En adressant **franco** un bon de poste de 5 fr. 60 à M. Ganot, 8, rue du Jardinnet, on recevra **sans retard**, par la poste et franc de port, un exemplaire broché.

Prix du **Traité de physique et de météorologie**, 17^e édit.,
par la poste, 7 fr.

Toute lettre non affranchie est refusée.

A PARIS

CHEZ L'AUTEUR. 8, RUE DU JARDINET, DÉPENDANT L'ÉCOLE DE MÉDECINE
(maison du brocheur)

ET CHEZ TOUS LES LIBRAIRES

5413. — Tours, impr. Mame.