

PRÉCIS ÉLÉMENTAIRE
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE.

Avec des Planches en taille-douce.

IMPRIMERIE DE MADAME HUZARD,
(NÉE VALLAT LA CHAPELLE),
Rue de l'Éperon Saint-André-des-Arts, N^o. 7.

PRÉCIS ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE,

PAR J.-B. BIOT,

MEMBRE de l'Académie des Sciences, Astronome adjoint du Bureau des Longitudes, Professeur de Physique mathématique au Collège de France, et de Physique expérimentale à la Faculté des Sciences de Paris; des Sociétés royales de Londres et d'Édimbourg; de l'Académie impériale de Saint-Pétersbourg; des Académies Royales de Stockholm, Turin, Munich, Lucques, Berlin, Naples; Membre honoraire de l'Université de Wilna, de l'Institution royale de Londres, de la Société philosophique de Cambridge, des Antiquaires d'Écosse, de la Société pour l'avancement des Sciences naturelles de Marbourg, de la Société Helvétique des Sciences naturelles, et de la Société philomathique de Paris.

Qui tractaverunt scientias, aut empirici aut dogmatici fuerunt. Empirici, formicæ more, congerunt tantum et utuntur: rationales, araneorum more, telas ex se conficiunt. Apis verò ratio media est, quæ materiam ex floribus horti et agri elicit, sed tamen eam, propriâ facultate, vertit ac digerit.

BACON, *Nov. Org. Lib. I. xciv.*

OUVRAGE DESTINÉ A L'ENSEIGNEMENT PUBLIC,

Par Arrêté de la Commission de l'Instruction publique, en date du
22 février 1817.

~~~~~  
SECONDE ÉDITION.  
~~~~~

TOME I.

A PARIS,

CHEZ DETERVILLE, LIBRAIRE, RUE HAUTEFEUILLE.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

1821.

PRÉFACE DE LA PREMIÈRE ÉDITION.

CE Précis élémentaire est le texte des leçons publiques que j'ai données à la Faculté des Sciences de Paris, en 1817 et 1816, dans le cours de physique que je partage avec mon ami M. Gay-Lussac. C'est en grande partie l'extrait du *Traité général de physique* que j'ai publié il y a quelques mois, avec cette différence que les faits y sont exposés d'une manière purement expérimentale, et leurs conséquences déduites d'une manière purement rationnelle, sans aucun emploi quelconque du calcul algébrique, modifications qui devenaient nécessaires pour mettre les élémens de la science à la portée de la plupart des jeunes gens, qui cherchent seulement à acquérir des notions générales, comme une préparation utile pour d'autres études, telles que la médecine ou l'histoire naturelle, ou même comme un simple complément de leur éducation. Dans cette vue, j'ai ajouté à mon travail un premier livre qui contient les lois générales de l'équilibre et du mouvement, avec leurs applications les plus usuelles; j'ai aussi intercalé, dans l'optique, la description et l'usage des lunettes, des télescopes, des microscopes et des autres appareils dont je n'avais pas parlé dans mon *Traité*, les réservant pour un autre ouvrage spécialement consacré à l'optique analytique. Ce Précis, ainsi complété, embrasse donc toute la physique expérimentale. D'ailleurs, l'ordre des matières y est le même que dans mon *Traité*; c'est-à-dire, qu'après les principes abstraits de l'équilibre et du mouvement, qui régissent tous les phénomènes, j'expose successivement les procédés généraux d'observation et de mesure qui

servent à toutes les sciences d'expérience, et j'en développe ensuite les applications aux diverses branches de la physique, telles que l'acoustique, l'électricité, le magnétisme, la lumière et la chaleur. L'expérience m'a de plus en plus convaincu que cette marche est la meilleure pour l'exposition des matières; j'oserais presque dire que c'est la seule qui amène les résultats dans l'ordre naturel et nécessaire de leur déduction.

Ce n'est pas toutefois sans quelques regrets que je me suis résolu à présenter aux élèves un ouvrage où la physique est dépouillée de ce qui fait sa principale utilité et sa certitude, je veux dire les expressions et les méthodes mathématiques. J'aurais vivement désiré que l'état de l'instruction élémentaire dans les écoles publiques m'eût permis de m'en tenir à mon premier *Traité*. Je suis aussi convaincu que personne du tort que font en général, aux progrès réels d'une science, les ouvrages qui l'abrègent en la mutilant, et dont la simplicité apparente ne provient que de l'omission de détails qui constituent la solidité des résultats et les rendent susceptibles d'application. Je partage entièrement, à cet égard, l'opinion d'un savant Anglais, qui, en rendant compte de mon *Traité* avec une bienveillance dont je dois le remercier, combat l'usage où l'on est en Angleterre, d'offrir au public ce que l'on appelle des traités populaires, qui ne sont, à proprement parler, que des espèces de tables ou d'index, au moyen desquels un lecteur superficiel parvient seulement à savoir en gros que telle ou telle classe de phénomènes fait partie d'une science, et qu'il y a tel ou tel résultat qui s'en conclut; sans connaître jamais précisément comment ces phénomènes ont été observés, ni par quelles déductions les résultats ont été

tirés , ni avec quel degré de certitude on peut les admettre. « Si l'élève , dit notre critique , ne sait rien de tout cela , et s'il a une fois habitué son esprit à se contenter de la pure nomenclature de la science , on peut le rendre aussi savant que l'on voudra dans ce genre , il n'en sera guère plus avancé. » J'ajoute que ce qu'on néglige de lui enseigner est justement ce qu'il lui est sur-tout nécessaire de savoir. Car , lorsque vous exposez devant lui l'électricité , ou le magnétisme , ou telle autre partie de la physique , ce qui lui importe le plus , ce n'est pas de retenir la multitude des faits qu'il pourra toujours retrouver dans les livres ; c'est de bien comprendre la méthode d'expérience et d'observation qui a servi à les découvrir ; de se la rendre familière et usuelle ; en un mot , d'acquérir la philosophie des sciences , qui lui servira à quoi qu'il s'applique , et dont la connaissance intime , et , si j'ose le dire , l'imbibition profonde , donnera à son esprit de la tenue , de la force , de la justesse , lui inspirera un vif amour de la vérité , un insurmontable dégoût pour les explications systématiques , et le rendra ainsi capable d'observer et d'étudier la nature , quel que soit le genre de recherches auquel il veuille s'appliquer.

Mais , dira-t-on , si vous sentez si bien l'inconvénient de ces sortes d'ouvrages que l'on appelle populaires , comment vous êtes-vous décidé à en composer un ? C'est parce que j'ai eu l'espoir d'éviter leur principal défaut. C'est qu'en renonçant aux secours du langage algébrique , en abandonnant avec lui les conséquences les plus éloignées des théories , et leurs vérifications les plus sûres , j'ai cru qu'on pouvait ne rien omettre des faits qui servent à les fonder d'une manière stable , ni des moyens par lesquels on observe ces faits , ni

des considérations philosophiques par lesquelles on les enchaîne. De cette manière, j'ai espéré pouvoir présenter, en langage vulgaire, la substance même de la science, non pas sa surface ou son squelette. J'ai éprouvé cette marche dans le cours de la faculté des Sciences, sur un grand concours d'auditeurs, dont la plupart, ne connaissant pas la langue des mathématiques, m'ont paru accueillir avec plaisir, sous cette forme rationnelle, des vérités qui autrement ne leur eussent pas été accessibles. Je l'ai appliquée devant eux à toutes les expériences importantes dont la science se compose, à tous les appareils variés que la dotation libérale de la Commission de l'instruction publique nous a mis en état de présenter aux étudiants; j'ai cru voir qu'elle atteignait aussi loin et aussi profondément que le permettait l'état actuel de l'éducation élémentaire pour les sciences physiques; et cette conviction, jointe aux sollicitations d'un grand nombre de personnes, m'a décidé à publier cet abrégé de mon Traité, que je n'avais d'abord rédigé que pour me servir de guide dans mes leçons.

On y trouvera, dans l'optique, plusieurs choses nouvelles, entre lesquelles on remarquera sans doute un procédé aussi simple qu'ingénieux que M. Arago m'a communiqué pour mesurer les grossissemens de tous les instrumens d'optique. Parmi ces instrumens, le plus parfait, le plus admirable, c'est l'organe de la vision: j'ai tâché d'en décrire la construction et les usages avec autant de soin que j'en avais mis, dans mon Traité, à la description des organes de l'ouïe et de la voix. J'ai trouvé pour cela les plus utiles secours dans les communications bienveillantes de MM. Magendie et de Blainville, et sur-tout dans la complai-

sance extrême avec laquelle M. Cuvier a bien voulu m'expliquer lui-même les belles préparations de sa magnifique collection d'anatomie, et m'éclairer par sa conversation, autant que par ses ouvrages, sur les détails précis dont j'avais besoin. Je suis persuadé que les instrumens de la physique et les opérations de la chimie pourraient recevoir plusieurs perfectionnemens très-importans de l'étude approfondie de la construction des êtres organisés et des combinaisons si variées qui s'opèrent en eux. C'est la conservation des couleurs des objets dans la vision qui a fait deviner à Euler la possibilité des lunettes achromatiques. On verra dans ce Précis, que l'œil de l'homme n'est pas moins bien pourvu sous le rapport de l'aberration de sphéricité; car la situation de la pupille dans l'intérieur du premier milieu réfringent est parfaitement appropriée à cet usage; tellement que si l'on eût fait attention aux conséquences de cette disposition, on aurait été conduit directement à cette construction de loupes que l'ingénieur M. Wollaston a imaginées, et qu'il a si justement appelées périscopiques, à cause de la grande étendue de champ qu'elles permettent d'embrasser. Les modifications si multipliées de l'œil dans les animaux, et ses particularités dans l'homme même, ne peuvent-elles pas, étant plus étudiées, donner de même un jour des indications importantes pour agrandir le champ de nos télescopes, ou compenser plus habilement leurs aberrations de sphéricité? L'admirable construction du labyrinthe de l'oreille, le mécanisme inexplicable des osselets, n'aurait-il rien à nous apprendre sur la manière de propager et de recueillir les sons? La construction si délicate de la trachée des oiseaux chanteurs, la forme si soignée de leur glotte et

de leur double larynx, ne renferme-t-elle pas le modèle inaperçu de quelques instrumens harmonieux? L'organe électrique de la torpille, si semblable aux appareils voltaïques, ne peut-il pas nous révéler quelque moyen nouveau pour augmenter la force de ces instrumens déjà si énergiques, et dont l'action décomposante est si utile à la chimie? Enfin, les combinaisons infiniment si variées qui s'opèrent sous l'influence de la vie, n'offrent-elles pas, à nos recherches, les corps vivans comme autant d'appareils chimiques admirablement disposés pour réaliser tous les modes d'action dont les molécules matérielles sont susceptibles? Et quel avantage n'y a-t-il pas à les étudier sous ce point de vue, & présent sur-tout, que les combinaisons stables étant vraisemblablement pour la plupart réalisées, la chimie s'étudie à former, entre les substances, ces alliances passagères, qui, par leur mobilité même, semblent les plus propres à dévoiler les caractères les plus délicats, les plus secrets des affinités? Certes, si de telles applications sont possibles, elles ouvrent un vaste champ aux travaux des chimistes, des physiciens, des anatomistes, des zoologistes, des physiologistes et des médecins. Mais, pour que ce champ devienne fertile, il faut qu'il soit cultivé en commun; il faut que les procédés exacts de la chimie, de la physique, et leur philosophie sévère, déjà introduits par des esprits supérieurs dans une grande partie de l'histoire naturelle, de l'anatomie comparée et de la physiologie, soient accueillis et pratiqués par les personnes auxquelles leur état même donne des occasions continuelles d'observer les diverses forces et les effets variés de la vie. L'ouvrage que j'offre ici aux étudiants remplira toutes mes espérances, s'il peut contribuer à cet heureux résultat.

AVERTISSEMENT SUR LA SECONDE EDITION.

CETTE seconde Édition est , quant au plan , absolument conforme à la première ; seulement j'ai tâché d'y corriger les imperfections de détail que j'avais pu reconnaître par mon expérience ou par celle des autres , et j'y ai fait entrer les acquisitions nouvelles dont la physique s'est enrichie depuis 1817. Ainsi on y trouvera , dans l'acoustique , de grandes améliorations qui sont dues principalement aux belles recherches de M. Savart , sur les mouvemens vibratoires des corps solides. Dans la théorie de l'électricité , les expériences de M. Haüy et de M. Becquerel , sur l'électrisation des corps solides par compression , jointes à celles de M. Dessaignes , sur les effets analogues produits par l'immersion dans les liquides , semblent ouvrir enfin une voie pour arriver à reconnaître le rôle que les principes électriques jouent dans la constitution des corps , ainsi que le mode d'action des procédés qui déterminent leur dégagement dans un grand nombre de circonstances. J'ai donné à ces expériences le rang et l'étendue qu'elles méritaient. J'ai fait aussi , à la théorie du développement de l'électricité par contact , des changemens assez considérables. Cette théorie , telle que Volta l'avait présentée , semblait contrariée par plusieurs expériences , dont quelques-unes , récemment faites par M. Gay-Lussac , m'avaient été obligeamment communiquées par lui-même. En examinant ce qui produisait cette contradiction dans l'énoncé des faits , puisqu'elle ne pouvait se trouver dans les faits mêmes , j'ai reconnu qu'elle tenait uniquement à ce que , dans l'expression que Volta avait donnée de

ses expériences fondamentales sur le contact des métaux hétérogènes, l'idée d'une force électromotrice se trouvait employée d'une manière un peu trop vague; de sorte qu'en y substituant la notion plus précise d'une condition d'équilibre électrique, seule chose réellement observable dans ces phénomènes, l'enchaînement établi par Volta entre eux reprend toute sa généralité. L'admirable appareil que nous devons au génie de ce physicien illustre, acquérant tous les jours une importance nouvelle, par les merveilleux changemens qu'il détermine dans la constitution des corps, j'ai exposé les lois de ses effets chimiques avec beaucoup plus d'étendue que dans la première édition; et j'ai tâché d'y suivre aussi, autant que je l'ai pu, les lois de son équilibre électrique. Dans la théorie du magnétisme, j'ai inséré les résultats que M. Morlet a récemment obtenus relativement à la forme de l'équateur magnétique terrestre; résultats précieux par leur exactitude et par la nouvelle indication qu'ils donnent de l'existence d'un centre magnétique principal, modifié par les actions beaucoup plus faibles de centres secondaires, conformément à l'induction que nous avons depuis long-temps tirée, M. de Humboldt et moi, de la discussion générale des inclinaisons dans les diverses contrées; de sorte que cette disposition des forces magnétiques permanentes exercées par le globe terrestre, est jusqu'ici la seule loi générale que l'on y ait reconnue. A cette occasion, j'ai insisté davantage sur les méthodes pratiques par lesquelles les élémens du magnétisme du globe peuvent être déterminés, soit à terre, soit à la mer; et j'ai indiqué les précautions qu'il faut prendre pour affaiblir ou corriger les perturbations produites dans la direction des aiguilles

par les masses ferrugineuses contenues dans les navires. Enfin, j'ai indiqué une disposition d'appareil qui aurait la propriété d'agrandir l'amplitude des variations diurnes, dans une proportion pour ainsi dire indéfinie, et qui rendrait par conséquent sensibles et observables les plus légers changemens que la force directrice puisse éprouver. A la suite de cette partie de la physique, on trouvera la belle découverte récemment faite par M. OErsted, sur l'aimantation des fils de métal par le courant voltaïque; découverte qui semble devoir nous dévoiler de nouveaux rapports entre le magnétisme et l'électricité. Dans le mystère qui enveloppe encore la cause physique de ce phénomène, j'aurai soin d'exposer avec détail les observations auxquelles il aura donné naissance; et j'espère être en état d'y joindre l'analyse complète des forces qui le produisent; la loi fondamentale de ces forces étant déjà connue par le travail que nous avons présenté, M. Savart et moi, à l'Académie des Sciences, le 30 octobre 1820. Dans l'étude de la lumière, la théorie de la double réfraction a pu être considérablement simplifiée au moyen de la loi générale que j'ai découverte relativement au mode suivant lequel les corps régulièrement cristallisés exercent ce genre d'action. J'y ai joint la description du nouvel appareil que j'ai employé pour établir cette loi, et qui donne le moyen de mesurer la double réfraction, aussi bien que la réfraction simple, avec une minutieuse exactitude. J'ai pu également présenter les lois de la diffraction avec une netteté et une généralité incomparablement plus grandes que dans la première édition, en profitant du beau travail que M. Fresnel a fait sur ce sujet difficile, où l'on peut dire qu'il a tout de suite porté les expériences

au dernier degré de précision imaginable, en même temps qu'il y a multiplié le nombre des résultats nouveaux. J'ai aussi profité des faits importans découverts par M. Arago, tant dans cette branche de la physique que dans les autres parties de l'étude de la lumière, qui lui est redevable de tant de belles observations. Enfin, j'ai revu toute la théorie de la chaleur, d'après les travaux de MM. Laplace, Poisson et Fourier, et j'y ai joint les nouveaux et importans résultats obtenus sur les dilatations des corps, et leurs chaleurs spécifiques, par M. Dulong et par M. Petit, le même que nous avons perdu dernièrement, d'une manière si prématurée.

Telles sont les additions principales que j'ai faites à cette seconde édition : en parcourant les objets qu'elles embrassent, on remarque avec satisfaction que les nouvelles richesses acquises par la science ont toutes trouvé leurs places dans les grandes divisions déjà établies ; et que les découvertes, même les plus éloignées des faits déjà connus, se sont insérées parmi eux, ou à leur suite, sans déranger les rapports par lesquels ils étaient déjà liés. Tel est le caractère d'une science faite ; ce qui ne veut pas dire limitée et finie, mais stable et impossible à renverser, parce qu'elle est fondée sur les rapports directs et numériques des résultats entre eux. La physique n'est peut-être pas encore parvenue à ce point de rigueur dans toutes ses parties ; mais elle l'a déjà atteint pour plusieurs d'entre elles ; et la progression rapide avec laquelle elle se complète tous les jours, peut faire regarder l'époque de sa stabilité entière comme peu éloignée de nous.

Paris, novembre 1820.

PRÉCIS ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE.

LIVRE PREMIER.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Sur la Matérialité, l'Équilibre et le Mouvement.

CHAPITRE PREMIER.

Examen des propriétés par lesquelles les corps nous deviennent sensibles.

LES métaphysiciens ont donné des définitions très-diverses de la *matière* ; quelques-uns même ont douté que nous pussions avoir la certitude morale de son existence. Le physicien n'entre pas dans ces discussions. S'appuyant uniquement sur l'expérience, il appelle *corps matériels* tout ce qui produit, ou peut produire, sur nos organes, un certain ensemble de sensations déterminées ; et la faculté d'exciter en nous ces diverses sensations, constitue, pour lui, autant de *propriétés*, par lesquelles il reconnaît la présence des corps. Mais ces propriétés sont-elles aussi indéfiniment variées que le sont nos sensations elles-mêmes ; ou peut-on les réduire à un certain nombre, limité par des caractères distincts ? Leur coexistence, ou plutôt leur action présente et simultanée sur nos organes est-elle indispensable pour constater la matérialité ; ou bien quelques-unes seulement de ces propriétés, suffisent-elles comme étant générales et constantes, tandis que les autres seraient contin-

gentes et accidentelles? Telles sont les premières questions qui s'offrent à l'esprit; et alors, on se demande quelle marche on peut suivre pour reconnaître avec certitude ces propriétés diverses, pour les étudier dans leurs détails, pour assigner les différences qui les distinguent; pour arriver enfin à les définir avec rigueur. On voit donc, qu'avant toutes choses, il faut nous former une méthode de recherche raisonnée et applicable à ces objets. C'est à quoi nous serons conduits, en examinant de plus près comment les propriétés des corps nous deviennent sensibles, et comment nous pouvons les apprécier par leurs effets.

Il est impossible d'exister sans être continuellement affecté par une infinité d'actions extérieures qu'exercent sur nous les objets et les agens qui nous environnent. Il est impossible d'arrêter son attention sur ces impressions, sans en déduire la réalité d'une infinité de faits et de résultats extérieurs à nous-mêmes, que nous pouvons quelquefois exciter ou arrêter par l'usage de notre volonté, mais qui néanmoins paraissent pour la plupart, et sont réellement tous, soumis à des lois indépendantes de nous. Ainsi nous voyons tous les jours des corps qui, dans certaines circonstances où nous les plaçons, se refroidissent ou s'échauffent, se contractent ou s'étendent. Nous en voyons qui sont solides, d'autres liquides, d'autres qui forment des vapeurs ou des gaz. Nous voyons souvent le même corps passer successivement à ces différens états, selon les conditions extérieures où on le place. Nous voyons que tous ces corps peuvent être poussés, tournés les uns sur les autres, par l'action de nos organes, ou par l'impression de causes naturelles, indépendantes de nous. Nous voyons que ces corps admettent ainsi, jusqu'à un certain point, les mouvemens qu'on tend à leur imprimer; que cependant il y a, selon les cas, plus ou moins de difficulté à les mouvoir, et qu'ils persistent plus ou moins dans l'état de mouvement. Avec un peu plus de recherche, nous découvrons qu'ils peuvent aussi être mis en mouvement par des impressions en apparence moins directes, par des agens plus subtils, et comme plus secrets, qui les font se chercher, se fuir, s'attirer, se repousser : telles

sont les influences de l'électricité et du magnétisme. Tous ces faits, bien constatés, sont ce que l'on appelle des *phénomènes naturels*, soit que leur existence actuelle résulte ou ne résulte pas d'une action immédiate de notre volonté.

Maintenant, considérons en particulier un de ces phénomènes : je suppose par exemple la chute des corps pesans. Nous prenons à la main une pierre, et, l'isolant de tout support, nous l'abandonnons à elle-même; elle tombe aussitôt, et se précipite vers la surface terrestre : voilà un phénomène naturel. Nous portons cette même pierre au sommet d'une tour élevée, et nous l'abandonnons de nouveau. Elle tombe encore; mais tombe-t-elle de même que la première fois? son mouvement est-il le même ou différent? est-il également rapide aux différentes époques de la chute, ou est-il inégal? S'il est inégal, comment varie-t-il avec les hauteurs? Tout autre corps, soumis à la même expérience, tomberait-il plus lentement ou plus vite? L'air que le corps tombant rencontre, et qui, dans d'autres circonstances, pousse par son choc les ailes de nos moulins et les voiles de nos navires, cet air qui est aussi choqué par le corps qui tombe, ne s'oppose-t-il pas à sa chute, ne la retarde-t-il point; et alors comment la retarde-t-il, je veux dire, suivant quelle proportion? Voilà autant de particularités essentielles à connaître pour savoir précisément, non pas pourquoi, mais comment les corps tombent; c'est-à-dire, pour pouvoir assigner d'avance ce qui arrivera à un tel corps dans sa chute, selon sa forme, sa grandeur, sa substance, la hauteur d'où on le laissera partir, l'instant de sa chute auquel on voudra le considérer. Après que tout cela aura été déterminé exactement, on pourra se demander encore ce qui devra arriver au corps pesant s'il n'est pas tout-à-fait libre, par exemple, s'il glisse sur un plan incliné, ou s'il est retenu dans sa chute par un fil attaché à un point fixe, comme les appareils que l'on nomme des pendules. Y a-t-il une liaison entre ces phénomènes et les autres, et quelle est-elle? Peut-on les déduire des phénomènes observés dans la chute libre, en ayant toutefois égard aux obstacles qui gênent le mouvement du corps? Ce sont là autant de questions qui se lient aux premières, et

qu'on ne peut attaquer avec espérance de succès qu'après avoir déterminé les circonstances précises suivant lesquelles se passe le phénomène primitif. Cette détermination précise du mode d'un phénomène, qui permet d'en prédire tous les détails pour un quelconque de ses cas, et d'en développer toutes les analogies, s'appelle sa *loi physique*. Ainsi, la détermination de toutes les circonstances que nous venons d'énumérer pour les corps qui tombent, constitue les lois de la chute des corps graves, qui ont été découvertes par Galilée. On trouve ainsi que la vitesse de la chute va continuellement en s'accroissant à mesure que le corps tombe; de sorte que les espaces parcourus depuis le point de départ sont proportionnels aux carrés des temps écoulés; c'est-à-dire, qu'après deux secondes de temps, le corps se trouve avoir fait quatre fois autant de chemin que dans la première seconde; qu'après trois secondes, il en a fait neuf fois autant, et ainsi de suite. On trouve ensuite que l'air, par sa résistance, altère cette proportion d'autant plus sensiblement que les corps ont plus de volume, comparativement à leurs poids; de sorte que tous les corps tomberaient, dans un espace vide, avec une égale vitesse.

Ce sont là les lois de la chute libre des corps. On en déduit, par des raisonnemens mathématiques, leur chute sur un plan incliné, ou dans le mouvement oscillatoire des pendules. Cela ne nous apprend pas encore *pourquoi* les corps tombent, ni pourquoi ils tombent ainsi; mais si nous désignons, sans la connaître, la cause quelconque qui les y force, et que nous la nommions *pesanteur*, les lois observées de la chute deviennent autant de caractères positifs et certains de cette cause. D'après cela, au lieu de nous embarrasser dans les détails des phénomènes, nous pouvons nous borner à considérer la cause ainsi caractérisée comme le principe général qui les produit, et introduire celle-ci dans nos raisonnemens, et même dans nos calculs, comme une force inconnue, mais agissant suivant ces lois données. Alors, analysant les effets qu'elle peut produire, nous découvrons que c'est elle qui a déterminé la figure du globe, qui a renflé l'équateur de la terre et aplati les pôles; que c'est elle encore qui retient la

lune dans son orbite, et balance la force centrifuge résultante de son mouvement. Comparant ensuite ces phénomènes particuliers avec ceux que présentent les mouvemens des planètes et des comètes, nous reconnaissons entre leurs lois des analogies frappantes. Nous en venons donc à concevoir le soleil, et tous les corps planétaires comme des centres particuliers de pesanteur, dont nous suivons, par le calcul, les influences; nous en déduisons alors, comme de simples conséquences, les lois du mouvement propre de ces astres, les rapports de leurs révolutions selon leur distance au soleil, leur forme analogue à celle de la terre; et, dans la pesanteur de celle-ci sur eux, nous trouvons la cause et la mesure de la nutation de l'axe terrestre, de la précession des équinoxes, et du flux et reflux des mers: telles sont les généralités auxquelles conduit la connaissance des forces naturelles, quand on a pu s'élever jusqu'à les conclure avec certitude des observations.

L'étude de la nature physique, considérée dans toute son étendue, se réduit toujours à ces trois choses distinctes: l'observation des phénomènes; la recherche expérimentale du mode suivant lequel ils s'accomplissent, et qui est leur loi physique; enfin, la détermination des forces abstraites et mécaniques dont ils résultent comme conséquences calculables. Cet ensemble comprend tous les degrés successifs de connaissances positives par lesquels l'intelligence humaine passe, et auxquels elle a pu jusqu'à présent s'élever.

Après avoir ainsi jeté un coup d'œil sur la carrière qu'il nous faut parcourir, préparons-nous les moyens d'y entrer avec assurance; et, puisque toute notre science doit s'établir et s'élever sur les phénomènes que les corps naturels produisent, cherchons d'abord à discerner ceux de ces phénomènes qui nous rendent les corps sensibles; c'est-à-dire qui nous apprennent l'existence et la présence de ces corps, et qui constituent par cela même, à notre égard, les conditions de la matérialité.

Or, dans le nombre infini des phénomènes que la nature nous présente, il en est dont l'existence paraît être simplement accidentelle et particulière; car certains corps semblent aptes à les produire et non pas d'autres; et même, dans ceux

où on les observe, ils ne se manifestent quelquefois que dans certaines circonstances et sous certaines conditions. Par exemple, la propriété qu'a l'aimant d'attirer le fer paraît être particulière à l'aimant, au fer, et à quelques métaux seulement; encore s'y rencontre-t-elle à des degrés très-divers, selon leur nature; leur constitution actuelle, et leur état plus ou moins parfait de pureté. Toutes les autres substances, qui sont ou qui paraissent privées de cette vertu, ne laissent pas pour cela d'être aussi des corps. De pareilles propriétés ne peuvent donc pas servir à caractériser essentiellement la matérialité. Pour le faire, il faut évidemment choisir des phénomènes dont l'existence soit commune à tous les corps, et persiste dans toutes les conditions où on les place, soit que ces phénomènes se produisent toujours d'une manière perceptible et observable, soit que le raisonnement seul nous prouve qu'ils existent encore lorsque, par l'imperfection de nos sens, nous ne les apercevons plus. Or, on peut aisément reconnaître deux phénomènes qui satisfont à ces conditions; ce sont ceux que l'on appelle l'*étendue* et l'*impénétrabilité*, dont la vue et le toucher sont les premiers juges.

Le mode et l'universalité de ces phénomènes deviendront sensibles par quelques exemples. J'avance mon bras dans l'obscurité : il rencontre un obstacle qui l'empêche de s'étendre. Ma main promenée sur cet obstacle trouve qu'il est limité; qu'il finit à certains endroits, commence à d'autres, et qu'autour de lui l'espace est libre; j'en conclus que cet obstacle existe, ou paraît exister, hors de moi, dans une certaine portion de l'espace de laquelle son existence m'exclut. D'après cela je l'appelle *un corps*. Le premier de ces phénomènes, la *limitation*, est le caractère de l'étendue *figurée*, c'est-à-dire douée d'une forme. Le second, l'exclusion des autres corps, est le caractère que l'on désigne par le nom d'*impénétrabilité*. La notion première de celui-ci nous est donnée, comme je viens de le dire, par la sensation du tact. L'observation nous apprend ensuite que les corps dont l'existence actuelle nous exclut de certains points de l'espace, s'en excluent aussi mutuellement. Enfin le raisonnement, guidé par ces faits, nous

découvre que la même propriété subsiste encore dans des circonstances où l'épreuve du tact serait infiniment trop grossière pour servir à la reconnaître ; nous nous élevons ainsi à cette idée générale ; l'impénétrabilité consiste en ce que deux portions distinctes de matière ne peuvent jamais s'identifier l'une dans l'autre, de manière à coexister dans les mêmes points de l'espace.

L'exemple suivant présentera tous les pas que fait notre esprit pour arriver à cette généralisation. L'obstacle que notre main rencontre, et dont l'existence se manifeste à nous par l'exclusion qu'il nous donne, est, je suppose, une masse d'eau glacée. Dans ce cas, nous reconnaissons immédiatement sa matérialité par le tact. Maintenant voilà que cette glace vient à se fondre et à se résoudre en eau liquide. Alors si nous essayons d'y plonger la main, elle nous fait place et s'ouvre devant nous sans résistance apparente. Serait-elle donc devenue pénétrable ? Oui sans doute, si nous considérons son ensemble, qui a cessé de former un tout compacte ; mais nullement si nous considérons ses parties. Car lorsque le vase qui la contient est terminé par un col étroit, on voit le niveau s'élever dans ce col quand on pénètre la masse de l'eau en y plongeant le doigt ou tout autre corps. Les parties de l'eau ne se laissent donc pas réellement pénétrer dans cette expérience ; elles sont seulement déplacées par le corps qui les pousse, et sont transportées ailleurs. Cela est si vrai qu'au lieu de céder, elles résisteront, et d'une manière presque invincible, si on leur ôte la possibilité de s'échapper ; comme on peut le faire en renfermant l'eau dans un vase cylindrique, et essayant d'y faire pénétrer un piston qui remplisse exactement toute la section du cylindre. Maintenant chauffez cette même eau jusqu'à la faire bouillir : elle se convertira en vapeurs qui seront un air transparent, impalpable, dont les parties seront si petites que vous ne les verrez plus, et si légères que le tact ne pourra vous en donner la moindre sensation, tant elles se déplaceront avec facilité devant les corps que vous tenterez de plonger parmi elles. Mais elles n'en seront pas, pour cela, devenues individuellement plus pénétrables. Car, si

vous les enfermez encore, comme tout à l'heure, dans un cylindre, elles résisteront à la compression simultanée; et, plutôt que de se laisser pénétrer par le piston qui les pousse, ou de se pénétrer elles-mêmes, elles se rapprocheront seulement les unes des autres jusqu'à se rassembler de nouveau en un liquide, malgré la grande force d'expansion qui leur est donnée par la chaleur. Notre esprit reconnaît donc encore ici la même propriété que le tact nous rendait sensible lorsque les parties de l'eau formaient un corps solide par leur réunion.

Mais ce n'est pas là, à beaucoup près, le dernier terme d'abstraction où nous puissions la suivre. Nous sommes obligés d'admettre l'impénétrabilité dans des circonstances tellement délicates et de l'attribuer à des parcelles de matière si subtiles que notre imagination peut à peine aller jusqu'à les concevoir. L'expérience suivante en offre un exemple.

Lorsqu'on place un petit objet au-devant d'un miroir concave de métal poli, dont la surface est sphérique, il se forme, à quelque distance du miroir, une image fort ressemblante de l'objet, que l'on peut voir avec la plus grande netteté, en se plaçant à une distance convenable. Cette image, distincte des parties de l'espace qui l'avoisinent, est étendue, mais non pas impénétrable. Vous pouvez y plonger la main sans éprouver la moindre résistance, et les parties que vous touchez ne se déplacent pas, mais s'évanouissent à mesure. Vous pourrez même, en plaçant convenablement un second miroir, faire coïncider dans le lieu de cette même image, l'image d'un autre objet, sans que la première se déplace, ou en paraisse nullement dérangée. Vous pourrez opérer la même coïncidence pour l'image d'un troisième objet, d'un quatrième, et d'autant que vous voudrez. Toutes ces images sont étendues, mais non impénétrables. Ce sont des *formes*, et non de la *matière tangible*: ce mot est nécessaire, car on verra plus tard que la lumière qui détermine ces images, est elle-même vraisemblablement composée de petites molécules matérielles d'une ténuité insensible, qui se meuvent avec une vitesse extrême, et ne font ici que passer les unes parmi les autres dans les immenses intervalles par lesquels elles sont

séparées. Alors la condition d'imperméabilité a réellement lieu pour elles; mais elle n'a pas lieu pour la portion de l'espace que leur passage limite et figure.

L'imperméabilité, telle que cette progression d'idées nous la fait concevoir, s'applique toujours à des portions de matière séparées et distinctes. Elle entraîne donc nécessairement l'idée de leur limitation; mais la limitation de l'étendue n'entraîne pas l'imperméabilité de l'espace limité comme conséquence nécessaire. Car il serait possible, sinon de réaliser, au moins de concevoir des portions de l'espace qui seraient terminées, et distinguées du reste par des surfaces de diverses formes, sans être pour cela imperméables. C'est ce que l'on fait sans cesse dans les considérations géométriques, et ce que réalisait presque le dernier des exemples que nous avons rapportés.

Les considérations précédentes nous apprennent en outre, que les corps, même les plus durs et les plus solides, ne sont pas composés de matière absolument continue, mais de parties agrégées les unes aux autres, et placées à des distances qui, sous l'influence des causes extérieures, peuvent devenir plus grandes ou moindres. Cela explique comment la même masse de matière peut augmenter de volume par l'effet de la chaleur, et se contracter par le refroidissement; comment les molécules des sels peuvent, en se désunissant, se disséminer, et, pour ainsi dire, se perdre parmi les molécules de l'eau; comment le mercure peut s'attacher à l'or que l'on y plonge, et s'insinuer jusque dans l'intérieur de sa masse; comment enfin ces mélanges, ces dissolutions peuvent quelquefois s'opérer sans une augmentation apparente du volume total, ce volume ne se mesurant que sur la forme extérieure des corps, sans tenir compte des vides sensibles ou insensibles à nos regards, qui peuvent se trouver entre leurs parties. Il n'y a dans tout cela que séparation et mélange, sans pénétration des parties matérielles.

Cette discontinuité de la matière dans les corps se désigne généralement par le nom de *porosité*; et l'on appelle *pores* les interstices qui séparent leurs particules. La *porosité* paraît être une propriété commune à tous les corps que la nature

nous présente. Néanmoins nous ne devons pas la considérer comme nécessairement inhérente à la matière, puisque nous pourrions concevoir des corps qui nous seraient sensibles, et dans lesquels elle n'existerait pas.

Étant ainsi conduits à considérer les corps naturels comme des agrégations de petites parties qui constituent l'essence de ces corps, il est évident que c'est à ces parties mêmes, et non à leur agrégation plus ou moins nombreuse que nous devons appliquer d'abord nos recherches; car les propriétés du corps entier ne seront que l'ensemble de leurs propriétés individuelles, modifiées peut-être plus ou moins par le mode particulier de leur agrégation. On conçoit donc qu'il serait d'une grande importance de chercher à disséquer, pour ainsi dire, chaque corps, et chaque portion de corps d'une constitution identique, jusqu'à réduire ses parties aux plus petites dimensions qu'elles puissent avoir, sans cesser de manifester les mêmes propriétés que leur ensemble; comme, par exemple, si l'on pouvait extraire et isoler d'une masse d'or les dernières particules qui constituent l'or, ou d'une masse d'eau les dernières particules qui constituent l'eau; en sorte qu'en coupant ou modifiant ces particules, l'eau et l'or cessassent d'exister comme tels, et avec l'ensemble des propriétés que nous leur connaissons. Une pareille dissection, si elle était effectuée, aurait cet immense avantage qu'elle nous apprendrait si les propriétés diverses des corps sensibles résultent d'une certaine nature et d'une certaine forme de leurs dernières particules, lesquelles seraient constantes pour chacun d'eux, mais différentes de l'un à l'autre, ou si elles sont uniquement déterminées par un certain mode d'agrégation des dernières particules matérielles dont chaque corps est composé.

Les premiers moyens qui se présentent pour tenter cette épreuve sont les procédés de division mécaniques que nous offrent les arts. Par ces procédés, un grand nombre de corps, certains métaux, sur-tout, peuvent être réduits en parties d'une ténuité qui semble très-grande, au moins pour nos sens. En voici un exemple tiré des mémoires de Réaumur, et dont les données se rapportent aux mesures usitées de son temps.

Lorsqu'on veut fabriquer ces fils dorés dont on fait des broderies, on commence par former un cylindre d'argent pesant 360 onces, et on le dore avec des feuilles d'or superposées, dont le poids total est au plus de 6 onces. Ces 366 onces de matière sont ensuite tirées à travers des trous de diamètres graduellement décroissans, jusqu'à ce qu'elles se transforment en un fil doré d'une dimension telle que 202 pieds de longueur pèsent $\frac{1}{16}$ d'once, de sorte que la longueur totale de ce fil est de 1182912 pieds, ou 197152 toises, ce qui étant réduit en lieues ordinaires de 2000 toises, en fait 98,576. Alors, ce fil est passé entre des rouleaux qui l'aplatissent en lame, et la pression qu'il subit dans cette opération l'allonge encore de $\frac{1}{3}$; de sorte que la longueur de cette lame dorée est de 1351900 pieds, ou 1121,66, c'est-à-dire, plus que la distance de Paris à Lyon. La lame a alors $\frac{1}{8}$ de ligne de largeur; et, d'après les poids connus de l'or et de l'argent sous un volume donné, on trouve que son épaisseur est seulement $\frac{1}{259}$ de ligne, ou plus exactement $\frac{10}{517}$ de ligne. Mais, de quelle minceur ne doit pas être la couche d'or qui la recouvre, et qui est étendue sur ses deux surfaces et sur ses côtés? En partant des dimensions précédentes, on trouve que l'épaisseur de cette couche est $\frac{1}{59412}$ de ligne; et, comme on fait des fils dorés où l'on emploie encore trois fois moins d'or que dans notre supposition, c'est-à-dire seulement deux onces, il s'ensuit que la petite couche d'or n'a plus alors qu'une épaisseur trois fois moindre, c'est-à-dire égale à $\frac{1}{178236}$ de ligne. Cependant cette couche forme alors même un corps continu dont les parties tiennent encore ensemble. Car, si l'on plonge un bout de la lame dans l'acide nitrique, qui a la propriété de dissoudre l'argent sans pouvoir dissoudre l'or, la lame intérieure, qui est d'argent, est en effet dissoute; mais la lame d'or reste, comme un petit fourreau creux, dont les parties sont encore unies, et semblent contiguës, au moins pour nos sens: et pourtant, dans cet état d'atténuation, cette petite couche conserve toutes les propriétés qui caractérisent l'or; elle résiste aux agens chimiques auxquels l'or en masse résiste; elle cède à ceux auxquels il cède, et forme avec eux des combinaisons dont toutes les propriétés sont absolument pareilles.

Elle n'a donc point changé de nature pour avoir été ainsi divisée ; et même on peut prouver qu'un si haut degré d'atténuation n'a pas encore décomposé des groupes de parties d'une dimension bien plus grossière que ne le peuvent être les dernières particules. Car tous les corps connus, lorsqu'on peut les amincir à un certain degré, auquel cependant leur nature et leur constitution ne sont pas encore altérées, acquièrent la propriété de réfléchir à l'œil des couleurs différentes, selon l'épaisseur qui leur reste ; donc, puisque la petite couche d'or laminée conserve la même couleur qu'elle avait d'abord, après avoir subi une extension si prodigieuse, il en faut conclure que son amincissement, dans cet état, n'a pas même encore apporté de changement sensible dans la profondeur à laquelle la lumière y pénètre ; de sorte, que, à cet égard, ce que nous appelons sa minceur produit encore les mêmes effets que produirait une épaisseur infinie.

On observe une pareille constance de propriétés dans les fils de platine d'une finesse extrême, que l'on obtient à l'aide du procédé suivant, imaginé par M. Wollaston. On fixe un gros fil de platine dans l'axe d'un moule cylindrique creux que l'on achève de remplir avec de l'argent en fusion, qui se solidifie autour du fil. Ensuite, on tire le tout à la filière ; puis on fait dissoudre l'argent par l'acide nitrique bouillant qui n'attaque point le platine, et l'on trouve au centre le fil de ce métal que le tirage a excessivement aminci. Les fils ainsi formés, n'ont quelquefois pas plus de $\frac{1}{1200}$ de millimètre de diamètre ; ils sont à peine visibles à la vue simple ; cependant ils conservent toutes les propriétés mécaniques et chimiques qui caractérisent le platine en masse. Non-seulement leurs particules continuent de rester agrégées, mais elles se tiennent assez pour résister à des forces de traction mesurables. Un pareil fil ayant en diamètre $\frac{1}{708}$ de millimètre, soutient un poids de 86 milligrammes sans se rompre ; et, si l'on compare ce faible poids à sa grosseur, on trouve que, pour qu'il soit capable de cet effort, il faut que la force d'agrégation de ses parties surpasse celle du platine en masse, et se soit ainsi augmentée par le tirage à la filière. Et, non-seulement l'union des par-

ties, mais leur couleur primitive, et toutes les propriétés chimiques du platine, s'y trouvent complètement conservées. On peut impunément les échauffer jusqu'à les faire rougir, par la transmission d'un courant électrique, d'une énergie proportionnée à leur petitesse; ils rougissent et reviennent à leur état ordinaire, sans s'être combinés avec les principes de l'air ambiant, pas plus que n'aurait fait dans des circonstances analogues un morceau plus gros du même métal.

Les épreuves précédentes offrent à-peu-près la limite de subdivision que peuvent fournir les procédés des arts mécaniques. Leur inutilité doit donc nous faire conclure que ces procédés, quelque délicats qu'ils nous paraissent, ne nous montrent encore que des masses, dont la nature et les propriétés sont absolument identiques avec celles des masses les plus grossières.

Au reste, nous ne devons plus nous étonner de leur impuissance, quand nous reconnaitrons que des subdivisions infiniment plus subtiles, nous tiennent encore presque aussi éloignés du but que nous nous étions flattés d'atteindre. C'est ce dont on découvre mille preuves, quand on examine les détails de la construction des êtres organisés; comme il suffit d'indiquer ici ce genre de considérations, je n'en rapporterai que deux exemples.

Réaumur a observé que les fils de l'araignée proviennent d'une matière visqueuse, contenue sous la forme d'une grosse larme dans le corps de cet insecte, qui peut la faire jaillir à volonté par six mamelons placés sous son ventre. Le bout de ces mamelons est percé de trous, par chacun desquels sortent autant de fils qui, d'abord simples, s'agglutinent ensuite les uns aux autres, en vertu de leur viscosité primitive, et bientôt se durcissant ensemble à l'air, composent les fils plus grossiers que nous observons. Maintenant, le bout de chaque mamelon, à peine gros comme une tête d'épingle, peut donner ainsi naissance à plus de mille fils simples, dont chacun a sa filière à part, où il se moule avant de sortir. Or, ces filières, d'une finesse si prodigieuse, ont leurs parois intérieures organisées et vivantes; c'est-à-dire que leurs parties

sont agrégées régulièrement, suivant des arrangemens prescrits, et de manière que leur ensemble ait une certaine configuration, qui le rend apte à l'usage auquel l'animal l'emploie. Chacun de ces canaux est donc encore, dans sa petitesse, un corps composé, qui agit par l'ensemble de ses parties comme les organes des plus grands animaux, et qui est aussi éloigné qu'eux d'offrir les particules matérielles dans un état de séparation et d'isolement.

Il existe d'autres animaux d'une petitesse telle, qu'ils échappent tout-à-fait à notre vue, de sorte que nous ne pouvons découvrir leur existence qu'à l'aide de microscopes très-puissans. On en trouve constamment dans l'eau, le vinaigre et une foule d'autres substances, lorsqu'elles ont été exposées à l'air libre pendant quelques jours. Si l'on prend une goutte de ces substances, et qu'on la regarde avec le microscope, on y voit une multitude de ces petits animaux s'y mouvoir en tous sens, comme dans une grande mer, avec une extrême vivacité. A quelques-uns, on aperçoit des espèces de nageoires qu'ils agitent sans cesse; d'autres ont la tête ornée de panaches vibratiles; il en est qui sont couverts d'une enveloppe écailleuse, comme les écrevisses; d'autres ressemblent à de longues anguilles, qui serpentent en avant, en arrière, avec une égale facilité. On en voit dont le corps est si transparent, que l'on y découvre des vaisseaux qui battent comme notre cœur, et dans lesquels s'écoulent des liquides colorés. Quelle doit être la prodigieuse finesse de ces canaux, la liquidité des fluides qui les parcourent si vite, la ténuité des tégumens qui forment leurs parois! de quelle inconcevable délicatesse doit être leur construction, et celle de tant d'autres organes, qui servent au mouvement, à la respiration et aux autres fonctions de la vie de ces petits êtres! Cependant ces organes existent, avec des formes déterminées, et qui se transmettent constamment dans la même espèce de génération en génération. Ainsi, à ce degré de petitesse qui nous semble si prodigieux, parce qu'il est si éloigné des dimensions qui nous sont les plus familières, il existe encore des systèmes vivans, organisés aussi soigneusement que nos corps mêmes, et dont

les parties constituantes sont ainsi bien éloignées encore de se montrer à nous dans un état de séparation et d'isolement. Ce nouvel univers presque imperceptible est même si semblable au nôtre, pour les merveilles de l'organisation des êtres qui l'habitent, que nous pouvons penser avec vraisemblance qu'en l'observant nous n'avons pas fait un pas sensible vers l'observation individuelle des particules matérielles, et que, très-probablement, les dimensions absolues de ces particules sont encore beaucoup plus petites, comparativement aux animaux infusoires, que ceux-ci ne le sont comparativement aux éléphants et aux baleines.

Mais, de ce que la subdivision des corps ne nous fait rien connaître sur la constitution de leurs dernières parties, on n'en doit pas conclure que la forme et la nature de ces parties nous sont indifférentes, et qu'elles n'exercent aucune influence sur les propriétés que chaque corps composé manifeste. Ce serait mal raisonner que de tirer de l'insuffisance de nos épreuves cette conclusion absolue. Elles laissent évidemment la question tout entière, sans en affaiblir en rien l'importance. Ainsi, bien loin de l'abandonner comme inutile, ou comme impossible, il nous faudra rechercher avec soin, dans les phénomènes, toutes les indications qui pourraient servir à l'éclaircir. Car, bien que nous soyons hors d'état d'extraire et d'isoler les dernières parties des corps, il se pourrait que leur forme ou leur nature exerçât, dans quelque circonstance, une influence observable, et se fit ainsi sentir par ses effets; de même que la forme aplatie du sphéroïde terrestre se fait sentir dans les mouvemens que lui impriment les attractions de la lune et du soleil, d'où résulte le phénomène observable de la précession des équinoxes. Or, on verra, dans le cours de cet ouvrage, plusieurs phénomènes qui semblent dépendre d'une pareille cause. Il s'en présente dans le mode de dilatation de certains liquides, dans l'acte de leur solidification. Il s'en présente de plus frappans encore dans la cristallisation des sels; et, comme l'observation en est si simple, qu'elle peut servir de preuve directe, j'en exposerai ici tous les détails. Lorsqu'un sel est dissous dans une quantité d'eau suffisante, ses parties

solides se disséminent parmi celles de l'eau, de manière à cesser tout-à-fait d'être visibles, ou plutôt elles se combinent avec ces parties, de manière que le tout ensemble forme un liquide transparent d'une constitution uniforme. Mais, si l'on chauffe suffisamment ce liquide, la tendance de l'eau pour se convertir en vapeurs fait qu'une certaine portion prend ce nouvel état, et s'échappe en abandonnant les particules salines. Lorsque cette évaporation a suffisamment réduit la quantité totale de l'eau, ce qui reste ne pouvant plus suffire à dissoudre tout le sel, une portion de celui-ci se sépare de la dissolution, et reparaît à l'état solide. Or, quand cette opération est conduite avec lenteur, et que la dissolution n'est point agitée pendant que la séparation s'opère, les parties salines qui reparaissent ne forment point, au moment de leur apparition, des agglomérations confuses; ce sont de petits corps terminés par des surfaces planes, et dont les formes sont toujours les mêmes pour chaque sel, quoique diverses pour des sels différens. Ces petits solides régulièrement terminés sont ce que l'on appelle des cristaux. Si l'on en remarque un, séparé des autres, et qu'on l'examine avec soin pendant quelque temps, on le voit progressivement augmenter de volume, quoiqu'il conserve toujours sa forme première; de sorte que les nouvelles parties salines qui viennent s'attacher à lui s'arrangent dans un ordre tel, qu'en le faisant croître, elles entretiennent la régularité de plans qui le terminent, et n'en changent point les inclinaisons mutuelles. Cette superposition se fait quelquefois d'une manière à-peu-près égale pour toutes les faces, et quelquefois inégale; cela dépend de la position du cristal dans la masse liquide, et de l'accès plus ou moins libre que ses diverses faces offrent aux parties salines qui se séparent successivement de la dissolution; tellement qu'en tournant le cristal et le posant sur un côté ou sur un autre, on peut faire croître à volonté telle ou telle face. Mais, voici un phénomène encore plus remarquable : lorsque le cristal a atteint une certaine grosseur, supposons qu'on le retire, et que l'on casse un de ses angles : cela donnera, pour l'ordinaire, une fracture dont la surface sera irrégulière et inégale.

Or, après l'avoir ainsi tronqué, si on le replace dans la dissolution, les anfractuosités de la fracture se rempliront peu-à-peu, et sa surface se rétablira aussi plane et aussi bien terminée qu'auparavant : elle se rétablira, avec la même symétrie ou le même défaut de symétrie, qu'elle avait précédemment, par rapport aux autres faces. Il faut donc que les particules salines qui composent les surfaces du cristal, et celles qui constituent l'intérieur de sa masse même, soient semblables entre elles; et, de plus, qu'elles se soient arrangées les unes à côté des autres, suivant une même loi, puisque, dans chaque sens où on les découvre, leur ensemble exerce toujours une même action sur les molécules salines qui se précipitent, et les contraint de venir se joindre aux parties découvertes, de manière à reproduire le même mode précis d'accroissement que l'on a détruit. Cette idée s'accorde parfaitement avec un autre fait fort remarquable; c'est que, lorsqu'une dissolution saline est amenée tout près du point de condensation où elle doit commencer à cristalliser, si l'on y jette un petit cristal du même sel, déjà formé, la présence de ce corps détermine aussitôt la séparation et la cristallisation d'une certaine quantité de particules salines; comme si les surfaces du cristal introduit exerçaient sur ces particules une action qui les contraignit d'abandonner le liquide avec lequel elles n'avaient plus qu'une combinaison très-faible. Ces influences mécaniques des particules matérielles ne s'observent pas seulement dans les substances que nous pouvons faire cristalliser; on en retrouve des indices évidens dans une foule de corps que la nature nous présente souvent à l'état de cristaux tout formés. Ces corps, dont quelques-uns sont d'une dureté extrême, présentent presque toujours certaines directions de plans, suivant lesquelles il est très-facile de les fendre, ou, selon l'expression technique, de les *cliver*; et les surfaces de *clivage*, qui étaient invisibles avant leur désunion, offrent quelquefois un poli si brillant et si parfait, que l'on ne pourrait jamais l'imiter par l'art. De plus, celles de ces surfaces qui sont dirigées en des sens différens forment toujours entre elles des angles parfaitement constans dans le même minéral, toutes les fois que sa consti-

tution chimique n'est point altérée. De sorte que, lorsqu'on a ainsi déterminé, par expérience, tous les sens de clivage dont un minéral est susceptible, on a autant de conditions auxquelles doivent satisfaire le solide ou les solides géométriques qui ont pu engendrer, par leur superposition, les cristaux observés; et l'on trouve encore d'autres caractères de ces solides générateurs dans l'inclinaison mutuelle des surfaces planes par lesquelles les cristaux se terminent, puisque chacun de ces plans doit évidemment présenter, sur tous ses points, le solide générateur dans une position pareille. On parvient ainsi à déterminer complètement, par le calcul, la forme de ce solide, ou au moins celle d'un solide par la superposition duquel le cristal a pu être formé. Alors on trouve que le même solide, en variant seulement la loi de son apposition, peut également fournir tous les cristaux observables du minéral pour lequel on l'a conclu, de sorte que l'on en déduit ainsi, *à priori*, les inclinaisons mutuelles, de leurs surfaces terminales, lesquelles sont quelquefois extrêmement variées. C'est ce que M. Haüy a développé de la manière la plus complète, dans son *Traité de Minéralogie*. Maintenant, de tous ces phénomènes bien constatés, il paraît impossible de ne pas conclure que les plus petites parties de chaque minéral cristallisable ont une composition et une configuration déterminées, en vertu desquelles elles agissent les unes sur les autres, d'une certaine manière qui leur est propre, et qui détermine le mode de leur apposition mutuelle. Or, tous les corps solides connus sont susceptibles de cristalliser, car tous se rencontrent plus ou moins communément à l'état de cristaux; et, s'ils paraissent quelquefois n'être point dans cet état, il faut faire attention que nous les considérons toujours en masse d'un volume quelquefois considérable; et que, pour qu'une grosse masse paraisse cristallisée, il faut que les circonstances qui ont déterminé sa précipitation aient été continuées avec une parfaite constance pendant tout le temps qu'elle a eu lieu; ce qui doit être un cas d'autant plus difficile à réaliser, et par conséquent d'autant plus rare à rencontrer, que la masse que l'on considère est plus grosse. D'où l'on est conduit à penser que les mêmes corps

qui ne nous semblent pas cristallisés quand nous les considérons ainsi en masse, pourraient bien être cristallisés dans leurs élémens, c'est-à-dire composés de très-petits cristaux agrégés les uns aux autres par des faces diverses, sans aucune régularité. Alors les observations faites sur les cristaux réguliers, d'un volume sensible, deviennent applicables aux petites parties de tous les corps quelconques, et nous décèlent la constance de leur constitution et de leur forme, dans chaque substance, par la constance de leurs actions.

Les métaphysiciens et les physiciens même ont beaucoup discuté entre eux, si cette divisibilité de la matière était ou n'était pas possible à l'infini. On voit, d'après ce qui précède, que cette question est absolument sans application pour nous. Si l'on veut parler d'une divisibilité abstraite et géométrique, il n'y a aucun doute qu'elle ne s'étende indéfiniment. Car, quelque infiniment petite que l'on suppose une particule, par cela seul qu'elle sera étendue, on pourra toujours concevoir son étendue divisée en deux moitiés, chacune de celles-ci en deux autres, et ainsi de suite à l'infini. Mais, si l'on veut parler d'une divisibilité réelle et physique, nous ne pouvons rien prononcer d'absolu, puisque aucun des procédés dont nous avons l'usage ne peut nous mettre en état d'isoler les particules mêmes des corps, et de les attaquer individuellement. Il paraît néanmoins, par les résultats, que, sur notre globe, les molécules matérielles ne se brisent point, ni ne s'altèrent, ni ne se transmutent les unes dans les autres. Car, quelque opération chimique qu'on leur fasse subir, quelles que soient les combinaisons où on les engage, et les assimilations qu'on leur fasse éprouver de la part des corps vivans, elles en sortent toujours avec leurs propriétés originelles. La variété infinie d'actions de ce genre qui ont agi sur elles depuis que le monde existe, paraît n'avoir produit aucune altération dans ces propriétés.

Mais, comment un pareil système de particules peut-il exister agrégé en forme de masses solides et résistantes, comme nous voyons que le sont un grand nombre de corps, et tous même, quand ils sont convenablement éprouvés? On

verra , dans le cours de cet ouvrage, que cet état est produit et maintenu par des forces naturelles dont toutes les particules des corps sont animées , et qui les font tendre mutuellement les unes vers les autres , *comme par attraction*. Mais, si ces forces existaient seules, les particules s'approcheraient jusqu'au contact , c'est-à-dire , jusqu'à ce qu'elles s'arrêtassent mutuellement par l'effet de leur propre impénétrabilité ; ce qui n'est certainement pas leur état actuel , puisqu'elles conservent dans tous les corps assez de liberté pour pouvoir encore être rapprochées ou éloignées davantage. Aussi trouverons-nous qu'il existe une cause générale de répulsion intérieure , par laquelle toutes les forces attractives sont continuellement balancées. Cette cause, qui réside dans tous les corps de la nature , paraît être produite par le principe de la chaleur. Les particules de chaque corps, sollicitées à-la-fois par ces deux genres de forces contraires , se mettent naturellement dans l'état d'équilibre qui résulte de leurs énergies compensées , et se rapprochent ou s'écartent , selon que les forces extérieures auxquelles on les expose , favorisent l'attraction ou la répulsion. C'est ainsi que les astres qui composent notre système planétaire , se meuvent et oscillent continuellement dans les ellipticités variables de leurs orbites , sans que le système se détruise , et que l'équilibre général soit rompu. De ces divers états d'équilibre des corps , résultent , comme nous le verrons par la suite , toutes les propriétés secondaires et variables , telles que *l'état aériforme , la liquidité , la solidité , la cristallisation , la dureté , l'élasticité , etc.*

Dans tous ces phénomènes , les molécules matérielles se comportent comme autant de masses absolument *inertes* , c'est-à-dire dépourvues de toute espèce de spontanéité. Elles peuvent être mues , déplacées , arrêtées , par des causes extérieures étrangères à elles-mêmes ; mais jamais nous n'y pouvons découvrir aucune trace d'une volonté propre et libre. Si la bille qui roule sur le tapis d'un billard , en vertu de l'impulsion qu'on lui a donnée , ralentit peu-à-peu la vitesse de son mouvement et enfin s'arrête , c'est uniquement par l'effet de la continuelle résistance que lui opposent

les aspérités du drap sur lequel elle frotte, et les molécules de l'air à travers lequel elle se meut. Rendez le drap plus doux, la même impulsion fera mouvoir plus long-temps la bille; substituez-y un plan de marbre poli, et des bandes formées par des fils métalliques tendus dont l'élasticité soit plus parfaite, la durée du mouvement deviendra incomparablement plus grande, ce qui indique qu'elle serait indéfinie, si les obstacles étaient tout-à-fait ôtés. La pierre que nous lançons du haut d'une tour, et qui, sollicitée en même temps par cette impulsion, et par la pesanteur, va tomber à une certaine distance, use de même progressivement sa vitesse horizontale en la partageant avec les molécules d'air qu'elle choque, et les refoulant les unes sur les autres. Mais concevez que cet air n'existât point, et que la force de l'impulsion fût assez énergique pour éloigner la pierre de la terre, par son mouvement tangentiel, autant que la pesanteur tend à la faire descendre à chaque instant, la pierre alors décrirait un cercle autour de la terre; et, comme rien ne l'arrêterait dans son cours, elle circulerait ainsi éternellement. C'est là en effet ce qui arrive à la lune, que nous savons se mouvoir dans le vide autour de la terre; et nous voyons également se perpétuer les mouvemens des autres corps planétaires qui parcourent de même un espace dépourvu de toute matière résistante. Tout nous porte donc à croire que la matière ne peut, par elle-même, se donner ni s'ôter le mouvement ou le repos, et qu'une fois dans l'un ou l'autre de ces états, elle y persévérerait éternellement, si aucune cause étrangère ne venait agir sur elle. Cette indifférence, ce défaut de spontanéité, a reçu le nom d'*inertie*. Une seule classe de corps semble y faire exception, ce sont ceux des êtres que l'on appelle animés, qui se meuvent ou s'arrêtent par l'effet d'une volonté intérieure. Mais, dans ceux-là encore, les molécules matérielles qui composent leurs parties, et leurs parties mêmes sont absolument inertes. C'est leur ensemble qui possède la qualité d'être animé; séparées, elles ne vivent plus, et rentrent dans les lois ordinaires de tous les autres corps. Nous sommes dans une obscurité absolue sur la cause de cette différence, et nous

ignorons complètement ce qui détermine l'état de vie ; mais, voyant dans toutes les autres circonstances la matière dépourvue de spontanéité, et reconnaissant que, même dans les êtres vivans, elle perd encore cette faculté par la mort et par le sommeil, nous sommes conduits à la regarder comme étrangère à son essence, et, ramenant ce cas aux lois ordinaires, nous concevons la volonté des êtres animés comme l'acte d'un principe intérieur et immatériel qui réside en eux. A la vérité, nous ne pouvons pas dire dans quelle de leurs parties ce principe réside ; ni en quoi il consiste ; encore moins comment, immatériel, il peut agir sur la matière. Mais, pour peu que nous ayons réfléchi sur nous-mêmes, et que nous ayons observé avec quelque attention les œuvres de la nature, ces obscurités, malheureusement trop ordinaires où nous laisse l'imperfection de nos connaissances, ne doivent jamais être pour nous le fondement d'une objection contre l'essence des choses que nous sommes toujours réduits à ignorer. Ainsi nous agissons philosophiquement, dans cette circonstance comme dans toute autre, en nous rapprochant des analogies, et en faisant dépendre le mouvement des corps animés d'une cause étrangère à leur matière, puisque nous trouvons la matière inerte dans tous les autres cas où nous pouvons l'éprouver. On apporte encore, dans les écoles de philosophie, une autre raison pour attribuer la spontanéité à un principe immatériel : c'est que la volonté, par la nature même de ses actes, ne peut émaner que d'un être simple, et par conséquent, ne peut pas appartenir à un être essentiellement composé, ou au moins divisible et décomposable, comme la matière ; mais ce motif métaphysique sortant de nos considérations ordinaires, nous nous bornerons à l'énoncer. Pour toutes les recherches expérimentales, il nous suffira d'admettre l'immatérialité du principe de la volonté comme une distinction fondée sur l'analogie, et l'*inertie* de la matière comme une propriété générale dans l'état actuel de l'univers.

L'expérience fait découvrir encore dans la matière plusieurs autres propriétés également contingentes, c'est-à-dire, qui

semblent n'être pas absolument indispensables pour que les corps matériels se manifestent à nos sens, mais dont cependant la connaissance est très-importante, parce qu'on les trouve toujours unies avec les conditions primitives de la matérialité; de sorte qu'elles peuvent suppléer à ces conditions dans un grand nombre de circonstances où il devient impossible de les observer. Telle est, par exemple, *la pesanteur*. Parmi les corps naturels, dont on peut constater la matérialité, on n'en trouve absolument aucun qui ne soit pesant, c'est-à-dire, qui ne tende à tomber vers le centre de la terre, quand on l'abandonne à lui-même. Puis donc que ces deux propriétés, la matérialité et la pesanteur, paraissent s'accompagner toujours, la présence de l'une nous suffit pour juger par induction que l'autre existe. Ainsi, quoique nous ne puissions ni voir ni toucher l'air, comme nous voyons et touchons les autres corps, cependant nous pouvons juger que c'est une substance matérielle, parce qu'il est pesant, coercible dans des vases, et qu'il produit beaucoup d'autres phénomènes, tous pareils à ceux qu'un fluide pesant doit produire. L'examen approfondi de ces propriétés nous apprend ensuite qu'il existe des airs d'espèces très-diverses, qui sont tous autant de substances essentiellement distinctes les unes des autres par les actions qu'ils font éprouver aux autres corps, et par celles que ceux-ci exercent sur eux.

L'attraction est encore une de ces propriétés contingentes qui supplée aux témoignages immédiats des sens. J'ai dit plus haut que les particules de tous les corps connus agissaient les unes sur les autres par des forces attractives et répulsives; réciproquement, quand on peut démontrer l'existence ou l'action de ces forces générales dans un principe inconnu, on en conclut que ce principe est matériel. Ainsi, *la lumière* n'est pas tangible; on ne peut y reconnaître l'étendue; elle n'est point pondérable, du moins à nos balances; elle est si subtile qu'elle échappe à tous les moyens par lesquels nos sens pourraient la saisir. Mais, en lui faisant traverser des corps transparents, nous trouvons qu'elle se plie et se courbe dans son trajet à travers ces corps, précisément comme si elle était

repoussée par une force émanée de leur surface, et attirée ; au contraire, dans leur intérieur par les molécules qui les composent. Nous savons aussi qu'elle emploie un certain temps, très-petit, mais mesurable, à se transmettre des corps lumineux jusqu'à nous. Enfin, en soumettant ses rayons à certaines épreuves, nous trouvons que les corps transparents les brisent et les plient autrement par certains côtés que par d'autres. Cet ensemble de propriétés peut donc nous porter à conclure que la lumière est une substance matérielle, composée de particules extrêmement petites, dont la forme est symétrique par certaines faces qui sont susceptibles d'attraction et de répulsions particulières, et enfin qui se meuvent dans le vide ou dans les corps transparents avec une vitesse donnée et déterminable. Mais, quoique cette constitution de la lumière satisfasse à un grand nombre de phénomènes, toutefois il en est que l'on n'a pas pu jusqu'à présent en déduire ; d'où il suit qu'on ne peut pas la considérer comme une chose absolument certaine.

Il est encore d'autres principes qui agissent sur les corps matériels, sans être ni visibles, ni tangibles, ni pondérables à aucune balance, qui même ne semblent pas offrir à nos sens autant de caractères matériels que la lumière, et relativement auxquels on a cependant des raisons aussi fortes, et plus fortes peut-être, pour croire qu'ils sont aussi des corps. Tels sont les principes inconnus des deux *électricités* que l'on appelle résineuse et vitrée. Rien jusqu'ici d'absolument matériel n'a été démontré dans ces principes ; ils n'ont pas de poids appréciable, et aucun phénomène n'y rend l'impénétrabilité sensible. A la vérité, si des quantités distinctes de chacun d'eux sont mises en présence l'une de l'autre, elles se repoussent quand leur nature est la même, et s'attirent quand elle est différente ; mais c'est entre eux-mêmes seulement que ces actions s'exercent. Lorsqu'ils se partagent entre des corps matériels, d'un volume sensible, ils semblent obéir uniquement aux forces de ce genre qui leur sont propres, sans que la nature chimique des substances y ait aucune influence appréciable. Néanmoins, dans leur distribution sur les corps, et dans leurs

irruptions de l'un à l'autre à travers les obstacles qui les séparent, ils se comportent d'une manière si exactement conforme aux lois ordinaires de la mécanique des fluides, qu'on peut, en les leur appliquant, calculer d'avance, avec la dernière précision, les moindres détails des phénomènes. De là il devient très-vraisemblable que les principes électriques consistent réellement dans de pareils fluides, et qu'ils sont par conséquent matériels. Les mêmes probabilités s'appliquent aussi aux deux principes *magnétiques*, que l'on peut développer dans divers métaux.

On a moins de données encore sur la matérialité du principe de la chaleur, que l'on appelle *le calorique*. Non-seulement il manque, comme les précédens, des propriétés sensibles qui caractérisent la matière, mais encore les lois de son mouvement, de son équilibre n'étant point complètement connues, on ne peut pas même lui appliquer de semblables probabilités. En le suivant par les expériences, on le voit se répandre dans les corps, passer de l'un à l'autre, s'y fixer, s'en dégager, modifier la disposition, les distances, les propriétés attractives de leurs particules. Mais rien de tout cela ne démontre invinciblement que ce principe soit lui-même un corps. Le plus fort indice que nous en ayons peut-être, consiste dans quelques analogies récemment découvertes entre les propriétés rayonnantes de la chaleur et de la lumière, lesquelles tendent à faire croire que les principes producteurs de ces deux sensations peuvent graduellement se changer l'un dans l'autre, c'est-à-dire, acquérir ou perdre successivement les modifications avec lesquelles ils produisent en nous la sensation de la vision ou de la chaleur. Le développement de ces analogies est un objet de recherche des plus importans.

Ce sont là les seuls principes actifs qui, jusqu'à présent, paraissent déterminer les phénomènes naturels; mais il est fort possible qu'il en existe beaucoup d'autres dont la subtilité échappe à nos procédés actuels d'expérience. C'est en perfectionnant ces procédés, en leur donnant plus de précision, en cherchant et inventant des indicateurs plus sensibles, que nous parviendrons à étendre notre pouvoir sur les agens naturels, et

à découvrir ceux qui nous ont pu être jusqu'à présent cachés.

L'objet principal de la physique est de constater par des expériences exactes, et de représenter par des lois générales, les modifications accidentelles et passagères qui peuvent être produites dans les corps matériels par les divers principes que nous venons de désigner. Car ces modifications, sans dénaturer les corps qu'elles affectent, changeant néanmoins presque toujours les actions qu'ils peuvent exercer entre eux et sur les autres substances, il faut nécessairement les déterminer et les mesurer avant de porter ses regards sur les phénomènes de composition et de décomposition auxquels l'action réciproque des corps peut donner lieu. C'est ainsi que l'étude de la physique est utile à la chimie, à la médecine, à la physiologie, soit végétale, soit animale, et doit nécessairement les précéder.

CHAPITRE II.

Notions fondamentales : espace, repos, mouvement, force.

ON vient de voir, dans le précédent chapitre, que tous les corps d'une étendue sensible, dont la matérialité peut être immédiatement constatée, consistent dans l'assemblage d'une multitude de particules matérielles extrêmement petites, dont le seul mode d'agrégation divers fait que le corps est solide, liquide, ou gazeux. Nous avons aussi exposé les motifs qui doivent nous faire considérer ces particules comme des masses inertes, incapables de se modifier spontanément elles-mêmes, et susceptibles seulement d'obéir aux causes extérieures qui peuvent les solliciter; soit qu'en effet, comme les observations l'indiquent, le défaut de volonté et de spontanéité forme un caractère général et essentiel de la matière; soit que, par une abstraction de notre esprit, nous lui ôtions ces propriétés si quelquefois elles se présentent unies avec elle, pour considérer isolément l'ensemble de celles qui lui restent après qu'elle en est dépouillée. Or, les molécules matérielles

étant ainsi envisagées dans l'état inerte, il en résulte dans les phénomènes que leur agrégation présente, certaines conditions nécessaires qui s'appliquent à tous les corps, indépendamment de la nature chimique de leurs parties constituantes, comme étant de simples conséquences de leur matérialité. Telles sont les *lois générales de l'équilibre et du mouvement* que l'on déduit en effet mathématiquement de la seule propriété de l'inertie. Quoique cette déduction ne puisse être démontrée ici, étant fondée toute entière sur le calcul, nous devons néanmoins en énoncer les résultats principaux. Car, d'après ce qui vient d'être dit, on sent qu'ils doivent être d'une application constante et universelle dans l'étude des phénomènes naturels.

Mais pour cet énoncé, si simple qu'il puisse être, il nous faut arrêter avec précision certaines idées fondamentales, telles que celles de repos, mouvement, force. Nous avons à la vérité déjà employé ces expressions, comme faisant partie de l'usage ordinaire; il devient à présent nécessaire de leur donner, pour toujours, un sens fixe et assuré. Commençons par définir le lieu où les phénomènes se produisent. Pour cela, concevons un espace sans bornes, immatériel, immuable, et dont toutes les parties, semblables entre elles, soient librement pénétrables à la matière. Qu'il existe ou non, dans la nature, un pareil espace, peu nous importe; il figure seulement pour nous l'étendue abstraite et indéfinie. Plaçons-y les molécules, éléments matériels des corps, et considérons d'abord en elles le seul fait de leur existence. Ce simple fait sera susceptible de deux modifications distinctes; il se pourra que la même molécule persiste invariablement dans son lieu actuel, ou que, par l'influence de causes extérieures, elle le quitte pour passer dans quelque autre partie de l'espace. Le premier de ces deux états constitue le *repos absolu*, le second, le *mouvement*.

Mais nous pouvons concevoir encore que deux ou plusieurs molécules soient déplacées simultanément d'un mouvement commun, en gardant l'une à l'égard de l'autre leurs positions respectives. Alors, si on les considère dans leurs rapports avec l'espace immuable, elles seront réellement en mouvement

absolu ; mais si on les considère uniquement dans leurs rapports mutuels , ceux-ci resteront les mêmes que si le groupe entier était demeuré en repos ; et, s'il existait sur une d'elles un être intelligent qui observât toutes les autres, il ne pourrait, d'après cette observation seule, décider si le système total se meut ou ne se meut pas. Cette permanence de relations au milieu d'un mouvement commun , s'exprime par la dénomination de *repos relatif*. Tel serait le cas de plusieurs corps que l'on concevrait posés dans un bateau abandonné au cours d'une rivière tranquille. Tel est encore le cas de tous les corps terrestres lorsqu'ils restent invariablement fixés au même point du sol. Ils sont en repos entre eux ; mais la terre , qui tourne journellement sur elle-même , leur imprime une rotation commune , et en même temps , elle les emporte tous ensemble dans son orbite autour du soleil , lequel peut-être emporte à son tour la terre et tout le cortège des planètes vers quelque constellation éloignée. Le repos relatif est donc vraisemblablement le seul qui existe en effet dans ce système. C'est du moins le seul que nous puissions être assurés d'y observer.

Ceci nous conduit à faire une spécification analogue pour le mouvement , et à distinguer les *mouvements absolus* des corps, considérés relativement à l'espace immuable , d'avec les changemens de position relative qui peuvent survenir entre eux. Ces derniers se nommeront donc des *mouvements relatifs* , soit que celui des corps du système auquel on les rapporte se trouve lui-même en mouvement ou en repos. Par exemple les variations de position des astres, telles que nous les apercevons de la surface terrestre , ne sont pas des *mouvements absolus* , mais relatifs , parce que la terre à laquelle nous les rapportons comme à un centre fixe , a réellement un mouvement de rotation diurne , et un mouvement annuel de circulation autour du soleil. Même lorsque, par le calcul, nous arrivons à conclure de ces observations les *mouvements réels* des astres, tels qu'on les verrait du centre du soleil , nous ne pouvons pas encore affirmer que ce soient là les *mouvements absolus* , puisqu'il se peut que le soleil et tout notre système planétaire se déplacent ensemble dans l'espace.

D'après l'idée que l'expérience nous a donnée de l'inertie, nous devons envisager l'état de mouvement et celui de repos comme de simples accidens de la matière, qu'elle ne peut pas se donner à elle-même, et qu'elle ne peut pas changer une fois qu'elle les a reçus. Conséquemment, lorsque nous la voyons passer d'un de ces états à l'autre, nous devons concevoir ce changement comme produit et déterminé par l'action de causes extérieures. Ces causes, quelles qu'elles puissent être, se désignent généralement par le nom de *forces*. La nature nous en offre une infinité, qui sont, au moins en apparence, de différentes espèces; telles sont les forces produites par les muscles et les organes des animaux vivans, dont l'exercice dépend, pour un grand nombre, uniquement de leur volonté; telles sont encore celles que produisent les agens physiques, comme l'expansion des corps par la chaleur, leur condensation par le refroidissement, etc. Il y en a d'autres qui semblent inhérentes à certains corps, telle est, par exemple, l'attraction mutuelle de l'aimant et du fer, ou celle qui s'exerce entre les corps électrisés. Ce sont encore des forces du même genre qui produisent la chute des corps vers le centre de la terre, les affinités chimiques, et la tendance des planètes vers le soleil. On ignore absolument la nature intime de ce genre de forces, et l'on ne saurait décider si elles sont étrangères à la matière, ou propres et attachées à son essence; néanmoins il est utile et philosophique de les en séparer par la pensée, afin de n'avoir plus à considérer dans la nature physique que des masses inertes sollicitées par des causes de mouvemens.

En outre, si nous observons d'abord des corps qui aient un volume sensible, leurs mouvemens ne seront pas, en général, des effets simples; mais ils seront les résultats composés de toutes les forces qui agissent simultanément sur leurs divers points. On voit donc que, pour analyser l'action même des forces, il faut nous débarrasser de cette complication: et c'est ce que nous ferons en considérant d'abord simplement une seule force, agissant sur un point matériel dont nous supposons le volume infiniment petit.

Dans ce cas on caractérise et on définit chaque force d'après

les circonstances particulières à son mode d'action. Il faut d'abord assigner le point matériel auquel elle est appliquée, et la *direction* suivant laquelle elle s'exerce. Il faut ensuite faire connaître son énergie, ou, suivant l'expression technique, son *intensité*. A cet effet, on choisit arbitrairement une certaine force dont on prend l'intensité pour unité, et on exprime par 1 celle de toute force *égale* à celle-là, c'est-à-dire, qui, étant appliquée en sens contraire au même point matériel, détruirait exactement l'effort de la première. On conçoit ensuite deux ou plusieurs forces pareilles, agissant ensemble, et dans un même sens, sur un même point matériel, et l'on dit que la force composée qui en résulte a une intensité double, triple, quadruple ou, en général, multiple de la première, selon le nombre de ces forces dont elle est formée; de sorte que les intensités se trouvent exprimées par ces nombres mêmes; ou, si l'on veut, on peut aussi les représenter par des lignes droites de diverses grandeurs, proportionnelles aux nombres qui les expriment. Il est vrai que, pour réaliser ces comparaisons et les appliquer, il faut savoir déterminer, pour chaque force, le rapport de son intensité avec l'énergie des mouvemens qu'elle est capable d'imprimer à un même corps. Nous considérerons plus tard cette nouvelle question; mais, en attendant, la seule définition du rapport des forces et de leurs intensités relatives, suffit pour fixer plusieurs lois générales qui s'observent constamment dans leur concours.

Enfin, pour achever de définir une force, il faut faire connaître si son action est subite et instantanée comme un simple choc qui ne se répète point, ou si elle est réitérée et durable comme la pesanteur qui, ainsi qu'on le verra par la suite, continue d'agir sur le corps qui tombe, avec autant d'énergie que lorsqu'il commence à se mouvoir. Ce second mode d'action peut évidemment se ramener au premier, en substituant à la continuité de la force une succession d'actions séparées les unes des autres par des intervalles de temps insensibles, et toutes égales entre elles si l'énergie de la force qu'il faut représenter est constante, ou progressivement variable d'intensité, si celle de cette force varie. Par

cet artifice , qui n'ôte rien à la rigueur des conséquences , on n'a plus à considérer que l'effet d'impulsions subites , imprimées à des molécules matérielles absolument inertes , soit en repos , soit en mouvement.

CHAPITRE III.

De l'équilibre produit par la composition de plusieurs forces appliquées à un même point matériel.

LORSQU'UNE seule force est appliquée à un point matériel libre , il est évident que ce point , en vertu de son inertie , doit se mouvoir suivant la direction de la force et sur son prolongement. Mais , lorsque plusieurs forces agiront simultanément sur un même point matériel , ou sur un système de pareils points , il se présente deux cas qu'il est nécessaire de distinguer. Il est possible que l'ensemble des forces agissantes communique des mouvemens au système ; mais il peut arriver aussi que leurs efforts s'entre-détruisent , et alors le système restera en repos. Le repos produit ainsi par la compensation de plusieurs forces actives , se désigne par le nom d'*équilibre* , pour le distinguer du repos inerte produit par l'absence de toute force motrice , quoique ces deux états ne diffèrent en rien quant aux apparences.

Le cas le plus simple de l'équilibre est celui de deux forces égales et appliquées , dans des directions opposées , à un même point matériel. Ce point se trouvant ainsi poussé ou tiré avec une énergie égale en deux sens contraires , restera évidemment en repos. Mais si les deux forces sont inégales en intensité , il se mouvra dans le sens de la plus énergique , comme s'il était uniquement sollicité par leur différence.

Le cas de l'opposition directe est le seul où deux forces , même égales , puissent se faire mutuellement équilibre. Dès que leurs directions font entre elles un certain angle , leurs efforts conspirent en partie , et le point matériel qu'elles sollicitent se met en mouvement dans un certain sens qu'il

s'agit de déterminer. Pour cela, commençons par le cas simple où les deux forces combinées auraient des intensités égales. Supposons que M , *fig. 1*, représente le point sur lequel elles agissent, et que les droites indéfinies MA , MB , désignent leurs directions, de M vers A , et de M vers B . Prenons sur ces droites deux portions égales MF , MF' , pour représenter les intensités des deux forces, conformément au mode d'évaluation expliqué plus haut. Il est évident que leur effort commun tendra à tirer le point M suivant une direction MC , moyenne et intermédiaire entre elles; car, puisqu'elles agissent symétriquement, et avec une énergie égale, de part et d'autre de cette ligne, il n'y a aucune raison pour qu'elles écartent le point de l'un ou de l'autre côté. Il reste maintenant à savoir quelle sera l'énergie de cet effort résultant de l'action simultanée des deux forces. Voici à cet égard la règle que le calcul démontre. Par l'extrémité F , F' , de chaque force, c'est-à-dire de la portion de droite qui la représente, menez une ligne droite parallèle à l'autre. Ces deux lignes couperont MC en un même point R , et la longueur MR représentera la *résultante* des deux forces MF , MF' ; c'est-à-dire que leur action simultanée sur le point M sera exactement égale à celle que produirait une seule force MR dirigée suivant MC . Conséquemment si, sur le prolongement de MC , on applique une nouvelle force MR' égale et opposée à cette résultante, l'action de celle-ci sera détruite; et le point M sera tenu en équilibre entre l'action simultanée des trois forces MF , MF' , MR' ainsi déterminées.

Dans le cas général où deux forces inégales agissent sur un même point matériel, la direction et la grandeur de leur résultante s'obtient encore de la même manière. Soient, comme tout-à-l'heure, MA , MB , *fig. 2*, les directions de ces forces, et M le point qu'elles sollicitent. Prenons, sur l'une et sur l'autre, des portions de droite MF , MF' proportionnelles à leurs intensités, et qui, par conséquent, seront inégales comme elles. Par les extrémités F , F' , de chaque force, menons une droite parallèle à l'autre; prolongeons ces droites jusqu'à ce qu'elles se coupent en un point R ; MR sera la longueur et

la direction de la résultante cherchée ; et, si on la porte sur la prolongement de MC en sens contraire, elle fera équilibre à l'action simultanée des deux forces MF , MF' . Cette construction est connue en statique sous le nom de *parallélogramme des forces*, et elle est, dans la physique, d'un usage continuel.

De même que l'on peut, par cette règle, composer deux forces en une résultante unique, on peut aussi, en considérant une force donnée comme résultante, la décomposer en deux autres, dont les directions soient assignées, c'est-à-dire trouver deux autres forces qui, agissant ensemble suivant ces directions, produisent un effet égal. Car soit, *fig. 5*, MA la direction de la force donnée, appliquée au point M , et dont l'intensité soit représentée par la longueur MF ; soient MC , MD les deux directions suivant lesquelles on demande de la décomposer : vous n'avez qu'à mener par le point F les droites Ff , Ff' , parallèles à ces directions ; et les longueurs Mf , Mf' représenteront les intensités des composantes demandées.

Si nous appliquons cette construction à chacune des deux forces MF , MF' de la *fig. 2*, en prenant pour directions des nouvelles composantes celle de la résultante MR et d'une ligne perpendiculaire, comme le représente la *fig. 4*, on trouve d'abord, suivant MR , les deux forces Mf , $M\phi$, qui, agissant dans le même sens, s'ajoutent en une seule égale à MR ; et l'on a ensuite dans l'autre sens les deux forces Mf' , $M\phi'$, qui s'entre-détruisent comme étant égales et dirigées en sens opposés. Il n'en résulte donc aucun effort pour déranger le point M de la direction MR , et voilà pourquoi cette direction se trouve être la résultante des deux forces MF , MF' .

Quels que soient le nombre et la direction des forces qui agissent sur un point matériel, on pourra, au moyen de la règle précédente, les composer toujours en une seule résultante, dont on trouvera la direction et l'intensité. Car d'abord, deux des composantes données étant considérées à part, pourront être composées en une résultante unique ; cette résultante, à son tour, pourra être composée de même avec une des forces restantes, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il ne reste plus de

forces à composer. Alors la dernière résultante à laquelle on parviendra, sera celle de toutes les forces proposées; et, en l'appliquant au point matériel dans un sens contraire à celui que la construction lui assigne, elle fera équilibre à toutes ces forces. Réciproquement, une force étant donnée, on pourra la considérer comme la résultante d'autant de forces que l'on voudra, dirigées dans des sens donnés; et, en reprenant la construction en sens inverse, on pourra, si l'on veut, la décomposer suivant toutes ces directions.

La résultante de deux forces qui concourent jouit d'une propriété qu'il importe de connaître, parce qu'elle a des applications extrêmement fécondes. Si d'un point quelconque C, *fig. 5*, pris partout où l'on voudra sur sa direction, l'on mène des lignes CP, CP', perpendiculaires aux directions des deux forces composantes, les longueurs de ces perpendiculaires sont toujours en raison inverse de l'intensité des forces vers lesquelles elles se dirigent. C'est-à-dire que si la force MF, par exemple, a une intensité représentée par 9, et que celle de MF' soit représentée par 5, CP sera à CP' comme 5 est à 9, étant moindre du côté de la plus grande force. Ceci se démontre aisément par la géométrie, et c'est une conséquence de la construction du parallélogramme par lequel la direction de la résultante se détermine. Il résulte de ce rapport, que, si l'on multiplie l'expression numérique de chaque force par la longueur de la perpendiculaire qui lui correspond, exprimée en parties de l'unité linéaire, ces deux produits seront les mêmes pour les deux forces. Par exemple, dans la *fig. 5*, où l'on a supposé la plus grande force MF représentée par 9, et la plus petite MF', par 5, la longueur CP est de 5 millimètres et celle de CP' est de 9; de sorte qu'en multipliant MF par CP, on a pour produit 45, de même qu'en multipliant MF' par CP'. En général, le produit d'une force MF par la longueur de la perpendiculaire abaissée d'un point quelconque C sur sa direction, s'appelle *le moment statique* de la force, par rapport à ce point-là. On verra plus tard que ce produit exprime l'énergie avec laquelle la force tendrait à faire tourner autour du point, supposé fixe, une verge rigide

CP perpendiculaire à sa direction. C'est pour cela que l'évaluation des *momens* a une si grande importance.

CHAPITRE IV.

De l'équilibre produit par la composition de plusieurs forces appliquées à divers points matériels liés entre eux invariablement.

Tous les corps que la nature nous présente étant composés de parties d'une étendue sensible, nous ne pouvons pas y vérifier par une application immédiate, les lois que nous venons de découvrir pour un seul point matériel, qui serait isolé dans l'espace. Mais il était indispensable de passer par cette abstraction, avant d'arriver aux phénomènes plus composés que présentent plusieurs points liés entre eux par une dépendance mutuelle, tels que ceux qui composent réellement les corps.

Dans ce cas, les forces appliquées à chacun des points du système ne bornent pas leur action à ce point. Elles la transmettent à toute la masse, en vertu des conditions qui rendent ses parties dépendantes les unes des autres, dans les positions qu'elles peuvent prendre et les déplacements qu'elles peuvent éprouver. Par exemple, s'agit-il d'un corps solide ? le caractère mathématique d'un pareil corps sera que toutes ses parties soient liées invariablement les unes aux autres, de manière à ne jamais se désunir ; et quoique, à la rigueur, il n'existe probablement aucun corps naturel qui jouisse de cette invariabilité dans un degré tout-à-fait invincible, on peut néanmoins les considérer comme tels, lorsque leur contexture résiste à l'action des forces auxquelles on les soumet. Or, la rigidité qui caractérise un pareil système exige évidemment que ses parties se transmettent mutuellement l'impression des forces qui sollicitent quelques-unes d'entre elles, puisqu'une quelconque étant poussée entraîne toutes les autres dans son mouvement. S'agit-il d'un corps liquide ? alors, l'impénétrabilité des diverses parties qui se

touchent, est la seule condition qui gêne leurs mouvemens, et qui règle la répartition des forces appliquées à chaque point de la masse entière. En général, toutes les conditions de liaison imaginables entre les parties d'un système matériel se réduiront toujours à ce que quelques-uns de ses points seront contraints de rester sur des surfaces ou sur des lignes données, ou dépendront les uns des autres dans leurs mouvemens, de manière qu'une des parties ne pourra changer de position suivant un sens, sans qu'une ou plusieurs autres n'éprouvent aussitôt des déplacements qui y correspondent. Tout cela pourrait s'imiter artificiellement, si l'on considérait le système comme composé de points matériels primitivement isolés et libres, puis secondairement liés entre eux par des cordons plus ou moins extensibles et flexibles, conformément à la nature des mouvemens qui leur sont permis. Alors, la liaison qui les rend dépendans se réduira toujours à des pressions ou des tractions exercées suivant ces cordons-là; dès-lors, le mouvement ou l'équilibre de chaque point du système se déterminera exactement comme s'il était libre, mais sollicité par l'ensemble de toutes ces forces; et la condition générale de l'équilibre ou du mouvement du système entier consistera en ce que toutes ces conditions individuelles puissent être remplies simultanément sans contradiction.

Appliquons ceci, par exemple, à l'équilibre d'un système rigoureusement solide, c'est-à-dire, dont toutes les parties seraient liées entre elles invariablement; et, pour nous borner à un cas simple, considérons celui où un pareil système se trouverait sollicité seulement par deux forces, situées dans un même plan et appliquées à deux de ses points; désignons ceux-ci par m , m' , *fig.* 6, et représentons par $m F$, $m' F'$, les directions et les grandeurs des deux forces proposées. Il est clair que la question serait résolue, si nous pouvions les ramener à avoir un même point d'application; car alors, leur composition s'effectuerait par notre règle générale du parallélogramme des forces. Or, nous arriverons là en considérant que le point d'application d'une force peut se transporter

arbitrairement en un point quelconque de sa direction, pourvu qu'on suppose ce nouveau point lié au premier par une verge rigide et inflexible qui transmette l'impression de la force de l'un à l'autre, en vertu de l'impénétrabilité de ses particules. Selon ce principe, prolongeons les directions des deux forces, mF , $m'F'$, jusqu'à ce qu'elles se rencontrent en un même point M , ce qui arrivera toujours, puisque nous les avons supposées comprises dans un même plan; puis, supposant le point M lié fixement au système, transportons-y nos deux forces MF , MF' , et construisons le parallélogramme $MFF'R$ sur les droites qui représentent leurs intensités. La diagonale MR exprimera la grandeur et la direction de la résultante cherchée. Prolongeons cette diagonale à travers le corps solide, et celui-ci sera sollicité exactement comme si la force MR lui était appliquée seule, en un quelconque des points situés sur sa direction.

Un cas semble échapper à notre solution; c'est celui où les directions des deux forces mF , $m'F'$ seraient exactement parallèles, *fig. 7*. Mais, comme la règle qui nous a servi est encore légitimement applicable à tous les degrés de petitesse de l'angle des deux forces, pourvu qu'on ne le suppose pas absolument nul, il s'ensuit, d'après la loi ordinaire de continuité des déterminations mathématiques, qu'elle subsiste encore à cette limite; et qu'il faut seulement, parmi ses résultats, choisir ceux qui, dans ce cas même, ne s'évanouissent point. Or, en reprenant les forces qui concourent, nous avons vu, en général, que si, d'un point quelconque C , *fig. 5*, pris sur la direction de la résultante CR , on mène des perpendiculaires CP , CP' sur les directions des deux composantes, les longueurs de ces perpendiculaires sont inverses de celles de la force vers laquelle elles se dirigent. Cette règle devra donc subsister encore lorsque les deux forces seront appliquées à un même corps solide, *fig. 8*. Or, la relation qu'elle prescrit est tout-à-fait indépendante de l'angle plus ou moins aigu que forment les directions des deux forces. Ainsi, on peut l'appliquer au cas même où elles seraient parallèles. Alors cette condition suffit pour trouver la position de leur résultante. Car on n'a qu'à mener une droite PP' ,

fig. 7, perpendiculaire aux directions des deux forces données, puis diviser cette droite en deux portions CP , CP' réciproques aux intensités de ces forces ou des lignes mF , $m'F'$ qui les représentent. Le point C , ainsi obtenu, sera un des points de la résultante cherchée; on pourra donc tracer celle-ci, puisqu'on sait qu'elle doit être parallèle aux forces composantes mF , $m'F'$. De plus, le calcul et la construction même de la *fig. 4* démontrent qu'elle est égale à leur somme, ainsi elle sera complètement connue. Il est à remarquer que le point C pourrait aussi bien s'obtenir sans construire la perpendiculaire PP' ; mais simplement en joignant les points m , m' , auxquels sont appliquées les deux forces composantes, et divisant la droite mm' suivant la même proportion que PP' , c'est-à-dire réciproquement à ces forces.

CR étant ainsi déterminée, il n'y a qu'à placer au même point C , une force CR' qui lui soit égale, et qui soit dirigée en sens contraire; cette force anéantira l'effet de la résultante CR ; par conséquent, elle détruira l'effet des deux composantes dont elle dérive, et elle maintiendra le solide en équilibre contre leur effort combiné.

Nous avons supposé dans la figure 7, que les deux forces mF , $m'F'$, agissaient dans le même sens. Mais il se pourrait qu'elles fussent dirigées dans des sens contraires, comme le représente la figure 9. Alors la résultante CR devient égale à la différence des deux forces proposées, elle agit dans le sens de la plus énergique, et elle a son point d'application C du côté de cette dernière force, hors de l'espace que les deux composantes comprennent, de manière que l'égalité des moments statiques $mF \times CP$, $m'F' \times CP'$, soit toujours observée. Ce résultat était facile à prévoir. En effet, ayant mené arbitrairement une droite PP' perpendiculaire aux directions des deux forces, considérons-les comme appliquées aux points PP' , où cette droite les rencontre, ce qui ne change rien à leur effet; puis, désignons pour abrégé leurs intensités mF , $m'F'$, par les lettres F , F' . Cela posé, si la première F , par exemple, est la plus énergique, décomposons-la en deux autres agissant dans le même sens, dont l'une appliquée au point P' soit égale à F' même, et dont l'autre agisse à la différence $F - F'$

sera nécessairement placée quelque part en C de l'autre côté du point P. La première de ces composantes détruira complètement l'effet de F' , et il ne restera en définitif que l'action de la seconde $F - F'$ ou CR, qui sera par conséquent la résultante cherchée. En appliquant cette résultante en sens contraire, elle détruira l'effet des deux forces proposées F, F' , et déterminera ainsi l'équilibre du système.

On voit par cette construction même que la résultante CR, toujours égale à la différence des deux forces, s'éloigne de plus en plus de P à mesure que sa valeur devient moindre. Enfin, lorsque ces deux forces sont absolument égales, elle devient nulle et s'éloigne à l'infini. Comme il serait impossible de réaliser cette condition, il en faut conclure que, dans ce cas, il n'y a pas de résultante. C'est aussi ce que la seule considération de symétrie indique; car si les deux forces sont rigoureusement égales et opposées, comme la *fig.* 10 le représente, il n'y a aucune raison pour que leur résultante, si elle existe, soit dirigée dans le sens de l'une plutôt que dans le sens de l'autre; et, comme elle ne peut pourtant l'être dans les deux à-la-fois, il s'ensuit qu'elle n'existe point. On ne pourra donc plus alors tenir le système en équilibre avec une seule force, et il faudra détruire séparément l'effet de chacune des composantes F, F' , par l'opposition directe d'une force égale. Une nécessité pareille aurait lieu si l'on appliquait à un corps solide deux forces dont les directions ne seraient pas comprises dans un même plan: car alors ces directions, quelque loin qu'on les prolonge, ne pouvant jamais concourir, on ne pourrait pas réunir les deux points d'application en un seul, ni par conséquent composer les deux forces en une résultante unique; et il faudrait, pour établir l'équilibre, détruire individuellement leurs efforts.

Sachant composer ensemble deux forces appliquées à deux points différens d'un corps solide, lorsque cette opération est praticable, nous pouvons en composer de même une infinité; il suffit d'opérer progressivement la composition des résultantes successives avec les forces qui restent, comme nous l'avons expliqué dans le cas d'un seul point. Par exemple, si

toutes les forces proposées sont parallèles entre elles et dirigées dans un même sens, on parviendra ainsi à une résultante définitive, égale à la somme de ces forces, parallèle à leur direction commune, et qui traversera le corps, suivant une certaine ligne droite, que la construction même déterminera. Mais si les forces, quoique parallèles, agissent les unes dans un sens, et les autres dans le sens opposé, on cherchera la résultante particulière de chaque groupe et son point d'application; puis, tout étant réduit à ces deux résultantes, on examinera si elles tombent dans le cas d'exception remarqué plus haut; c'est-à-dire, si elles sont exactement égales entre elles. Alors il ne sera pas possible d'en déduire une résultante commune; et il faudra, pour tenir le corps en équilibre, détruire séparément l'effort de chacune d'elles par l'application immédiate d'une force égale et opposée. Mais si cette égalité parfaite n'a pas lieu, on pourra composer les deux résultantes en une seule, égale à leur différence, et dont le point d'application se calculera, comme tout à l'heure, par la condition de l'égalité des momens statiques. Alors, on pourra maintenir le système en équilibre à l'aide d'une seule force, égale, et directement contraire, à cette résultante universelle.

Bornons-nous à ce cas; et la résultante étant connue, concevons que toutes les forces composantes, sans changer de grandeur, et restant toujours parallèles entre elles, viennent à prendre simultanément une autre direction, *fig. 11*. Elles auront encore une résultante qui conservera la même grandeur que dans la disposition précédente; seulement sa direction dans l'espace sera changée, puisqu'elle doit toujours être parallèle aux composantes; et ainsi elle traversera le corps, suivant une autre droite que précédemment. Or, par une propriété facile à démontrer, toutes les droites ainsi déterminées concourent en un seul et même point M, que l'on nomme par cette raison, *le centre des forces parallèles*. Car l'opération qui donne la résultante totale consiste uniquement à diviser, conformément à la règle des momens statiques, les droites qui joignent le point d'application de chaque force composante avec les points où viennent s'appliquer les résultantes

partielles formées par leurs additions successives. Donc, si les intensités des forces composantes ne changent pas, toutes les droites dont il s'agit se trouveront divisées de même; et ainsi il y aura, sur la dernière, un certain point *M* par lequel la dernière résultante passera toujours. Ce centre étant commun à toutes les résultantes, on voit que, si on le fixe, l'effet des forces sera toujours détruit par sa résistance dans quelque sens qu'on tourne le corps relativement à leur direction. Mais, si l'on ne donne au corps qu'une seule position, il ne sera pas même nécessaire que le centre des forces soit fixé pour qu'il y ait équilibre, il suffira qu'il soit soutenu dans la direction actuelle de la résultante.

Ces résultats sont vrais, quel que soit le nombre des forces parallèles qui se trouvent appliquées aux divers points d'un corps solide. Ils subsisteraient donc dans le cas même où ce nombre serait infini. Ceci nous conduit à une application importante.

On sait que tous les corps qui se rencontrent sur la terre sont *pesans*, c'est-à-dire qu'abandonnés librement à eux-mêmes, ils tombent aussitôt vers la surface terrestre; et même, lorsqu'ils sont soutenus par quelque obstacle fixe, leur tendance à tomber se fait sentir encore par la pression qu'ils exercent contre cet obstacle, et que l'on appelle leur *poids*. La *pesanteur* qui les tire ainsi vers la terre est une force qui pénètre leur masse, et sollicite leurs moindres particules. En effet, chacune de ces particules, si petite qu'on la suppose, étant détachée du reste du corps, et abandonnée librement à elle-même dans le vide, tombe encore, quoique isolée; et l'effort qu'elle fait pour cela est exactement le même qu'elle faisait avant d'être détachée; car des expériences journalières prouvent que le poids d'un corps ne change pas après qu'on l'a divisé.

La direction suivant laquelle la pesanteur s'exerce est indiquée par celle de la chute libre des corps. En chaque lieu de la terre, elle est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles; et, comme cette surface suit par-tout la convexité du globe, il s'ensuit que la direction de la pesanteur, s'inclinant avec elle, doit être différente d'un lieu à un autre. Mais, par

cela même, on conçoit que son changement ne doit devenir sensible qu'à de grandes distances, qui surpassent incomparablement les dimensions de tous les corps que nous pouvons avoir besoin de considérer ; ainsi, pour chaque corps en particulier, la pesanteur qui sollicite ses diverses parties peut être censée agir suivant des directions parallèles entre elles, et *verticales*, c'est-à-dire normales à la surface plane des eaux dans le lieu de l'observation. D'après cela nous pouvons appliquer à ce cas tout ce que nous avons démontré plus haut en général, relativement à l'application des forces parallèles. Les efforts partiels de la pesanteur sur divers points d'un même corps se composeront en une résultante unique, qui sera son *poids*, et dont la direction passera toujours par un certain même point de sa masse, dans quelque sens qu'on le tourne relativement à la verticale. Ce point, ou centre des forces, prend alors le nom de *centre de gravité* ; et sa position dans chaque corps, peut, comme nous le verrons tout à l'heure, se déterminer d'après les principes expliqués plus haut (1).

Supposons-le connu. Si on le fixe d'une manière invariable, on pourra tourner le corps comme on voudra autour de lui, ce corps restera en équilibre dans toutes les positions où on le placera. Si ce n'est pas le centre de gravité qui est fixé, mais un autre point faisant partie du corps solide, alors il est nécessaire et il suffit pour l'équilibre, que la droite qui joint ce point et le centre de gravité soit verticale, ce centre pouvant d'ailleurs se trouver au-dessus du point ou au-dessous. Car le poids du corps étant une force verticale, dont la direction passe par son centre de gravité, et peut lui être censée appliquée, cette direction, dans les deux situations que nous venons d'indiquer, passera aussi par le point fixe ; et son effort, transmis par les molécules rigides du corps jusqu'à ce point, sera détruit par sa résistance. Si le centre de gravité est plus haut

(1) On verra dans le cinquième livre que les corps aimantés offrent l'exemple de deux systèmes de forces parallèles, de direction contraire et d'intensités égales, appliquées à leurs divers points : d'où il suit qu'on y trouve aussi deux centres de ces forces qui sont en général séparés et distincts.

que le point fixe, le corps sera *supporté*, s'il est plus bas il sera *suspendu*.

Par la même raison, si l'on considère un corps solide pesant, M , *fig. 12*, suspendu par un de ses points à l'une des extrémités d'un fil CM , dont l'autre bout soit attaché à un point fixe C , il est évident que, dans le cas de l'équilibre, le fil sera vertical, et que son prolongement passera par le centre de gravité du corps M . Car il n'y a que cette position unique, où la résultante, qui forme le poids du corps M , puisse se transmettre à travers le fil jusqu'au point fixe, et être détruite par sa résistance. Un semblable appareil se nomme un *fil à-plomb*, et il sert pour reconnaître en chaque lieu la direction de la verticale, ce qui est nécessaire pour une infinité d'usages. On peut l'employer aussi pour déterminer la position du centre de gravité d'un corps, en suspendant successivement celui-ci par deux de ses points, et traçant dans chaque cas, effectivement ou idéalement, la prolongation du fil de suspension à travers le corps, lorsque l'équilibre est parfaitement établi; car ces deux directions se coupent nécessairement en un point qui est le centre de gravité.

On peut aussi déterminer la position de ce centre en posant le corps sur un plan horizontal, de manière qu'il ne touche ce plan que par un de ses points, et essayant de le dresser de manière qu'il se tienne en équilibre sur ce point-là. En effet, si cela avait lieu, son centre de gravité se trouverait alors sur la verticale menée par le point de contact. Mais il serait toujours fort difficile d'amener un corps dans cette position unique; et, si l'on y réussissait, il ne resterait pas assez long-temps en équilibre pour qu'on pût l'observer, parce que le moindre ébranlement le dérangerait. Pour obvier à ces inconvénients, il n'y a qu'à l'appuyer latéralement par un petit plan incliné susceptible d'être élevé graduellement sous divers angles au moyen d'une vis, comme le représente la *fig. 13*, et alors tout se réduira à observer l'inclinaison de ce plan au moment où le corps qu'il appuie se renverse du côté opposé. Car, en supposant que l'on ait marqué les deux points de contact M et M' du corps sur le plan horizontal et sur le plan oblique,

on pourra toujours retrouver la position précise qu'il avait au moment de sa chute; et la verticale menée alors par le point M où il touche le plan horizontal devra contenir son centre de gravité. Une autre expérience pareille, faite dans un sens différent, donnera une autre verticale qui devra aussi passer par ce centre; et l'intersection mutuelle de ces deux lignes déterminera sa position dans le corps. Ce moyen a été employé avec succès dans des opérations fort délicates par M. Pond, astronome royal de Greenwich.

Le centre de gravité de chaque corps étant déterminé par la composition de toutes les actions que la pesanteur exerce sur les diverses particules matérielles dont ce corps est l'assemblage, on conçoit que sa position doit dépendre à-la-fois de la forme du corps et de la manière dont la matière pesante s'y trouve distribuée. Le premier de ces élémens, la forme, peut se déterminer par l'observation, immédiate ou par la définition du corps même; mais comment obtenir le second?

Pour le découvrir, considérons d'abord un corps dont la composition chimique soit par-tout la même, ce que l'on appelle être *homogène*; et ajoutons-y encore que la matière qui le compose soit uniformément distribuée dans toutes ses parties. Alors, si, dans un ou plusieurs points de ce corps, on isole de petites portions de sa masse qui aient un volume déterminé, par exemple, un centimètre cube, ces parties, d'après l'uniformité d'état du corps, devront être absolument identiques. Ainsi l'action de la gravité sur elles devra être égale, c'est-à-dire qu'elles auront des poids égaux. Maintenant, concevons que l'on prenne deux de ces parties, et qu'en les battant et les refoulant l'une sur l'autre on parvienne à réduire leurs deux volumes en un seul, pareillement égal à un centimètre cube; cela ne changera rien à l'effort que la pesanteur exerce sur elles, car un corps ne change jamais de poids pour être comprimé. Le poids des deux parties réunies sous un seul volume sera donc double du poids d'une des parties non comprimées; ainsi, réciproquement, la comparaison des poids fera reconnaître la proportion relative de matière pesante contenue dans ces deux états sous un même volume. Cette proportion

relative est ce que l'on nomme *la densité* des corps, appelant plus *denses* les corps, ou les parties des corps, qui contiennent plus de matière pesante sous le même volume, et moins *denses* ceux qui en contiennent moins. La densité, comme tout autre caractère relatif, s'évalue par comparaison avec une unité de son espèce; c'est-à-dire que l'on prend pour unité de densité de chaque substance celle qu'elle a dans un certain état connu et déterminé. Alors, pour tout autre état de cette même substance, la densité est proportionnelle au poids qu'elle a, sous le même volume qui a été choisi pour terme de comparaison. En effet, le poids d'un corps n'étant que l'effort total qu'il fait pour tomber vers la terre en vertu de la pesanteur qui sollicite toutes ses parties, il est évident que, dans ceux que l'on suppose être de même nature, cet effort doit être proportionnel au nombre total des particules qu'ils contiennent, lesquelles, pour être plus ou moins rapprochées les unes des autres, n'en sont pas moins sollicitées également par la pesanteur. Ainsi, quand on saura apprécier exactement les poids des corps, on pourra vérifier la constance de la densité dans un corps homogène en le divisant en parcelles plus petites, dont on déterminera séparément les densités propres afin de s'assurer de leur égalité; et si elles sont inégales le même procédé fera connaître l'étendue et les lois de leurs variations.

On a étendu ce mode de comparaison aux corps mêmes dont la nature chimique est différente, et que l'on appelle pour cette raison *hétérogènes*. On suppose aussi leurs densités relatives proportionnelles à leur poids à volume égal. Cependant on ne saurait dire *a priori* si les portions de ces différens corps qui pèsent également, renferment réellement la même quantité de matière inerte. Mais, heureusement, cette incertitude n'a aucun inconvénient pour les expériences, parce que, comme on le verra par la suite, les diverses substances se comportent toujours de la même manière, relativement les unes aux autres, sous l'influence de toutes les forces motrices qu'on peut leur appliquer. Ainsi, quand on aura comparé les énergies de leurs efforts sous l'influence d'une même force, telle que la pesanteur, le rapport de ces énergies sera encore le même sous l'in-

fluence de toute autre force, qui, comme elle, pénétrerait toutes leurs parties. Les opérations pratiques par lesquelles les poids et les densités s'obtiennent, sont évidemment du ressort de la physique expérimentale, et nous chercherons plus tard les moyens les plus précis de les effectuer; mais les considérations abstraites qui les font naître, et la fixation des termes qui les expriment, appartiennent à la physique rationnelle. C'est pourquoi nous avons dû les établir dès à présent.

D'après les définitions précédentes, l'effort de la gravité sur les diverses parties d'un corps, soit homogène, soit hétérogène, est proportionnel à leur densité. Ainsi, quand ces densités sont connues par l'expérience, on connaît aussi l'énergie relative de tous ces efforts partiels. On peut donc, en les composant, déterminer leur résultante; et, en répétant la même opération dans deux sens divers, en déduire le centre de ces forces, c'est-à-dire le centre de gravité du corps entier; mais, quand la densité est constante, la seule connaissance de la forme du corps suffit pour déterminer ce point.

La doctrine des centres de gravité est d'une application continuelle dans les recherches expérimentales, et même dans tous les mouvemens de notre corps. Nous allons en indiquer ici quelques-unes des conséquences les plus évidentes.

Lorsqu'un corps solide est posé sur un plan horizontal, qu'il touche en un certain nombre de points, il ne peut être soutenu à moins que tout son poids ne soit détruit par la résistance du plan; et, comme son poids agit suivant la verticale qui passe par son centre de gravité, il faut que cette verticale se trouve dirigée de manière à rencontrer le plan dans un des points par lesquels le corps pose, ou dans l'espace que ces points comprennent. Ainsi une table est soutenue quand la verticale menée par son centre de gravité passe entre ses quatre pieds. Le corps d'un homme qui se tient droit, ne peut se soutenir si la verticale analogue sort de l'espace quadrangulaire compris entre les contours extérieurs de ses deux pieds. Or, en lui supposant les bras pendans et les jambes parallèles, son centre de gravité se trouve à-peu-près entre les deux hanches: la condition d'équilibre

est donc non-seulement satisfaite dans cette position, mais elle le serait encore dans une infinité d'autres qui s'écarteraient notablement de celle-là. Aussi est-elle la plus assurée où le corps puisse se placer. La stabilité serait beaucoup moindre si les jambes étaient placées, non à côté l'un de l'autre, mais l'une derrière l'autre, avec les pieds bout à bout sur une même ligne : aussi est-il difficile de se tenir en équilibre dans cette situation ; et au contraire, quand on veut s'affermir sur ses pieds, on les écarte parallèlement l'un à l'autre pour agrandir l'espace qu'ils embrassent. De là dépendent aussi tous les mouvemens que l'on fait pour se redresser quand on est prêt à tomber ; ils tendent toujours à ramener la verticale du centre de gravité, dans l'espace où l'équilibre peut avoir lieu. L'art périlleux des danseurs de corde se rapporte encore à la même théorie.

CHAPITRE V.

De l'équilibre dans les machines simples.

LES principes que nous venons d'exposer sur la composition des forces, suffisent pour expliquer et pour calculer l'usage de plusieurs machines employées à chaque instant dans les arts et dans les recherches d'expérience. L'objet général des machines est d'employer une certaine force dont on dispose, et que l'on appelle par cette raison la *puissance*, pour équilibrer ou pour vaincre une autre force dont on n'est pas le maître, et que l'on nomme la *résistance*. On oppose ces deux forces l'une à l'autre, en transmettant leur action par l'intermédiaire des corps solides, ou liquides, ou gazeux qui entrent dans la composition de la machine. L'artifice essentiel de cette transmission consiste à décomposer l'effort de la résistance qu'il faut vaincre, de manière qu'une portion plus ou moins considérable de son énergie soit supportée par un ou plusieurs points fixes qui font partie de l'appareil. Alors, en effet, la portion de cette énergie, qui n'est pas ainsi détruite, est la seule qui reste à vaincre ; et l'on peut y parvenir avec

moins de force que n'en aurait exigé la résistance totale, si on l'eût attaquée directement. Ce que l'on appelle le *calcul d'une machine* consiste à déterminer les rapports qu'il faut établir entre la puissance et la résistance, simultanément appliquées, pour qu'elles s'équilibrent mutuellement; et la condition de cet équilibre se réduit toujours à ce que la résultante commune de ces deux forces vienne se diriger, et par conséquent s'anéantir contre les points fixes de l'appareil. Malgré la variété apparente des machines que l'on peut composer avec des corps solides, elles sont toutes au fond des combinaisons d'un petit nombre d'éléments, que l'on appelle, par cette raison, les *machines simples*, et que nous allons considérer successivement.

Du Levier.

On appelle en général *levier*, une barre inflexible, droite ou courbe, telle que $m C m'$ *fig.* 14, dont un des points C est fixe et offre un *point d'appui*, autour duquel le levier peut tourner librement. On conçoit que des forces $m F$, $m' F'$, appliquées aux deux extrémités opposées du levier, peuvent réagir l'une sur l'autre par le moyen de sa rigidité, et se combattre mutuellement en s'appuyant contre le point d'appui C. Lorsque le levier est droit, *fig.* 15, et que les directions des forces lui sont perpendiculaires, les distances $C m$, $C m'$, comprises entre le *point d'appui* et le point d'application de chaque force, se nomment le *bras de levier* de cette force-là. Conformément au principe général que nous avons énoncé pour toutes les machines, il faudra dans celle-ci, pour l'équilibre, que la résultante des deux forces $m F$, $m' F'$ passe par le point d'appui C.

En appliquant cette considération à la *fig.* 14, qui représente le cas le plus général du levier, on voit tout de suite que l'équilibre ne pourra jamais avoir lieu entre la puissance $m F$ et la résistance $m' F'$, si les actions de ces deux forces ne sont pas dirigées dans un même plan. Car, pour qu'elles puissent avoir une résultante unique, il faut nécessairement qu'elles concourent, ce qui n'aura pas lieu si elles

sont dans des plans différens. Dans ce cas, le levier sollicité par l'action des deux forces, tournera autour de son point d'appui C.

Maintenant si les deux forces sont dans un même plan, prolongez leurs directions jusqu'à ce qu'elles se rencontrent en un point M. Alors leur résultante partira nécessairement de ce point ; il ne restera plus pour l'équilibre qu'à faire en sorte qu'elle passe par le point d'appui C. Donc si l'on mène de ce point aux directions des forces des perpendiculaires CP, CP', il faudra que les longueurs de ces perpendiculaires aient entre elles le rapport que nous avons reconnu page 34, pour caractériser la résultante de deux forces, c'est-à-dire qu'elles devront être en raison inverse de ces forces mêmes ; et ainsi chaque force multipliée par la perpendiculaire menée sur sa direction, devra donner le même produit. Cette condition, jointe à celle du concours des forces dans un même plan, suffira donc pour que le levier soit en équilibre.

Lorsque les deux forces sont parallèles entre elles, comme dans la *fig.* 15, la condition du plan est remplie d'elle-même : si de plus le levier est droit, la seconde se réduit à ce que les grandeurs des forces soient en raison inverse de leurs bras de levier ; ou, ce qui revient au même, que le produit de chaque force par son bras de levier, soit constant. Nous avons déjà dit plus haut que ce produit se nomme le *moment statique* de la force. C'est donc sa valeur qui détermine l'équilibre ; et, comme on peut l'accroître indéfiniment en augmentant la longueur du bras de levier qui est un de ses facteurs, on voit comment une petite force, agissant ainsi au bout d'un bras plus long, peut faire équilibre à une résistance beaucoup plus grande qu'elle.

Dans les deux figures, nous avons supposé le point d'appui placé entre les deux forces ; mais il pourrait tomber au dehors de l'espace qu'elles embrassent comme dans les *fig.* 16 et 17. Alors il faut encore pour l'équilibre, que les momens statiques des deux forces relativement au point d'appui C soient égaux entre eux.

On appelle quelquefois levier du *premier genre*, celui dans

lequel le point d'appui tombe entre les deux forces comme dans les *fig.* 14 et 15 ; levier du *second genre*, celui de la *fig.* 16 où le point d'appui tombe hors de la direction des deux forces, en supposant la puissance plus éloignée du point d'appui que la résistance ; et enfin levier du *troisième genre*, la même disposition du point d'appui, *fig.* 17, en supposant la résistance plus distante que la puissance. Il est évident que celui-ci n'offre aucun avantage pratique, puisque l'effet de la puissance s'y affaiblit par son rapprochement du point d'appui.

De la Poulie.

La poulie est un cercle solide, ordinairement de bois ou de métal, *fig.* 18, creusé en gorge sur sa circonférence, et traversé à son centre C par un axe perpendiculaire au plan de ses surfaces. Si cet axe est fixe, la poulie ne peut que tourner autour de lui, et elle prend le nom de *poulie fixe*. Mais il y a aussi des cas où l'axe n'est point fixé ; alors la poulie peut se mouvoir dans l'espace en même temps qu'elle tourne autour de son axe, et on la nomme *poulie mobile*. Commençons par le premier cas : supposons qu'une corde parfaitement flexible soit passée dans la gorge de la poulie, et s'enroule autour de sa circonférence ; tirons d'un côté cette corde par une puissance MF, de l'autre par la résistance M'F'. Il est clair que cette machine n'est autre chose qu'un levier, dont les bras sont les rayons CM, CM', menés du centre du cercle aux points de tangence des deux cordons. Ces bras étant égaux, il faut, pour l'équilibre, que la puissance et la résistance soient égales. Alors la résultante commune de ces deux forces passe par le centre de la poulie, et est détruite par la résistance de l'axe ; conséquemment si ces forces sont parallèles, *fig.* 19, l'axe a leur somme à supporter.

Considérons maintenant, *fig.* 20, une poulie CMM' entièrement libre, autour de laquelle soit enroulé un cordon C'M'MF, ayant sa première extrémité fixée en C', à un obstacle invincible, et l'autre F tirée par une puissance MF. Si l'on applique à l'axe C de la poulie un poids, ou en général

une résistance dirigée suivant CR, il est clair que cette résistance pourra être équilibrée par l'action combinée de la force MF et de la résistance du point fixe. Afin de mieux mettre en évidence les conditions abstraites de cet équilibre, supposons le corps de la poulie et la masse de la corde dépourvus de pesanteur. Cela posé, la traction exercée sur le cordon par la force MF, se transmettant jusqu'au point fixe qui lui résiste, fera que tout le cordon sera tendu également avec une force double, précisément comme si l'obstacle C' était remplacé par une force égale à MF. Cette disposition sera donc absolument pareille à celle de la *fig.* 18, si ce n'est que tout sera renversé ; et, comme alors la résultante des deux tractions exercées sur les cordons était supportée par la résistance de l'axe fixe, de même ici elle le sera par la résistance CR. Si celle-ci est verticale ainsi que la force MF, *fig.* 21, le cordon M'C' deviendra aussi vertical ; et, dans le cas de l'équilibre, la traction suivant MF devra être la moitié du poids CR. Si elle est plus énergique elle montera ce poids, en supposant toutefois la corde parfaitement flexible, et la poulie ainsi que la corde dépourvues de pesanteur.

En combinant ainsi les unes au-dessus des autres plusieurs poulies, qui se servent mutuellement de support, on forme des appareils que l'on nomme *moufles*, et qui sont très-utiles pour soulever de grands fardeaux avec de très-petites forces. La *fig.* 22 en représente un dans lequel toutes les poulies sont mobiles, excepté celle par laquelle agit le poids qui sert de puissance ; la *fig.* 23 offre une autre disposition où les poulies supérieures sont fixes, les inférieures mobiles, et la même corde, allant des unes aux autres, s'enroule autour de toutes successivement. Si l'on représente par n le nombre des poulies mobiles que ces appareils contiennent, il faut pour l'équilibre que la puissance F soit égale à la résistance R divisée par 2^n , dans le cas de la *fig.* 22, et par $2n$, dans le cas de la *fig.* 23.

Le treuil représenté *fig.* 24, et qui sert aussi à élever de lourds fardeaux, peut être considéré comme une machine formée de deux poulies AA BB, d'inégale grandeur, montées sur un axe commun, et dont la plus grande BB sert pour

faire agir la puissance, tandis que la résistance est appliquée à la plus petite. Il faut donc, pour l'équilibre, que ces deux forces soient entre elles inversement comme les rayons des poulies par lesquelles elles agissent, puisque ces rayons sont leurs bras de levier.

Du plan incliné.

Lorsqu'un corps pesant tout-à-fait libre doit être soutenu par une force, il faut qu'elle soit égale à son poids. Mais si le corps peut déposer une partie de ce poids sur un obstacle fixe, il est clair qu'on peut achever de le soutenir avec une force moindre. Tel est l'effet du plan incliné, représenté *fig. 25*.

Soit AD ce plan, incliné en effet à l'horizon, de façon que AB soit sa base et BD sa hauteur. Supposez qu'on ait placé dessus un corps solide *abcd*, qui, reposant ainsi sur sa base *ab*, puisse encore glisser librement le long du plan par l'effet de la pesanteur. Si vous voulez calculer la force nécessaire pour le retenir, menez, par son centre de gravité G, une ligne verticale GR, pour représenter tout l'effort de la pesanteur, qui peut être considéré comme appliqué à ce point. Puis, au moyen du parallélogramme des forces, décomposez cette résultante en deux composantes, l'une GF, perpendiculaire au plan fixe, l'autre GF' parallèle à sa surface. Il est visible que la première sera entièrement détruite par la résistance que cette surface lui oppose. Le corps ne tendra donc à glisser qu'en vertu de la force GF', et conséquemment il suffira de faire équilibre à cette force, pour le retenir. Ainsi la puissance qu'il faudra appliquer, sera au poids total du corps, comme le côté GF', est à la diagonale GR, ou comme la hauteur du plan est à sa longueur; elle sera donc d'autant moindre, que la pente du plan sera plus douce.

Ceci fournit un moyen d'élever un poids à une hauteur quelconque, à l'aide d'une force moindre que lui, en le faisant monter jusqu'à cette hauteur, le long d'un plan incliné; et, pour que, dans ce mouvement, le poids ne s'écarte pas horizontalement, à une distance considérable, il n'y a qu'à

faire tourner le plan autour d'un axe vertical, comme les chemins qui s'élèvent en serpentant sur les montagnes. Telle est précisément la construction de la vis, qui n'est qu'un plan incliné, taillé dans un cylindre vertical, *fig.* 26. Pour s'en servir, on construit un conduit EE, que l'on nomme un écrou, lequel est exactement taillé sur les dimensions de la vis, avec cette différence qu'il a en creux tout ce qu'elle porte en saillie. On adapte cet écrou à un obstacle fixe, ou bien on le perce dans cet obstacle même; et, en tournant la vis, au moyen d'un levier LL qui la traverse perpendiculairement à son axe AA, on produit, dans le sens longitudinal de cet axe, de très-grands efforts. On peut ainsi pousser ou tirer avec beaucoup de force. On emploie encore cet appareil pour serrer ensemble très-fortement des pièces séparées, *fig.* 27. Alors on fait, dans l'une des pièces AB, un trou assez large pour que le corps de la vis y passe librement, mais trop petit pour y laisser passer sa tête, que l'on a élargie à dessein. L'autre pièce A'B' est percée d'un écrou, dans lequel on fait marcher la vis. Lorsque sa tête a atteint la première pièce, elle la pousse devant elle, et la serre contre l'écrou avec toute la force que l'on emploie à la faire tourner. Il semble que ce serrage ne devrait subsister qu'autant que l'on continue à presser sur la vis; mais si l'écrou est très-juste, ce que l'on a toujours soin de faire, le contact de ses surfaces intérieures avec celles des filets de la vis, établit un frottement et une adhérence qui ne permettent plus le retour de la vis sur elle-même, même quand on la renverse, et qui empêchent ainsi les pièces réunies de se relâcher.

En général, toutes les conditions d'équilibre que nous venons d'établir, sont calculées dans la supposition mathématique que la transmission de la force se fait librement à travers toutes les pièces dont chaque machine est composée, sans avoir à vaincre aucune autre résistance que celle que nous avons considérée spécialement. Mais, quand on en vient à vouloir appliquer pratiquement ces résultats, on rencontre divers obstacles qui tiennent à la constitution physique des corps dont on fait usage, et qui introduisent dans les condi-

tions du mouvement et de l'équilibre des élémens nouveaux. Ainsi les cordes que nous supposons parfaitement flexibles, acquièrent de la roideur, et ne se plient plus avec une parfaite liberté; les verges que nous avons supposées parfaitement rigides fléchissent plus ou moins; les surfaces qui se touchent, et que nous supposions glisser sans obstacle les unes sur les autres, contractent une certaine adhérence, qu'il faut vaincre avant qu'elles se désunissent; et, lorsque le mouvement est établi, il se développe entre elles un frottement plus ou moins énergique, qui le ralentit ou même l'éteint. Alors les leviers ne tournent plus tout-à-fait librement autour de leur point d'appui, ni les cordes dans les gorges des poulies, ni les vis dans leurs écrous; et, pour obtenir les conditions réelles du mouvement ou de l'équilibre, il faut avoir égard à toutes ces causes. Mais, comme elles tiennent à la constitution physique des corps, et non pas à la mécanique abstraite, c'est à l'expérience à les étudier, et à fournir l'évaluation de leur influence, pour qu'on puisse les faire entrer en considération dans le calcul. Ce sont donc là autant de points qui devront occuper nos recherches dans le cours de cet ouvrage.

CHAPITRE VI.

De l'équilibre des liquides incompressibles.

DE même que, pour imiter les corps solides que la nature nous présente, nous avons imaginé des systèmes matériels composés de molécules invariablement liées les unes aux autres; de même, pour figurer les corps liquides, nous concevrons des systèmes dont les molécules seront parfaitement libres et mobiles entre elles, sans pouvoir être condensées par aucune pression. Cette mobilité est en effet le caractère le plus évident que nous offrent les liquides naturels non visqueux, tels que l'eau, l'alcool, le mercure, etc. Quant à leur incompressibilité, quoiqu'elle ne soit pas tout-à-fait absolue, elle est cependant telle, qu'il faut employer de très-fortes

pressions pour les réduire sensiblement dans un plus petit espace. Ainsi, en développant l'influence que ces propriétés doivent avoir sur l'équilibre de pareils systèmes, nous préparerons sans doute des lois que l'expérience devra confirmer.

La première, qui dérive immédiatement de cet énoncé même, c'est qu'une molécule liquide, placée à la surface ou dans l'intérieur de la masse entière, doit céder à la plus petite force qui la sollicite et se mouvoir suivant sa direction, à moins qu'elle ne soit arrêtée par une force contraire ou par un obstacle invincible. De là il ne faut pas conclure qu'un liquide ne puisse être en équilibre à moins que la résultante des forces qui sollicitent ses diverses parties ne soit individuellement nulle pour chacune d'elles. Car, si le liquide est renfermé dans un vase dont les parois soient solides, les molécules, s'appuyant les unes sur les autres, peuvent, en vertu de leur impénétrabilité et de leur incompressibilité naturelles, transmettre jusqu'à ces parois les forces qui les sollicitent, et demeurer ainsi en équilibre en vertu de leur résistance. Si au contraire le liquide est libre de toutes parts, comme le serait une planète fluide isolée dans l'espace, et sollicitée seulement par les attractions mutuelles de toutes ses parties, l'équilibre pourra encore naître du balancement de ces attractions, si les efforts qui en résultent, et qui se transmettent en tous sens dans la masse fluide en vertu de l'incompressibilité de ses particules, se détruisent mutuellement dans chacune d'elles. Au reste, quel que soit le mode en vertu duquel l'équilibre existe dans une masse liquide, si nous considérons une quelconque des molécules qui la composent, l'équilibre de cette particule ne sera point troublé si l'on substitue, à une ou plusieurs de celles qui l'entourent, autant de points solides soutenus fixement dans le liquide, et contre lesquels les pressions que la première molécule éprouve viendront de même s'anéantir. Il sera également indifférent que ces points fixes soient indépendans les uns des autres ou liés entre eux d'une manière quelconque; et leur substitution peut être introduite à volonté dans toutes les parties du liquide. De là résulte cette conséquence importante : lors-

qu'une masse liquide est en équilibre, si l'on conçoit dans son intérieur un canal de figure quelconque, limité par des parois solides, et fermé à ses extrémités, ou rentrant sur lui-même, les molécules liquides contenues dans ce canal devront être aussi en équilibre à part, en vertu des forces qui agissent sur elles et des réactions qu'elles éprouvent de la part de ses parois. Si la masse fluide en équilibre est limitée en quelque endroit par une surface nue, on devra supposer le canal idéal percé aux endroits où il aboutit à cette surface, puisqu'il n'y a plus, au-delà de celle-ci, aucune résistance à représenter. Ce principe, fondé, comme on voit, sur la seule considération de l'indépendance des parties constituantes des liquides, a l'avantage de réduire la recherche des conditions de l'équilibre d'une masse entière, au cas plus simple de l'équilibre d'un filet liquide infiniment mince, contenu dans un canal infiniment étroit.

Cela posé, cherchons à déterminer ces conditions pour un filet pareil, supposé pesant, homogène, et contenu dans un tube cylindrique ABCD, *fig.* 28, dont la branche inférieure BC serait horizontale, les deux autres, BA, CD, étant toutes deux verticales, et ouvertes à leurs extrémités supérieures. Il est évident, par la seule raison de symétrie, que, dans cet état de choses, il faudra pour l'équilibre que le liquide se tienne dans les deux branches à d'égales hauteurs. Mais on peut, en outre, concevoir comment l'équilibre résulte de cette égalité, si l'on considère que lorsqu'elle a lieu, la portion horizontale BC du liquide est pressée à ses deux bouts par deux forces égales, qui sont les poids des deux colonnes liquides d'égale hauteur, de sorte qu'elle ne tend à prendre aucun mouvement ni à droite ni à gauche. Il n'en serait plus de même si l'on versait une nouvelle quantité de liquide dans l'une des deux branches; car alors l'addition de cette quantité, augmentant la pression dans cette branche, la portion de liquide BC précédemment horizontale serait poussée du côté opposé; et l'on pourrait s'apercevoir de ce mouvement si elle était d'une nature différente du reste du liquide et non susceptible d'être mêlée avec lui,

par exemple, d'eau, si les colonnes verticales étaient d'huile. Mais, en revenant au cas de l'équilibre produit par l'égalité de pression de deux colonnes de même nature, on pourrait suppléer à l'une de ces pressions en substituant à la colonne liquide qui l'exerce, la résistance d'un fond solide, vertical, ou incliné, qui terminerait le tube en B, *fig.* 29 et 30. Alors la pression de l'autre colonne CD se transmettrait toute entière jusqu'à ce fond, par l'intermédiaire des molécules liquides, et en vertu de leur impénétrabilité : de sorte que, s'il était vertical, il supporterait tout le poids de cette colonne, comme si elle était placée immédiatement au-dessus de lui; et, s'il avait toute autre direction inclinée à l'horizon d'une manière quelconque, la pression qu'il éprouverait serait égale au poids d'une colonne liquide qui aurait sa surface pour base et CD ou C'D' pour hauteur. Ces quantités peuvent en effet ici être prises l'une pour l'autre, parce que nous avons supposé le filet fluide infiniment mince; mais il n'en est jamais ainsi dans les applications réelles, à cause de l'épaisseur sensible des colonnes fluides sur lesquelles on opère. Alors chaque point du fond BB' supporte une pression égale à la hauteur verticale du filet fluide élevé au-dessus de son niveau horizontal : ainsi la pression est mesurée en B par la hauteur CD, en B' par C'D'; et, dans les points intermédiaires, par les hauteurs qui correspondent à chacun d'eux.

Cette transmission de la pression, et son intensité pour chaque obliquité du fond B, peuvent se vérifier par l'expérience en substituant à ce fond un piston mobile, et mesurant la force nécessaire pour l'empêcher d'être chassé au-dehors. Mais la loi qui en résulte n'a pas lieu seulement pour le poids de la colonne CD; elle s'étend à toute autre force comprimante que l'on voudrait supposer appliquée perpendiculairement en DD', sur la surface libre de la colonne. La pression produite par cette force se transmettrait de même, sans altération, par l'intermédiaire des molécules fluides à toutes les surfaces solides qui limitent cette masse; et si chaque centimètre carré de la surface libre DD' était pressé, par exemple, par un poids d'un kilogramme, chaque centimètre carré du fond BB' et des parois du

canal, éprouverait aussi une pression d'un kilogramme perpendiculairement à sa superficie : c'est en cela que consiste le principe général d'hydrostatique connu sous le nom d'*égalité de pression* ; et il peut se vérifier, comme nous l'avons dit tout-à-l'heure, par des expériences certaines. On en a même fait une application ingénieuse à la construction d'une machine fort usitée en Angleterre, et dans laquelle la pression exercée par le moyen d'un levier sur la surface supérieure d'un filet fluide, se transmet avec toute son énergie à tous les points d'une large surface. En joignant ce principe à celui que nous avons tiré d'abord de l'indépendance des molécules dans les liquides, on peut découvrir toutes les conditions de l'équilibre de leur masse.

Considérons, par exemple, les parties de cette masse qui sont limitées par une surface libre et sans parois. Isolons-les de toutes les autres par un canal infiniment mince $AB A'B'$, *fig. 31*, qui suive les contours de la surface libre, et se termine par deux fonds solides AA' , BB' . L'équilibre devra exister dans ce canal comme dans tout autre. Mais la nudité de la surface exige que la paroi extérieure AB ne supporte aucune pression de dedans en dehors. Il faudra donc que les points de la surface libre, ou ne soient pas pressés du tout, ou le soient seulement de dehors en dedans, et tous avec une énergie égale. Il faudra, en outre, que la résultante de toutes les forces qui sollicitent les particules liquides situées à cette surface, soit dirigée de manière à ne pas les faire glisser dans le sens de la longueur du canal ; et cette condition ne peut être remplie généralement, quelle que soit sa longueur, à moins que la résultante dont il s'agit ne soit perpendiculaire à la surface libre. Par exemple, si le liquide est uniquement sollicité par une force de pesanteur tendante vers un centre, et également intense de tous les côtés de l'espace, la surface libre devra prendre la forme d'une sphère concentrique à ce point. Ce serait le cas de la mer, en supposant que la terre qu'elle recouvre ne tournât point sur elle-même. Mais si le centre de pesanteur est assez éloigné comparativement à l'étendue de la surface libre, pour que les directions de la pe-

santeur à ses divers points puissent être censées parallèles, la forme de la surface sera un plan perpendiculaire à cette commune direction. C'est le cas des liquides pesans, contenus dans des vases limités; et l'on observe, en effet, que la portion libre de leur surface est plane et horizontale. En outre, s'ils sont placés dans le vide, la pression à cette surface est nulle, car les particules qui y sont situées n'ayant rien au-dessus d'elles, ne sont sollicitées que par leur propre pesanteur, qui est égale pour toutes. Mais si le liquide est placé dans l'atmosphère, la masse d'air située au-dessus de lui étant pesante, comme nous le verrons par la suite, la surface libre du fluide en supporte tout le poids. Alors, quand cette surface est horizontale, la pression y est constante et l'équilibre a encore lieu.

Pour plus de simplicité, reprenons le cas du vide, où le fluide n'est sollicité que par sa pesanteur propre; et, supposant qu'il soit contenu par les parois solides d'un vase, pénétrons dans son intérieur. Alors si l'on isole une quelconque des particules qui y sont situées, par exemple *M*, *fig. 32*, il est évident que cette particule peut être considérée comme située au fond d'un canal vertical, aboutissant à la surface libre. Elle supporte donc tout le poids de la colonne située ainsi au-dessus d'elle, et elle transmet cette pression dans tous les sens à toutes les particules qui l'entourent, lesquelles lui résistent avec une force égale, en vertu de la réaction des parois. L'égalité de pression en tous sens se trouve ainsi satisfaite; mais l'intensité absolue de la pression augmente proportionnellement à la profondeur. Il en est de même de celle qui s'exerce sur les parois du vase. Pour nous en former une idée précise, choisissons un très-petit élément *BB* de leur surface, situé à une certaine profondeur. Nous pouvons par ce point mener un canal horizontal *BC*, infiniment mince, qui, se recourbant ensuite verticalement, vienne aboutir en *D* à la surface libre. Alors l'élément *BB*, considéré comme le fond de ce canal, supportera une pression normale égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait sa surface *BB* pour base

et CD pour hauteur; et, s'il ne peut pas résister à une pareille force, il crevera.

Maintenant si la direction de la surface en BB n'est pas absolument horizontale, la pression normale étant décomposée horizontalement, donnera naissance à une force qui tendra à imprimer au vase un mouvement de translation dans le sens CB. Cependant aucun mouvement pareil ne se manifeste dans les vases en partie remplis de liquide et librement suspendus. C'est qu'il y a toujours un élément opposé B'B', situé à la même hauteur que BB, et qui éprouve une égale tendance à se mouvoir en sens contraire, de sorte que tous ces efforts, nécessairement opposés les uns aux autres dans le contour du vase, se compensent mutuellement. Mais si l'on perçait la paroi en un de ses points, tel que BB ou B'B', alors la pression en ce point n'étant plus supportée par les parois du vase, la pression opposée à celle-là agirait seule, et par son effort pousserait le vase et le liquide dans le sens qui lui est propre. Ce résultat remarquable est réalisé par l'appareil représenté *fig. 33*. AB est un tube vertical en verre, dont l'orifice supérieur B est ouvert. L'orifice inférieur A est terminé par un bouchon dans lequel on insère deux portions de tube ATO, AT'O' d'un moindre calibre, que l'on fait communiquer intérieurement au gros tube AB, et que l'on dispose horizontalement dans une direction diamétralement opposée. L'extrémité libre O, O', de chacun de ces tubes est recourbée horizontalement à angle droit, et effilée en pointe. Supposez maintenant ces extrémités bouchées, et le gros tube suspendu par le haut à un fil assez fin pour lui permettre de tourner avec facilité autour de la verticale. Si l'on remplit d'eau tout l'appareil, les pressions latérales exercées contre les parois se trouveront par-tout détruites, et il n'en résultera aucun mouvement. Mais, si vous ôtez les bouchons qui fermaient les becs O, O', des deux tubes horizontaux, les parois se trouvant ainsi percées en ces points, le fluide s'y écoulera librement, et par conséquent rien ne balancera les pressions exercées contre la partie des parois qui leur est opposée; en conséquence, ces

pressions pousseront les tubes ATO , $AT'O'$, et donneront à l'appareil un mouvement de rotation opposé à la direction de l'écoulement (1).

Les mêmes principes qui viennent de nous servir pour calculer les pressions exercées sur les parois latérales des vases, nous donneront la mesure de celles que leur fond supporte. Cette pression s'évaluera de la même manière, et, pour chaque point, elle dépendra uniquement de sa profondeur au-dessous de la surface libre. Donc, si le fond est horizontal, tous ses points seront pressés également, et la pression totale qu'il supportera sera égale au poids d'une colonne liquide, ayant pour base sa superficie et pour hauteur sa distance à la surface libre. La configuration des parois latérales n'entre pour rien dans cette évaluation; et ainsi elle est la même, soit que le vase soit cylindrique, comme le représente la *fig.* 32, ou évasé par le haut comme dans la *fig.* 34, ou enfin rétréci comme dans la *fig.* 35. Dans tous ces cas, si l'étendue du fond, et la hauteur, ainsi que la nature du liquide, sont les mêmes, la pression totale sur le fond sera la même aussi.

De là résulte cette conséquence en apparence très-paradoxe, que, dans un vase rétréci par le haut, la pression sur le fond surpasse toujours le poids total du fluide que le vase renferme, et peut même le surpasser dans une proportion enorme, en élevant sur une large base un simple filet fluide, comme le représente la *fig.* 36. Cependant, si l'on pèse un pareil vase avec le liquide qu'il renferme, le poids de l'un et de l'autre est la seule chose qui se fasse sentir; et la pression éprouvée par le fond, quelque grande qu'elle puisse être, n'y

(1) Pour faire commodément cette expérience, on peut se dispenser de boucher et de déboucher les petits orifices OO' . Il suffit de fermer l'orifice supérieur B du gros tube; alors le liquide ne pouvant s'abaisser dans ce tube sans qu'il s'y fasse un vide, l'écoulement n'a pas lieu. Mais il commence dès qu'on ouvre l'orifice supérieur. Dans ce cas, c'est l'air lui-même qui sert de bouchon contre les petits orifices OO' , en vertu de la pression qu'il exerce. C'est ce que l'on comprendra plus tard quand nous traiterons de la pesanteur de l'air; mais, dès à présent, on peut constater ce fait par l'expérience même, et s'en servir pour simplifier l'opération.

ajoute absolument rien. C'est qu'elle est en partie contre-balançée, dans le système total, par les pressions exercées en sens contraire sur d'autres portions des parois. Par exemple, dans le vase *ACD*, *fig. 37*, lequel va en s'élargissant horizontalement vers le bas, considérons deux petits élémens des parois, tels que *B* et *B'*, situés sur une même verticale, égaux en surface, et se regardant mutuellement. Puis, menons à partir de chacun d'eux un canal infiniment mince qui, d'abord horizontal, se recourbe ensuite verticalement jusqu'à la surface libre du liquide. Chacun de ces élémens éprouvera toute la pression exercée par la colonne liquide contenue dans la branche verticale du petit canal qui lui correspond; mais, en vertu de leur disposition contraire, l'un *B* en sera poussé de haut en bas, et l'autre *B'* en sera soulevé de bas en haut. Il ne restera donc, pour mouvoir le vase, que la différence de ces deux efforts, c'est-à-dire le poids de la colonne liquide *BB'*, comprise entre les deux élémens, poids que l'on retrouve en effet en pesant le système. Pour plus de simplicité, nous avons considéré ici des parois planes et directement opposées l'une à l'autre; mais la même compensation s'opérerait pour des parois courbes, ainsi que le calcul le fait voir; et cela est tout-à-fait analogue à la destruction mutuelle des pressions horizontales. Cette démonstration explique, comme on voit, tout ce qu'il y avait de singulier au premier coup d'œil, dans cette disproportion entre le poids des liquides et la pression qu'ils exercent sur le fond des vases où ils sont renfermés. C'est que cette pression et le poids absolu sont des choses très-différentes. On s'est servi de cette propriété dans quelques machines, pour presser également et fortement de grandes surfaces par la simple élévation d'un filet liquide.

Il importe de remarquer que cette pression, variable avec la profondeur, dépend ici de la pesanteur qui agit sur les couches liquides. Généralement, dans un liquide dont toutes les molécules sont sollicitées par des forces motrices quelconques, il n'y a de pression variable que celle qui provient de ces forces. S'il existe, en outre, des pressions imprimées à quelques parties de la surface libre du liquide, celles-ci se

transmettent également à tous les points de l'intérieur et des parois, de sorte que la pression totale se compose de cette portion constante et de la première qui est variable. Tel est, par exemple, le mode d'équilibre intérieur d'une masse fluide qui, outre sa pesanteur propre, est pressée par le poids de l'atmosphère.

Nous avons jusqu'ici supposé que toutes les parties de la masse liquide en équilibre avaient des densités égales. Maintenant, si nous voulons considérer divers liquides renfermés dans des vases qui se communiquent, en les supposant d'ailleurs de nature à ne point se mêler, il n'y aura qu'à donner aux colonnes verticales qui devront se faire équilibre, des longueurs réciproques à leurs densités; et toutes les conditions de l'équilibre seront encore satisfaites, comme dans le cas d'un seul fluide. Il suit de là, par exemple, que si deux liquides se font ainsi équilibre dans les deux branches d'un siphon recourbé tel que **ABCD**, *fig.* 38, les hauteurs verticales des deux colonnes suivront le rapport que nous venons d'assigner.

Dans toutes ces applications, nous avons considéré les masses liquides comme sollicitées par des forces communes à toutes leurs particules. Mais si, outre ces forces générales, il en existait d'autres qui fussent particulières à certains points de la masse, il est évident que les phénomènes changeraient, et qu'il y aurait de nouvelles conditions d'équilibre appropriées à ces nouvelles suppositions. Cela a lieu en effet ainsi près des parois des vases, à cause de l'affinité que les matières qui les composent exercent sur les molécules du liquide, et à cause de celle que ces molécules elles-mêmes exercent toujours les unes sur les autres. Telle est, comme nous le verrons plus tard, la cause du défaut d'horizontalité des surfaces liquides près de leurs bords, leur ascension et leur dépression hors du niveau dans des tubes très-fins, et beaucoup d'autres phénomènes analogues, auxquels on a donné le nom de *capillaires*. Nous exposerons plus tard ce que l'expérience et le calcul réunis ont fait connaître de leurs lois générales.

CHAPITRE VII.

De l'équilibre des fluides aériformes.

LES fluides aériformes, tels que l'air et les autres gaz que la nature nous présente, diffèrent des liquides par deux caractères, l'expansibilité et la compressibilité. Ils sont expansibles, c'est-à-dire qu'ils tendent sans cesse à s'étendre dans les espaces libres ou limités où ils se trouvent, comme s'il existait entre leurs parties un principe répulsif qui les déterminât à se fuir mutuellement. Ils sont compressibles, c'est-à-dire que la même masse peut, sans cesser d'être gazeuse, être condensée en un volume moindre, au moyen de pressions extérieures, suffisantes pour surmonter sa tendance actuelle à l'expansion, tendance qui, pour le même gaz, change avec sa densité, ainsi qu'avec les degrés de froid ou de chaud qu'il éprouve et que l'on appelle sa *température*. La possibilité de ce rapprochement des particules gazeuses n'est sans doute pas indéfinie, car elle cesserait nécessairement lorsqu'elles seraient rapprochées jusqu'au contact; mais l'expérience prouve que les pressions que nous pouvons produire, sont loin de pouvoir amener les choses jusqu'à ce terme. Il n'existe pas même de gaz que nous puissions ainsi réduire par la pression à l'état liquide, état dans lequel les molécules sont vraisemblablement encore fort écartées. Outre les particularités précédentes, les gaz comme toutes les autres substances matérielles sont soumis à la pesanteur. Il faut donc, dans la recherche des lois de leur équilibre, avoir égard à toutes ces propriétés.

Cela posé, considérons une masse gazeuse ainsi constituée, contenue de toutes parts dans un vase à parois solides, et abandonnée en repos à ses propres efforts. Il est évident d'abord qu'elle s'étendra de tous côtés dans ce vase, le remplira entièrement, et en pressera les parois de dedans en dehors, avec la force d'expansion qui convient à son volume, à sa densité et généralement à son état actuel. En outre les couches

inférieures supportant le poids des supérieures se comprimeront sous leur pression; et il s'établira ainsi un décroissement de densité de bas en haut dans toute la hauteur du vase; ce qui fera varier la pression contre les parois, tant celle qui provient de la pesanteur du gaz, que celle qui dépend de son ressort, puisque le ressort varie avec la densité.

Néanmoins, dans une petite masse de gaz, cette variation de la pression sera très-faible, et ordinairement insensible à cause de la petitesse du poids comparativement à la force d'expansibilité. Alors, si l'on perce les parois à un endroit quelconque, et qu'on applique à l'ouverture un piston mobile, une soupape ou telle autre mécanique propre à mesurer la pression de dedans en dehors, on trouvera qu'elle est sensiblement la même dans toute l'étendue des parois; c'est-à-dire, que chaque unité de surface, chaque millimètre carré par exemple, en éprouve un effort égal. De plus, si l'on dispose ainsi plusieurs pistons qui, en pénétrant dans la masse gazeuse, la compriment avec une certaine force, la pression produite par l'un quelconque d'entre eux se transmettra sans altération à tous les autres par l'intermédiaire de la substance gazeuse, comme nous avons vu que cela se faisait dans les liquides; de sorte que cette propriété qui constitue le principe de l'égalité de pression, a lieu aussi dans les gaz.

On peut vérifier ce résultat à l'aide de l'appareil représenté *fig. 39*. ABCD est un vase cylindrique creux, dans les parois duquel on a percé, à diverses hauteurs, des trous O, O', O'', par lesquels pénètrent divers tubes de verre, qui sortent d'abord perpendiculaires au cylindre, et descendent ensuite verticalement, après quoi ils se redressent de nouveau, en formant un siphon à branches parallèles. On introduit dans chacun de ces siphons, un liquide coloré, qui se dispose de niveau dans leurs deux branches. Alors, ayant marqué sur chaque tube les limites de ces diverses colonnes, on plongé la base du cylindre dans un vase plein d'eau, et on l'y enfonce à une certaine profondeur, ce qui exige que l'on exerce une pression sur le vase, parce que l'air intérieur résiste à être comprimé. Mais, par cela même, cette

compression qu'il éprouve, se communique à toutes les parties de sa masse, et se manifeste, dans les petits tubes, par une élévation du liquide proportionnée à son énergie. Or l'on trouve que cette élévation est égale dans tous; ce qui prouve qu'elle s'est transmise également à tous les points des parois auxquels ils aboutissent; et, en outre, si le liquide contenu dans les siphons est le même que celui que contient la cuve, la différence de niveau qui s'opère dans les premiers, est égale à la dépression que le liquide éprouve dans l'intérieur du cylindre par la résistance de l'air intérieur; en effet cette dépression mesure le poids de la colonne liquide par lequel l'air intérieur est comprimé.

Maintenant, si nous revenons à considérer en général l'équilibre d'une masse gazeuse, expansible, compressible et pesante, nous pouvons apporter à cette recherche la même simplification qui nous a servi pour les liquides, c'est-à-dire faire dépendre l'équilibre de la masse entière de celui d'un canal de forme quelconque, rentrant sur lui-même ou fermé à ses extrémités. Car la résistance qu'offrait alors l'incompressibilité du liquide, est ici remplacée par la réaction élastique des particules gazeuses; et l'on peut, sans troubler l'équilibre, substituer, à l'une comme à l'autre, la résistance de points fixes ou de parois solides, que l'on devra de même supposer sans force aux endroits où la masse gazeuse sera limitée par une surface libre. De là on déduira que, dans l'équilibre des gaz comme dans celui des liquides, la pression à la surface libre doit être nulle ou constante et dirigée de l'extérieur à l'intérieur; et qu'en outre la forme de cette surface doit être partout normale à la résultante des forces qui sollicitent les particules qui y sont situées. La première condition ne pourrait être remplie dans les substances gazeuses que nous offre la nature, si les lois de leur expansibilité indéfinie étaient rigoureusement et invariablement telles qu'elles s'offrent à nous dans les limites de condensation, de raréfaction et de températures auxquelles nos expériences peuvent s'étendre. Car nous trouvons ainsi, que le ressort d'un gaz ne devient jamais absolument nul, quelque faible qu'on suppose sa den-

sité. Mais il faut pourtant qu'il y ait des circonstances inconnues par lesquelles cette expansibilité indéfinie puisse être restreinte, puisque l'atmosphère terrestre, par exemple, quoique isolée dans le vide des cieux, ne se dissipe pas, et accompagne la terre dans son cours en partageant tous ses mouvemens. Peut-être le froid excessif qui existe, comme nous le verrons plus tard, dans les hautes régions de l'atmosphère, change-t-il assez la constitution de ses dernières couches pour anéantir leur tendance à l'expansion; car si la gravité seule retenait les dernières particules atmosphériques, en faisant équilibre à leur ressort simplement affaibli, elles devraient se mouvoir autour de la terre comme autant de satellites, au lieu de tourner avec elles, en vingt-quatre heures, comme lui étant adhérentes.

Si de la surface, libre ou non libre, nous passons aux couches intérieures, les conditions de leur équilibre seront les mêmes que celles d'une simple colonne gazeuse qui s'étendrait de haut en bas dans toute la masse. Si, pour plus de simplicité, nous supposons ce canal bouché à son extrémité inférieure, les couches superposées se comprimeront, comme nous le disions tout-à-l'heure, en vertu de leur propre poids; et la variation de leur densité dépendra de la manière dont leur ressort croît à mesure qu'elles se compriment. Il faudra en outre avoir égard à toutes les causes qui peuvent modifier l'énergie de ce ressort, comme le froid, la chaleur et la nature des vapeurs qui peuvent y être mêlées. La complication de tant de causes, dont nous ne pouvons même pas bien connaître l'intensité accidentelle, fait que les conditions réelles de l'équilibre des couches atmosphériques sont très-difficiles à fixer, et qu'on ne peut les obtenir qu'approximativement, en supposant des modes de constitution suffisamment réguliers pour être soumis au calcul, et suffisamment approchés de la réalité pour que leurs conséquences, dans les parties que nous en pouvons vérifier, soient conformes aux observations. C'est à quoi l'on parvient, surtout par les indications des deux instrumens précieux appelés le baromètre et le thermomètre. Nous les ferons connaître plus tard.

CHAPITRE VIII.

Conditions de l'équilibre des corps solides plongés dans des fluides pesans.

LORSQU'UN corps solide plonge, en tout ou en partie, dans un liquide ou dans un gaz pesant, la portion plongée de sa surface doit être considérée comme une paroi par laquelle le fluide est limité, et qui, conséquemment, supporte les mêmes pressions que supportaient auparavant les molécules liquides dont elle occupe la place. Or, ces pressions réunies tenaient alors en équilibre la masse fluide actuellement remplacée par le corps plongé. Elles avaient donc, et elles ont encore une résultante égale au poids de cette masse, passant par son centre de gravité, et dirigée de bas en haut. Le poids du corps plongé est aussi une force égale au poids de ce corps, appliquée à son centre de gravité et dirigée de haut en bas. Pour l'équilibre, il faut que ces deux forces soient égales et opposées en direction. De là découlent généralement toutes les lois de l'équilibre des corps solides, plongés dans des milieux fluides, ou flottans à leur surface; mais ici nous nous bornerons à considérer les milieux d'une densité uniforme, ce qui comprend les liquides incompressibles, et peut même être appliqué aux masses gazeuses contenues dans des vases de peu d'étendue.

Si le corps solide est entièrement plongé, et qu'il soit d'ailleurs homogène, son centre de gravité coïncide nécessairement avec celui de la masse fluide dont il occupe la place. La condition de l'opposition des forces est donc satisfaite, il ne faut plus pour l'équilibre que leur égalité. Si le corps pèse autant que le fluide, il s'y maintiendra par-tout en équilibre. S'il est plus lourd, il tombera au fond en vertu de son excès de poids; enfin, s'il est moins lourd, il remontera à la surface supérieure, et si elle est libre, il sortira en partie. Dans tous les cas, il perdra une portion de son poids, égale à celui du volume de fluide qu'il remplace.

Si le corps n'est pas homogène , son centre de gravité ne coïncidera pas en général avec celui de la masse fluide : alors la condition de l'opposition des forces exigera que ces deux centres soient situés dans la même verticale ; et ainsi , il faudra , pour l'équilibre , que le corps plongé soit placé de façon à y satisfaire. Dans toute autre position , ce corps culbutera nécessairement , son centre de gravité n'étant pas soutenu.

Si le corps solide n'est qu'en partie plongé , il n'est toujours soulevé que par le poids de la quantité de fluide qu'il déplace. Il l'est donc moins que s'il plongeait entièrement. Pour qu'il se tienne en équilibre , il faudra que ce poids soit égal au sien , et que le centre de gravité de la masse fluide déplacée soit situé dans la même verticale que le centre de gravité du corps entier. Tel est le cas des corps qui flottent librement sur un liquide. Lorsqu'on les y jette , ils s'arrangent naturellement de manière que ces conditions soient remplies ; mais ils oscillent d'abord pendant un certain temps , jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à cet état , et qu'ils aient pu s'y fixer.

La perte de poids que les corps font dans les liquides où ils plongent , peut aisément se vérifier en comparant les efforts qu'il faut faire pour soutenir un même corps lorsqu'il est plongé dans l'eau et lorsqu'il en est retiré. Car, bien que ce corps perde encore dans l'air une partie de son poids , égale au volume de ce fluide qu'il déplace , cela devient à peine sensible à cause du peu de densité de l'air. L'expérience se fait avec plus de rigueur en mesurant le poids effectif des corps dans ces différens cas , comme nous apprendrons par la suite à le faire. Alors on peut apprécier la perte de poids , même dans l'air.

CHAPITRE IX.

Notions générales sur les diverses espèces de mouvemens, sur le temps, la vitesse et la masse.

Nous avons appelé *mouvement* le transport des points matériels d'un lieu à l'autre de l'espace. Concevons deux de ces

points, MM' , *fig. 40*, qui, d'abord immobiles; partent pour se mouvoir dans des directions exactement parallèles, et perpendiculaires à la ligne droite qui unissait leurs directions primitives. Il se pourra que leur départ soit simultané; il se pourra qu'il soit successif. Dans ce dernier cas, l'un des deux points, M , par exemple, partira *avant* l'autre, et celui-ci partira *après* le premier. Ces phénomènes d'*avant* et d'*après* déterminent ainsi en nous l'idée abstraite *du temps*, résultante de la comparaison de l'état successif à l'état de coexistence. Quant au sentiment de ces deux états, c'est la mémoire qui nous le donne, en retraçant à notre esprit l'ordre et la succession des impressions physiques et morales que nous avons éprouvées, long-temps après que les événemens qui les avaient produites ont cessé d'être.

Revenons maintenant à considérer nos deux points matériels, et supposons qu'ils partent simultanément; il pourra arriver deux choses: ou ces deux points coexisteront toujours à des distances égales de leur point de départ, *fig. 41*, ou ils parviendront simultanément à des distances différentes, et l'un précédera l'autre, *fig. 42*. Dans le premier cas ils auront des mouvemens égaux, dans le second ils en auront d'inégaux. Celui qui précédera l'autre sera plus rapide, celui qui demeurera en arrière sera plus lent. Il y a donc, sous ce rapport, des degrés de plus et de moins qui peuvent être comparés. C'est en cela que consiste la *vitesse*.

Pour faire cette comparaison avec exactitude, concevons un mouvement d'une telle nature que nous puissions à volonté le reproduire identiquement, et qu'il en résulte une série de phénomènes qui aient un commencement et une fin bien déterminés. Alors les vitesses de tous les autres mouvemens pourront être comparées entre elles d'après les espaces qu'elles font parcourir aux corps qu'elles animent, pendant que cette série de phénomènes s'accomplit. Une pareille série s'obtiendrait, par exemple, et même avec beaucoup d'exactitude, au moyen d'un vase doublement conique $ABCD$, *fig. 43*, que l'on remplirait d'eau ou de mercure par son sommet A , et qu'on laisserait ensuite se vider par un petit trou C percé à son fond.

Car l'écoulement total de cette eau ou de ce mercure serait un phénomène qui se reproduirait identiquement le même toutes les fois qu'on ferait l'expérience ; et ainsi son accomplissement occuperait une portion fixe de temps. Plusieurs vases pareils se vidant ainsi les uns après les autres , reproduiraient autant de ces périodes , toutes égales entre elles ; et leur succession plus ou moins nombreuse composerait des intervalles de temps en temps d'une durée de plus en plus grande. Cette période fondamentale pourrait se subdiviser de même en intervalles d'une durée moindre , à l'aide de vases semblables d'une plus petite dimension ; et, quand on serait ainsi parvenu à fixer les moindres intervalles dont l'observation fût possible, il est évident qu'on pourrait désigner tous les intervalles de temps imaginables au moyen de ces unités et de leurs subdivisions ; on aurait donc ainsi *une mesure exacte du temps*, dont on pourrait se servir pour comparer les vitesses.

Ce moyen chronométrique a été long-temps le seul dont on fit usage. Pour éviter de multiplier les vases coniques , on en avait deux , à fond fermé , l'un au-dessous de l'autre , communiquant par un trou commun et fort petit, *fig. 44*. On remplissait un de ces cônes d'eau ou de sable , et lorsqu'il s'était vidé dans l'autre , on retournait rapidement celui-ci , dans un intervalle de temps que l'on regardait comme insensible ; puis on le laissait s'écouler de nouveau , après quoi on le retournait encore. Ces instrumens se nommaient des *clepsydes*. Aujourd'hui nous mesurons le temps par des procédés incomparablement plus exacts , et dont les résultats se notent d'eux-mêmes sans exiger la présence continuelle d'un observateur : ce sont les montres à ressort et les horloges à pendule. Nous donnerons plus tard une idée de leur mécanisme. Ici, il nous suffira de dire qu'ils consistent , comme les clepsydes ; dans la répétition d'un mouvement périodique toujours le même , de sorte que le mode par lequel ils mesurent le temps est le même aussi. Dans l'usage le plus ordinaire , la plus petite fraction de temps employée s'appelle une *seconde*. La succession de soixante secondes forme une *minute*, soixante minutes forment une *heure* , et vingt-quatre heures ,

ou 86400 secondes, égalent l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux retours consécutifs du soleil au méridien. Comme le mouvement diurne du soleil est inégal dans les diverses époques de l'année, l'intervalle de ses retours au méridien varie; et ainsi *la seconde*, qui en dérive par une subdivision fixe, varie de même. Mais cette altération peut être négligée dans les usages habituels de la vie, parce qu'elle est fort petite et qu'elle oscille, tantôt en plus, tantôt en moins, dans des limites fort étroites. Néanmoins les astronomes la corrigent, parce qu'ils ont besoin d'une précision beaucoup plus grande; et ils règlent leurs secondes, leurs minutes et leurs heures sur la marche constante d'un soleil fictif, dont le mouvement serait une moyenne entre la marche, tantôt plus lente, tantôt plus rapide, du vrai soleil.

La mesure du temps nous fournit le moyen de comparer non-seulement la vitesse des divers mouvemens, mais encore leur nature, déterminée par le mode suivant lequel ils s'accomplissent. Le plus simple des mouvemens est celui que l'on appelle *uniforme*, parce que le mobile s'y trouve à chaque instant dans le même état qu'au moment de son départ. Tel est, par exemple, celui qui résulterait, dans le vide, de l'impulsion subite produite par une force instantanée. Car le mobile qui aurait éprouvé cette impulsion, ne pouvant qu'y obéir en vertu de son inertie, persisterait à chaque instant dans le mouvement qu'il aurait une fois reçu. Il parcourrait donc, en temps égaux, des espaces égaux, quel que fût le temps écoulé depuis son départ; et, en conséquence, les espaces entiers parcourus depuis cette époque seraient proportionnels aux temps employés à les parcourir. Tel est le caractère expérimental auquel on reconnaît les mouvemens uniformes. La vitesse de ces mouvemens s'évalue d'après l'espace qu'ils font parcourir au même mobile, dans un temps donné, par exemple dans une seconde, en caractérisant chaque vitesse par le nombre de mètres parcourus.

Mais il y a d'autres mouvemens dans lesquels le mobile est sollicité sans cesse par l'impression de la force motrice, qui continue d'agir sur lui après son départ. Alors le mode et la

rapidité de la translation *varient* sans cesse, et c'est pourquoi ce genre de mouvement a reçu la dénomination de *varié*. Il peut l'être de deux manières, *accélééré*, ou *retardé*, selon que l'action continue de la force, ou des forces, qui sollicitent le mobile, tend à l'accélérer ou à le ralentir. Nous avons un exemple vulgaire du mouvement accélééré, dans la chute des corps pesans qui tombent librement de haut en bas; et du mouvement retardé dans l'ascension des mêmes corps, lorsqu'ils sont lancés de bas en haut par une impulsion primitive.

Lorsqu'un corps éprouve ainsi un mouvement varié, produit par l'action continuée d'une force *accélératrice*, si cette force cessait tout-à-coup de le solliciter, il est évident qu'il continuerait à se mouvoir uniquement en vertu des impressions qu'il en aurait reçues précédemment, et de même que s'il se trouvait actuellement lancé par la somme de toutes ces impulsions : son mouvement deviendrait donc uniforme. Or, la vitesse plus ou moins grande de ce mouvement virtuel exprime précisément l'état où se trouve le mobile à l'époque où il est disposé à s'établir, et ainsi son évaluation est très-propre à fixer nettement toutes les phases que l'accélération ou le retardement peuvent présenter. On l'obtient par le calcul, quand on connaît la loi du mouvement que l'on considère, c'est-à-dire, la relation générale des temps aux espaces parcourus pour une époque quelconque; et l'on s'en sert en effet pour comparer les diverses phases d'un même mouvement à diverses époques, ou les phases semblables de plusieurs mouvemens différens. C'est ce que l'on nomme leur *vitesse*. Il est évident que cette dénomination ainsi généralisée, s'applique aussi au mouvement uniforme. Toute la différence de ce mouvement aux autres, c'est que la vitesse y est constante, au lieu que, dans ceux-ci, elle est variable à des époques diverses : mais la constance est un cas particulier de la variabilité, puisque c'est celui où l'étendue de la variation est nulle.

L'exemple le plus simple de l'action des forces accélératrices s'offre à nous dans la chute libre des corps. Quoique, à la rigueur, on découvre que la pesanteur diminue à mesure que l'on s'éloigne de la terre, néanmoins, dans le très-grand

nombre des expériences, cette variation peut être négligée; car ce n'est qu'avec des appareils d'une délicatesse extrême qu'elle devient appréciable dans les petites hauteurs où nous pouvons nous élever au-dessus de la surface terrestre; et, à cela près, on trouve que, dans chaque lieu, les corps tombent toujours également vite, soit qu'ils partent d'un peu plus haut ou d'un peu plus bas. La pesanteur agit donc alors constamment sur chaque corps pendant sa chute, et elle agit, à chaque instant, avec une énergie sensiblement égale, qui redouble les premières impressions qu'elle avait précédemment exercées. Ce mode d'action étant défini, le calcul détermine l'espèce particulière de mouvement qui en résulte, en supposant le mobile partant du repos et abandonné librement à lui-même. La solution de ce problème découvre les lois suivantes.

L'espace total parcouru par le corps qui tombe, est proportionnel au carré du temps écoulé depuis l'instant de son départ; c'est-à-dire que, si cet espace est représenté généralement par 1 après la 1^{re}. seconde, il sera 4 après la 2^e., 9 après la 3^e., 16 après la 4^e., et ainsi de suite, en multipliant toujours le nombre de secondes par lui-même. Cette longueur 1 est de 4^m,9044 à la latitude de Paris.

Si, à une époque quelconque de la chute, on conçoit l'action de la pesanteur suspendue, le corps continuera à tomber d'un mouvement uniforme; et sa vitesse, devenue alors constante, sera telle que, dans un temps égal à celui qui est déjà écoulé depuis sa chute, il parcourra un espace double de celui qu'il avait d'abord parcouru. Cette loi est une conséquence de la précédente. En effet, lorsque le mobile est tombé pendant deux secondes, l'espace total qu'il a décrit, se compose, 1^o. des 4^m,9044 parcourus dans la 1^{re}. seconde, en vertu de la seule action de la pesanteur; 2^o. d'un espace égal décrit en vertu de la même action renouvelée pendant la seconde suivante; 4^o. enfin, de l'effet inconnu que la vitesse acquise à la fin de la première seconde a dû produire dans la seconde suivante. Il faudra donc que cet effet égale deux fois 4^m,9044, ou 9^m,8088, puisque l'espace total décrit à la fin de la 2^e. seconde, doit être quadruple de 4^m,9044. De même, après deux

secondes de chute, le corps étant tombé de $19^m,6176$, deviendra capable de décrire le double de cet espace en 2 secondes, par le seul effort de sa vitesse acquise, et conséquemment en $1''$ cet espace lui-même, c'est-à-dire, le double de $9^m,8088$. En calculant ainsi la suite des vitesses acquises après 1, 2, 3, 4, secondes de chute, et réduisant leurs effets à ce qu'ils seraient en $1''$, on les trouve exprimées par 2, 4, 6, 8, etc., en représentant toujours par 1 l'espace fondamental parcouru pendant la première seconde de la chute libre. *Ces vitesses croissent donc proportionnellement au temps.*

En combinant cette proposition avec la précédente, qui exprime la relation des espaces avec les temps employés à les parcourir, on en tire le moyen de calculer la vitesse d'après la seule connaissance de l'espace parcouru, et l'on obtient ainsi la règle suivante : *Pour avoir la vitesse correspondante à une hauteur de chute donnée, multipliez le double de cette hauteur par le double de l'espace qui serait décrit en une seconde de temps, c'est-à-dire à Paris, par $9^m,8088$, et prenez la racine carrée du produit.*

Nous avons supposé le mobile partant du repos; mais il se pourrait qu'à son départ, il fût lancé par une impulsion primitive. Supposons cette impulsion verticale : si elle agissait seule et dans le vide, elle donnerait au mobile un mouvement uniforme et une vitesse constante. Combinée avec la pesanteur, sa puissance est encore la même. Mais l'effet total est différent. La vitesse variable produite par la pesanteur se joint à celle de l'impulsion primitive, et la modifie. Elle s'y ajoute, si cette impulsion est dirigée de haut en bas, et s'en retranche, si elle est dirigée de bas en haut. Dans ce dernier cas, la vitesse croissante, due à la continuité de la pesanteur, détruit peu-à-peu la vitesse limitée que l'impulsion avait produite; et, lorsqu'elle l'a complètement anéantie, elle entraîne le mobile dans le sens qui lui est propre. C'est ce qu'on observe en effet dans les corps pesans lancés verticalement de bas en haut; ils montent d'abord avec un mouvement retardé jusqu'à une certaine élévation à laquelle ils deviennent un moment stationnaires, après quoi ils retombent en chute

libre. D'après la manière dont la vitesse constante et la vitesse variable se combattent dans cette circonstance, il devient évident que, *pour lancer un corps à une hauteur donnée, dans le vide, il faut lui imprimer une vitesse d'impulsion exactement égale à celle qu'il acquerrait en tombant librement de cette hauteur.*

Galilée, qui, le premier, découvrit les lois précédentes du mouvement des graves, les confirma par l'expérience, en faisant tomber des corps d'une grande hauteur, et observant les diverses circonstances de leur mouvement. Mais ce mode d'expérience est sujet à quelques incorrections à cause de la résistance que l'air oppose au mouvement des corps, résistance qui provient, 1^o, de l'inertie de ses particules, laquelle leur fait prendre une partie de la force du corps qui les choque; 2^o. de leur réaction élastique, qui fait qu'elles résistent à la compression qu'il exerce sur elles, en les poussant les unes sur les autres. Aussi Galilée eut-il soin d'atténuer l'influence de ces causes en choisissant des corps qui eussent beaucoup de poids sous peu de volume, tels que des boules de plomb et d'autres métaux. Car la résistance de l'air dépendant de l'étendue de la surface choquée, et la somme des forces motrices étant exprimée par le poids, il est clair que plus le poids est considérable, à surface égale, plus la résistance opposée par l'air devient petite, comparativement à la force qui produit la chute, d'où résulte une moindre diminution dans la vitesse. Aujourd'hui nous pouvons supprimer cet obstacle en faisant tomber les corps dans des tubes vides d'air; et en effet, on observe alors que les plus rares et les plus denses, la plume et le plomb, par exemple, tombent avec d'égales vitesses. Mais la parfaite égalité du temps de leur chute est la seule chose que l'on puisse observer par ce procédé; car les tubes dont on peut faire usage sont toujours beaucoup trop courts pour qu'on puisse y reconnaître, encore moins y mesurer, l'accélération du mouvement. Mais on peut arriver au même but à l'aide d'un appareil ingénieux imaginé par Atwood, et représenté *fig. 45.*

Pour en comprendre l'esprit, il faut d'abord savoir que la résistance des milieux aériformes croît plus rapidement que

la vitesse des corps qui s'y meuvent. Elle est presque exactement quadruple pour une vitesse double, nonuple pour une triple, et ainsi de suite, selon la loi des carrés. Il suit de là que, si l'on pouvait observer la chute des corps avec une pesanteur beaucoup moindre que la véritable, l'influence de la résistance de l'air pourrait devenir assez faible pour être négligée, sans qu'il y eût d'ailleurs rien de changé aux lois de l'accélération, si ce n'est qu'elle serait moins rapide, et qu'en conséquence, on pourrait très-bien la reconnaître et la mesurer, avec des hauteurs de chute fort petites. Ce sont précisément tous ces avantages que procure l'appareil d'Atwood. Pour le réduire à son plus grand degré de simplicité, concevez une poulie dont l'axe soit fixe, et sur laquelle passe un fil de soie très-fin, tiré à ses deux bouts par deux poids parfaitement égaux entre eux, et assez gros, tels, par exemple, qu'un demi ou un quart de kilogramme. Je supposerai d'abord que le fil n'a aucun poids sensible, et que son mouvement sur la poulie, ainsi que la rotation de celle-ci autour de son axe, sont parfaitement libres et exempts de tout frottement. Cela posé, il est clair que les deux poids se feront parfaitement équilibre dans quelque position qu'on les place, l'effort de la pesanteur sur l'un et sur l'autre étant exactement le même. De plus, à cause de la parfaite liberté de la poulie et du fil, la plus petite impulsion imprimée verticalement à l'un des poids ou à l'autre suffira pour les mettre en mouvement; et, puisque toute l'action de la gravité est compensée par leur réaction mutuelle, ce mouvement sera uniforme, c'est-à-dire que des hauteurs égales seront parcourues par chacun des poids en temps égaux. Ce premier résultat sera facile à vérifier en plaçant une horloge tout près de l'appareil, et mesurant avec exactitude les battemens écoulés pendant que chaque poids arrive ainsi à des marques fixes tracées sur une échelle verticale à diverses hauteurs, comme le représente la *fig.* 45.

Maintenant je suppose que l'on ajoute, sur une des masses égales, une petite rondelle métallique très-mince, équivalente à une très-petite fraction de son poids, par exemple, à $\frac{1}{555}$. Ce petit corps, s'il était libre et abandonné à lui-même, tom-

berait naturellement vers la terre en vertu de sa pesanteur ; et avec l'accélération ordinaire imprimée par cette force. Mais lorsqu'il est, dans l'appareil, lié avec l'une et l'autre masse, il ne peut descendre sans que celles-ci participent à son mouvement ; il est donc obligé de partager avec elles la force que la pesanteur lui imprime, et il en résulte le même effet que si cette force était uniformément répartie entre toutes les parcelles de matière qui composent le système total des trois masses, ce qui atténue l'énergie de son action individuelle suivant la même proportion. Par exemple, si les deux grosses masses pèsent ensemble 499 grammes, et que la petite en pèse 1, l'effort ordinaire de la pesanteur sur ce gramme se distribuera également entre les 500 qui composent le système ; c'est-à-dire que chaque particule de ces corps sera sollicitée par une gravité qui sera seulement $\frac{1}{500}$ de la gravité naturelle ; et l'énergie de cette force se trouvant affaiblie par cette répartition, l'accélération qu'elle produit devra probablement devenir aussi moins rapide. On pourra donc en observer les effets dans l'air, aussi bien que dans le vide, à cause du peu de résistance qu'ils exciteront ; et une médiocre hauteur, telle par exemple que deux mètres, suffira pour en mettre en évidence toutes les particularités. Si l'on emploie successivement des masses additionnelles dont les poids soient divers, on produira autant de gravités différentes, et l'on verra quels rapports existent entre leurs intensités et la vitesse des mouvemens qu'elles produisent.

Pour faciliter l'exécution de ces expériences, on adapte ordinairement à l'horloge une détente, qui soutient la plus lourde des deux masses, à une hauteur fixe, que l'on prend pour point de départ. Une échelle verticale de divisions égales, part de ce point et est destinée à mesurer les espaces parcourus. Lorsque l'aiguille de l'horloge arrive à un des points du cadran, par exemple, à celui qui est marqué 0, le battement même de l'horloge fait partir la détente, et il ne reste plus qu'à compter le nombre de ces battemens qui s'exécutent depuis celui-là, jusqu'à l'instant où la masse descendante arrive à la hauteur que l'on a choisie pour terme de sa course.

Afin de pouvoir saisir cet instant avec précision, on fixe à la hauteur convenue un petit plan horizontal, qui glisse le long de la colonne de l'appareil, et contre lequel la petite masse va frapper.

Il est également facile de vérifier, avec cet appareil, la progression d'intensité des vitesses acquises à diverses époques de la chute. Pour cela, il n'y a qu'à donner à la masse additionnelle la forme d'une lame oblongue LL, *fig.* 46, qui se pose sur les grosses masses, en les débordant un peu de tous côtés : puis, ayant disposé un anneau mobile AA le long des montans de l'appareil, on placera cet anneau à telle distance que l'on voudra du point de départ où le mouvement commence. Lorsque la masse additionnelle sera descendue au niveau de l'anneau, elle sera arrêtée par lui et demeurera posée dessus. Il ne restera donc plus que les grosses masses, qui, se faisant mutuellement équilibre, et étant par conséquent comme insensibles à l'action de la gravité, ne continueront à se mouvoir qu'en vertu de la vitesse précédemment acquise. On pourra donc connaître par-là si cette vitesse suit réellement, pour diverses hauteurs de chute, les proportions que nous lui avons assignées.

Les expériences faites de cette manière, confirment en effet plusieurs des lois que nous avons énoncées plus haut, comme résultantes de la supposition d'une force accélératrice constante. Ainsi, en fixant successivement l'arrêt de la chute à diverses distances du point de départ, et répétant l'observation pour ces diverses distances, avec une même masse additionnelle, on trouve que les espaces parcourus sont très-exactement proportionnels aux carrés des temps écoulés depuis le commencement de la chute. On trouve aussi qu'en enlevant, à une époque quelconque, la masse additionnelle, le mouvement se continue avec une vitesse uniforme; et ce mouvement est tel, que, si on le laisse subsister autant de temps qu'il s'en est écoulé depuis le commencement de la chute jusqu'à l'instant où il a commencé, il fait décrire pendant ce temps à la masse descendante, un espace double de celui qu'elle avait parcouru d'abord en mouvement accéléré sous l'influence continuelle de sa pesanteur; ce qui est précisément la loi de

vitesse que nous avons dit appartenir aux forces accélératrices constantes.

Enfin, on trouve encore que, plus la masse additionnelle est considérable par rapport aux grosses masses qu'elle doit mouvoir, plus l'accélération du mouvement devient rapide, et par conséquent plus la gravité qui en résulte est puissante. Mais, en comparant les espaces que ces gravités diverses font parcourir aux masses, en temps égal, on ne trouve pas qu'ils croissent dans le rapport des gravités individuelles, telles qu'on les conclurait d'après le calcul de la répartition des forces, comme nous l'avons fait plus haut. De sorte qu'à en juger par ce genre d'expériences, les vitesses imprimées ne seraient pas proportionnelles aux intensités des forces qui les produisent.

Ce résultat est toutefois d'une si grande importance et d'une application si continuelle, qu'il serait hasardeux de l'établir seulement sur les indications d'un appareil aussi composé. En effet, nous reconnâtrons tout-à-l'heure qu'il est inexact, et que, dans la nature, les forces sont exactement proportionnelles aux vitesses. L'erreur vient de ce qu'en réalité l'appareil d'Atwood diffère beaucoup de la simplicité idéale à laquelle nous l'avons réduit. Nous avons supposé un fil absolument sans pesanteur et une poulie tout-à-fait sans frottement. On approche autant qu'on le peut de ces conditions idéales, en employant un fil très-fin, très-flexible, et suspendant l'axe de la poulie sur d'autres poulies qui sont elles-mêmes très-mobiles, comme le représente la *fig. 45*, où l'appareil est complètement dessiné. Mais, malgré toutes ces précautions, il reste toujours quelques traces des mouvemens que l'on voulait éviter. Car il faut toujours que les masses, en tirant le fil dans leur chute, fassent tourner les poulies, et cela ne peut se faire sans qu'elles y emploient une partie de la gravité qui les anime; de sorte que, en réalité, il faudrait considérer à-la-fois les masses, les fils et les poulies, comme un système lié, dont les mouvemens simultanés sont déterminés par la seule influence de la masse additionnelle. La question ainsi envisagée, devient fort complexe, sur-tout

quand on veut avoir égard à toutes les dispositions de détail que présente réellement l'appareil. Alors il ne faut pas s'étonner si les phénomènes qu'il produit présentent quelques particularités différentes de celles qui devraient avoir lieu dans le cas de simplicité idéale que nous avons considéré d'abord. Toutefois, puisque, dans la complication réelle de cette machine, le mouvement des masses se trouve encore être uniformément accéléré, il est utile de l'employer comme un moyen de produire de pareils mouvemens ayant différentes vitesses, et sur chacun desquels on peut vérifier, par l'expérience, les lois de l'accélération.

Mais alors il devient indispensable de chercher quelque autre moyen rigoureux pour résoudre la question à laquelle cette discussion nous a conduits, et qui consiste à examiner si les vitesses sont, ou ne sont pas proportionnelles aux forces qui les produisent. En effet, lorsque nous ajoutons plusieurs forces ensemble, ou que nous diminuons une même force en la réduisant à la moitié, au tiers ou au quart de son intensité, rien ne prouve, *a priori*, que la vitesse qui en résultera sera réduite dans le même rapport. Il se pourrait que la chose fût autrement, par exemple, que la vitesse variât comme le carré de la force, ou comme toute autre puissance. C'est donc à l'expérience à nous éclairer sur cet objet, et à nous apprendre comment la chose se passe dans la nature.

Pour ne rien laisser ici d'obscur, il faut d'abord analyser avec un peu plus de détail le mode de répartition d'une force unique entre plusieurs portions de matière unies entre elles, répartition que nous avons vue réalisée dans la machine d'Atwood, mais dont nous avons alors seulement indiqué le principe. Elle est une simple application de la propriété de l'inertie, et on peut l'en déduire comme conséquence. Si une certaine force imprime à une particule matérielle un certain mouvement, pour donner le même mouvement à deux ou à trois particules semblables, mais séparées de la première, il faudra appliquer à chacune d'elles la même force que l'on a d'abord employée, et, par conséquent, le nombre total des forces croîtra comme celui des particules. Maintenant, si l'on réunit toutes

ces particules en un seul groupe, elles formeront un corps homogène, d'une grandeur sensible; et, comme leurs mouvements individuels ne se gêneront point mutuellement, le mouvement total sera encore le même que celui de chacune d'elles, à cela près, que la force totale employée pour le produire sera plus grande. Ainsi réciproquement, lorsqu'un corps homogène, d'une étendue sensible, a un certain mouvement commun à toutes ses particules, on peut concevoir ce mouvement comme l'effet d'une résultante totale, uniformément distribuée entre toutes les parties matérielles de ce corps: d'où il suit que, pour imprimer le même mouvement à une quantité double ou triple de la même matière, il faudrait employer une résultante totale qui serait double ou triple, ou en général augmentée dans la même proportion.

La quantité de matière ainsi contenue dans chaque corps, constitue ce que l'on appelle *sa masse*; mais, dans les applications, cet élément n'est jamais absolu, et on l'exprime en le rapportant à une unité de son espèce, c'est-à-dire, en prenant pour unité, une certaine quantité de matière connue. Alors toutes les autres masses sont exprimées par le nombre de fois qu'elles contiennent cette unité-là.

D'après cette définition, lorsque l'on sait que deux corps sont de même nature, il est facile de vérifier si leurs masses sont égales; car il n'y a qu'à leur imprimer des vitesses égales en sens contraire, et voir si ces deux corps, opposés l'un à l'autre, se font mutuellement équilibre. En effet, du moment où les vitesses seront égales, la force qui sera appliquée à l'unité de masse dans chacun de ces corps sera la même; ce sera celle qui est capable d'imprimer à l'unité de masse cette vitesse-là. Si donc il y a le même nombre d'unités de masses dans les deux corps, les efforts qui en résulteront seront égaux; et, si on les oppose l'un à l'autre, l'équilibre devra avoir lieu. Mais il n'aura pas lieu si l'un des corps contient plus de masse que l'autre, parce que les portions égales en masse se faisant équilibre, les quantités excédantes, dont l'effort persiste, détermineront un mouvement dans les deux corps.

L'expérience fait voir que tous les corps, quelles que soient

leur forme, leur grosseur et leur nature, tombent vers la terre avec une égale vitesse lorsqu'on peut les soustraire à la résistance de l'air. Cette égalité s'observe en effet dans les tubes d'où l'on a extrait l'air par des procédés que nous expliquerons dans la suite, et la plume la plus délicate y tombe aussi vite que l'or. Mais on peut en donner une démonstration plus rigoureuse encore par le mouvement des pendules, comme nous le verrons plus loin. Pour le moment bornons-nous à employer ceci comme un fait. Alors, pour imprimer à deux corps d'égales vitesses, il suffira de les laisser tomber, ou, ce qui revient au même, de les faire tirer de haut en bas par l'action de la pesanteur; et, si l'on sait d'ailleurs qu'ils sont de même nature, il suffira, pour constater l'égalité de leurs masses, d'observer s'ils ont le même poids. C'est à quoi l'on parviendra en les suspendant aux deux extrémités d'un levier dont les bras seront parfaitement égaux; car l'effort de chaque corps pour tomber se transmettant jusqu'à l'autre, en sens contraire, par la disposition de l'appareil, il faudra, si les masses des deux corps sont égales, que leurs efforts s'équilibrent entièrement. Ce procédé offrira même encore un autre avantage; c'est que l'observation devant porter uniquement sur un phénomène d'équilibre, elle ne sera point troublée par la résistance de l'air; car cette résistance, comme celle de tout autre fluide, ne se développe et ne se manifeste que dans le mouvement. C'est ce que l'on fait à l'aide des instrumens appelés *balances*, quand on s'en sert pour peser un corps avec des poids de même nature que lui.

Mais, en supposant l'équilibre ainsi établi entre des corps *de nature différente*, peut-on en conclure l'égalité de leurs masses? Pour cela il faudrait savoir si la même force appliquée à des quantités de matières égales, mais de différente nature, leur imprimerait les mêmes mouvemens. C'est ce que nous ne pouvons affirmer *à priori*. Heureusement, dans toutes les expériences que nous pouvons faire, cette question nous est absolument indifférente; car il n'y a qu'à toujours employer, sinon comme égales, du moins comme équivalentes, les masses qui, animées de vitesses égales, se font mutuellement

équilibre quand on oppose leurs mouvemens. Alors cette équivalence pourra, pour les corps de toute nature, se mesurer de même par l'égalité des poids, puisque la pesanteur imprime à tous les corps d'égales vitesses dans le vide. Une masse double sera donc indiquée par la nécessité de lui opposer un poids double pour lui faire équilibre; et, généralement, les poids seront proportionnels aux masses, de sorte qu'ils pourront servir à les comparer. Cela revient à faire abstraction, dans la mécanique, de la différente nature des corps, et à n'y considérer que des quantités diverses de matière inerte, également susceptibles d'être mises en mouvement. Cette remarque explique et confirme la règle donnée, page 45, pour évaluer les densités des corps d'après l'observation de leurs poids sous des volumes égaux.

Dans toute la discussion précédente nous nous sommes appuyés uniquement sur l'inertie de la matière : nous avons pu en conclure comment une même force s'affaiblit en se répartissant à des quantités de matières plus ou moins considérables. Mais cela ne nous apprend point quelles seront les diverses vitesses imprimées par cette force ainsi affaiblie; et, en général, on voit qu'il nous reste à déterminer quel est le rapport de toutes les vitesses avec les forces qui les produisent.

C'est à quoi l'on peut parvenir par l'observation des mouvemens qui s'opèrent dans la nature; car la manière dont les mouvemens composés résultent des mouvemens simples est une conséquence du rapport qui existe entre les forces et les vitesses. Pour le prouver, considérons deux points matériels M, M' , mus simultanément sur une même ligne droite, avec une vitesse commune que nous prendrons pour unité, et que nous supposerons avoir été produite par l'unité de force. Il est clair que ces deux points ne se sépareront pas. Mais si l'on applique à l'un d'eux, à M' , par exemple, une nouvelle force d'impulsion égale à la première, et dirigée dans le même sens qu'elle, ils se sépareront aussitôt; et M' s'éloignera de M . Maintenant, supposons la vitesse proportionnelle à la force : alors le point M' , animé par une force 2 , aura une vitesse comme 2 , c'est-à-dire, double de M ; il s'éloignera donc de M avec

un excès de vitesse égal à 1. Mais si la vitesse est, par exemple, proportionnelle au carré de la force; alors le mobile M' , animé par une force 2, aura une vitesse comme 4; et, par conséquent, il s'éloignera de M avec une vitesse comme 3, c'est-à-dire, triple de ce qu'elle aurait été dans la supposition précédente, et triple aussi de celle qu'aurait produite l'excès de force 1, s'il eût été seul appliqué à M' , M étant en repos.

En étudiant ainsi en général l'influence qu'exerce la relation de la vitesse à la force, dans la composition des mouvemens, on trouve que, si l'un de ces élémens est proportionnel à l'autre, les mouvemens relatifs d'un système de corps ne changent point quand on leur imprime à tous une vitesse commune; mais ils changent dans toute autre relation. Or, cette constance des mouvemens relatifs se montre avec évidence dans une infinité de phénomènes. Ainsi, une montre placée dans un bateau que l'on abandonne au cours d'une rivière tranquille, continue à y exécuter ses battemens de même que sur le rivage et avec la même régularité; et les détours de la rivière ou les circonvolutions que le bateau peut faire ne changent rien aux mouvemens relatifs des diverses pièces qui la composent. Mais si l'on veut un exemple plus simple encore et d'une observation plus facile, il n'y a qu'à poser la montre à plat sur le rivage même, et observer qu'elle ne change point sa marche quand on la tourne dans le plan horizontal où elle est placée; car, dans ces diverses positions, les mouvemens des pièces qu'elle renferme ont des directions différentes relativement au mouvement de la terre, et par conséquent ils se composent diversement avec lui. Il faut donc que la vitesse soit proportionnelle à la force dans la disposition actuelle de la nature, pour que tous ces mouvemens puissent donner la même résultante relative, dans toutes ces circonstances variées. Et c'est ainsi, c'est par la même raison, que nous-mêmes nous ne sentons pas le mouvement de la terre qui nous entraîne.

Cette propriété étant ainsi établie par l'expérience, on peut s'en servir pour évaluer les rapports des forces par l'observation des vitesses qu'elles impriment à des masses égales, ou équivalentes, abandonnées librement à leur action. On peut

même, d'après ce que nous avons vu plus haut, se dispenser de cette égalité en tenant compte du rapport des masses sur lesquelles on fait agir les forces. En effet, prenons pour unité la masse d'un certain corps connu, par exemple, le gramme, qui est un centimètre cube d'eau distillée amenée à un certain état de chaleur que l'on peut reproduire toujours, et que nous définirons bientôt. Alors, si l'on a observé, et mesuré en mètres, les vitesses imprimées par certaines forces à d'autres masses différentes de celle-là, il n'y aura qu'à multiplier ces vitesses par le nombre de grammes que contiennent les masses, et le produit exprimera, aussi en mètres, les vitesses que la même force ou la même somme de forces aurait imprimées à un seul gramme. En général, le produit de la masse mue par la vitesse imprimée s'appelle la *quantité de mouvement*; et, d'après ce que nous venons de dire, on voit que ce produit est la véritable mesure des forces motrices, puisqu'il exprime la vitesse qu'elles sont capables d'imprimer à une même masse.

Les forces accélératrices constantes sont celles que l'on a le plus souvent occasion d'observer dans la nature; mais on peut aussi concevoir des forces dont les impressions successives auraient des intensités variables à diverses époques. Pour avoir une mesure comparable de leur intensité, il faut considérer que si leur variation, quelle qu'elle puisse être, était subitement interrompue, elles se transformeraient dès-lors en forces accélératrices constantes, dont l'intensité serait différente selon les époques auxquelles l'interruption de la variabilité aurait eu lieu. Or, quand on connaît la relation générale des espaces aux temps, dans un mouvement donné, on peut en déduire par le calcul cette valeur idéale de la force accélératrice constante qui s'établirait ainsi à chaque époque. On se sert donc de ce résultat, soit pour définir les forces accélératrices, soit pour les comparer entre elles, de même que l'on compare les mouvemens variés d'après la vitesse uniforme qui s'établirait si la variation de vitesse, que produit la continuité d'action de la force, cessait tout-à-coup d'avoir lieu,

CHAPITRE X.

Du mouvement curviligne : forces centrales : force centrifuge.

LORSQU'UN point matériel libre a reçu l'impulsion d'une force instantanée, nous avons vu qu'en vertu de son inertie il doit se mouvoir invariablement sur la direction rectiligne où cette force l'a lancé. Concevons maintenant qu'après avoir ainsi parcouru un certain espace, il vienne à éprouver une nouvelle impulsion dans une direction différente : il est évident que son mouvement changera de direction et de vitesse : mais en quoi consistera ce changement, et quel sera le nouveau mouvement qui s'établira ? Voilà la première question qu'il nous faut résoudre pour arriver aux mouvements curvilignes.

La solution en est facile, d'après le principe que les forces sont proportionnelles aux vitesses. En effet, soit MF , *fig. 47*, le sens de la première impulsion, MF' celui de la seconde, qui atteint le point matériel en M : prolongez ces directions, et, sur chacune d'elles, prenez une longueur égale à l'espace que décrirait le point matériel dans l'unité de temps, s'il était sollicité uniquement par chacune des deux forces ainsi dirigées : cela fait, composez ces vitesses comme vous composeriez des forces, en achevant le parallélogramme $MFF'R$ dont elles sont les côtés ; et la diagonale MR de ce parallélogramme exprimera la grandeur et la direction de la vitesse résultante ; de sorte que le point matériel décrira réellement cette diagonale et se trouvera arrivé en R à la fin de l'unité de temps.

De même que nous venons de trouver le mouvement résultant de deux impulsions successives, nous pouvons calculer celui qui résultera d'un plus grand nombre, imprimées à des époques et dans des directions quelconques. Or, à moins que ces impulsions nouvelles ne coïncident toutes en direc-

tion, le point matériel qui les éprouvera sera successivement dévié, de manière à décrire un polygone rectiligne. Rapprochez les époques de ces impulsions successives, elles représenteront l'effet continu d'une ou de plusieurs forces accélératrices; et le polygone se changera en une courbe, qui sera la *trajectoire curviligne* du mobile soumis à ces forces-là.

L'exemple le plus simple d'un pareil mouvement est celui d'un corps pesant, sollicité, à-la-fois, par la pesanteur et par une impulsion primitive oblique à la verticale; et l'on en peut trouver les résultats de la même manière. Au point M, *fig. 48*, où je suppose que ce corps se trouve au moment de son départ, menez une ligne verticale MZ, sur laquelle vous prendrez d'abord la longueur M 1, égale à celle que les corps pesans parcourent librement dans la première seconde de leur chute, lorsqu'ils partent du repos. Puis, sur la même verticale MZ, marquez de même les points 4, 9, 16, 25, où le même corps arriverait à la fin de la 2^{e.}, 3^{e.}, 4^{e.}, 5^{e.}, seconde, et ainsi de suite. Pareillement, sur la ligne MF, direction de l'impulsion primitive, prenez des distances M 1', 1' 2', toutes égales entre elles et à l'espace que cette impulsion, agissant seule, serait capable de faire parcourir au mobile en l'unité de temps. Les points 1', 2', 3', seront ceux où le mobile se trouverait réellement à la fin de chaque seconde, si cette impulsion primitive agissait seule sur lui. Maintenant, pour avoir l'effet simultané des deux forces, achevez, pour chaque époque, le parallélogramme des vitesses; et vous aurez autant de points M, M', M'', où le mobile se trouvera successivement aux instans prescrits. La suite de ces points forme une ligne courbe, qui, dans le langage des géomètres, s'appelle *une parabole*. On a un exemple de ce mouvement dans les bombes et les autres projectiles lancés par la force explosive de la poudre. Cette force est alors l'impulsion primitive. Le point le plus élevé S, de la parabole, *fig. 49*, s'appelle la hauteur du jet, et la distance MN, à laquelle le projectile revient au niveau de son point de départ, s'appelle l'amplitude du jet. C'est, toutefois, seulement par une approximation très-imparfaite que le mouvement réel

des projectiles peut être considéré comme parabolique; car la résistance de l'air, dont nous n'avons pas tenu compte, le change considérablement.

L'exemple que nous venons de rapporter, suffit pour faire comprendre que tout mouvement curviligne exige au moins la combinaison de deux forces, agissant simultanément suivant des directions diverses, et dont l'une agisse d'une manière continue. On voit, de plus, qu'en variant d'une manière convenable la direction et le mode d'action de ces forces, on peut faire décrire à un point matériel toutes sortes de courbes quelconques, avec telle espèce de vitesse que l'on voudra. Parmi cette diversité infinie de mouvemens, il en est un qui mérite une considération particulière; c'est celui dans lequel une des deux forces est constamment dirigée vers un centre fixe, l'autre étant une simple impulsion instantanée. Ce cas est celui des corps célestes, et il offre en outre des résultats applicables dans une infinité d'expériences.

Supposons d'abord le corps en *M*, *fig.* 50, au moment de son départ. Soit *O*, le centre fixe vers lequel il est attiré. Dans les mouvemens célestes, cette attraction est réciproque au carré de la distance; c'est-à-dire qu'en représentant par 1 l'énergie avec laquelle deux astres *M* et *O* tendent ainsi l'un vers l'autre, lorsqu'ils sont placés à la distance 1, cette énergie n'est que $\frac{1}{4}$ à la distance 2, $\frac{1}{9}$ à la distance 3, $\frac{1}{16}$ à la distance 4, et ainsi du reste. Mais ici, où nous voulons considérer la chose en général, nous ne fixerons aucune loi en particulier, et nous supposerons seulement qu'il existe une force centrale quelconque, dont le mode d'action devra être censé connu. Cela posé, si le mobile *M*, que je supposerai ici être un simple point matériel, était uniquement sollicité par l'action de cette force, il est clair qu'il se mettrait directement en mouvement vers le centre *O*, suivant la droite *MO*, et qu'il y parviendrait avec une certaine accélération, dépendante de l'intensité de la force, à diverses distances de ce centre. Mais, au lieu de cela, concevez qu'à l'instant de son départ il ait reçu une impulsion instantanée, dirigée dans un sens différent de *MO*, par exemple, suivant *MF*; il est clair qu'il prendra un mouvement intermédiaire entre les directions des deux forces qui le

sollicitent ; et nous pourrons déterminer sa route par le principe de la composition des vitesses. Mais, comme la force centrale, par sa nature, varie sans cesse de direction à mesure que le mobile tourne autour du centre, et change d'intensité à mesure qu'il s'en rapproche ou s'en éloigne, on voit qu'il faudra répéter la composition des vitesses à des intervalles de temps extrêmement rapprochés, que nous nommerons *instans*, et qui soient assez courts pour que, pendant chacun d'eux, la force centrale puisse être considérée sensiblement comme constante. Concevons donc que, pendant le premier de ces instans, elle pût, par son action propre, amener le mobile de M en C, si elle agissait seule sur lui durant ce temps-là ; et, soit MF l'espace rectiligne que l'impulsion latérale lui ferait pareillement décrire dans le même instant, si elle était aussi seule à le solliciter. La vraie route décrite par le mobile s'obtiendra en construisant le parallélogramme MCFM' sur ces deux vitesses ; et, à la fin de l'instant supposé, il se trouvera en M'. Alors, si la force centrale cessait tout-à-coup de le solliciter, il continuerait à se mouvoir seulement en vertu de la vitesse composée qu'il aurait acquise, et la direction de ce mouvement serait le prolongement du petit arc MM', qui, à cause de sa petitesse, peut être considéré comme sensiblement rectiligne et comme une portion de la tangente menée en MM', à la trajectoire curviligne rigoureuse. Conséquemment, rien ne nous empêche de recommencer en M' la composition des nouvelles vitesses. Car d'abord il n'y a qu'à prendre, sur le prolongement de MM', une longueur M'F', égale à celle que la vitesse acquise, à la fin de MM', ferait décrire seule au mobile dans le second instant, et prendre, sur M'O, la longueur M'C', égale à celle que la force centrale seule ferait décrire, laquelle pourra et devra en général être différente de MC, à moins que les distances MO, M'O, ne soient égales. En composant ces nouvelles vitesses par le moyen du parallélogramme M'C'F'M'', on aura la direction M'M'' du mobile pendant le second instant, et sa position M'' à la fin de cet instant-là. En répétant la même construction pour tous les autres instans suivans, on déterminera de même tous les points successifs où le mo-

bile arrivera. La suite de ces points formera un polygone , qui approchera de se confondre avec la route curviligne véritable, d'autant plus que la composition des vitesses aura été faite à des instans plus rapprochés les uns des autres; et la différence disparaîtra tout-à-fait si l'on opère cette composition non plus par une construction graphique toujours sensible et conséquemment grossière, mais par le calcul qui pénètre jusqu'aux limites des infiniment petits.

On conçoit, par ce qui précède, comment la trajectoire, ainsi décrite, peut varier selon le mode d'action de la force centrale, et selon les rapports qu'on lui suppose avec la direction et l'intensité de l'impulsion primitive. Dans le mouvement des corps célestes, la force centrale est une attraction réciproque qui sollicite ces corps les uns vers les autres, avec une intensité proportionnelle à leurs masses et réciproque au carré de leurs distances mutuelles. En introduisant cette loi dans le calcul, et considérant seulement le mouvement de deux corps qui s'attirent ainsi, on trouve que la trajectoire décrite ne peut être qu'une des courbes que les géomètres ont appelées *sections coniques*, parce qu'on les obtient toutes en coupant par un plan, dans différens sens, un cône à base circulaire. Ces courbes se divisent en cinq espèces, qui sont l'ellipse, le cercle, la parabole, l'hyperbole et la ligne droite. L'ellipse est la courbe que décrivent les planètes. Le cercle, qui n'en est qu'une modification légère, paraît être décrit par quelques satellites autour de la planète à laquelle ils appartiennent, et qui devient alors le centre de leurs mouvemens. La parabole est l'orbite que parcourent presque toutes les comètes jusqu'à présent observées. Dans tous les cas, le corps qui sert de centre est placé au point que l'on nomme *le foyer* de la section conique. L'hyperbole et la ligne droite ne paraissent pas jusqu'ici s'être présentées dans les observations; mais ces deux genres de trajectoires ayant la propriété d'éloigner sans retour les corps qui les décrivent, s'il existe dans le système solaire des corps soumis à des mouvemens de ce genre, il est possible qu'ils aient passé à leur périhélie, où ils nous sont visibles, avant les épo-

ques très-récentes où l'on a commencé à observer sur la terre ; et alors on ne devrait pas s'étonner de n'en plus voir de tels aujourd'hui.

D'après la manière dont se composent les vitesses qui produisent le mouvement curviligne, nous avons reconnu que le mobile, à chaque point de sa course, tend à s'échapper suivant la droite qui touche en ce point la courbe qu'il décrit ; et en effet, il continuerait à suivre cette tangente si l'action de la force centrale ne le ramenait vers le centre autour duquel il se meut. Ainsi, tandis que le mobile serait arrivé de M en F, *fig. 50*, en vertu de l'impulsion qui lui a été primitivement imprimée, ou en général, en vertu de sa vitesse précédemment acquise, la force centrale le rappelle de F en M' avec une accélération qui, à cause de la petitesse de FM', peut être censée constante, de sorte que la tendance du mobile à s'éloigner du centre du mouvement peut être exprimée et mesurée par la longueur de FM', pour des instans égaux. Cette tendance s'appelle la *force centrifuge*. On voit que, dans le mouvement curviligne libre, produit par une force centrale, elle est à chaque instant égale à l'action de cette force, et lui est directement opposée.

Lorsque la trajectoire ainsi librement décrite est un cercle *fig. 51*, le mouvement de circulation est uniforme, et la ligne FM', qui mesure la force centrifuge à chaque instant infiniment petit, est égale au carré de l'arc MM', divisé par le double du rayon OM' du cercle. Ainsi, en comparant sa longueur à celle qu'une autre force accélératrice constante, la pesanteur, par exemple, ferait décrire au mobile dans le même temps, le rapport de ces deux longueurs exprimera le rapport des deux forces.

Ce résultat ne s'applique pas seulement aux mouvemens circulaires libres, il a lieu aussi dans le cas où la forme circulaire résulterait d'une condition forcée, telle que l'existence d'un canal solide dans lequel le mobile serait contraint de se mouvoir, ou la traction d'un fil inextensible qui le retiendrait à une distance fixe du centre de son mouvement. Alors la force centrifuge se produirait encore à chaque point.

du cercle décrit; et, en supposant le mouvement de circulation uniforme, elle aurait encore la même mesure que nous lui avons tout-à-l'heure assignée; mais elle serait détruite par la résistance des parois solides du canal, ou par celle que le fil opposerait à son extension. Ces résistances tiendraient alors lieu de force centrale. C'est ainsi que les cordes d'une fronde se tendent lorsqu'on la fait tourner; et l'on sent en effet qu'elles se tendent d'autant plus fortement, que l'on rend la circulation plus rapide. Si l'on abandonne une d'entre elles, ce qui rend le mobile libre, il s'échappe par la tangente et va décrire une parabole en vertu de la combinaison de cette impulsion avec la pesanteur. Mais si l'on retient les cordes de la fronde en accélérant toujours le mouvement, la force centrifuge peut devenir assez énergique pour les rompre par sa tension; et alors le mobile s'échappe de même, par la tangente au point de son orbite auquel il se trouve à l'instant où la rupture a lieu.

Plusieurs effets remarquables de la force centrifuge peuvent être réalisés dans l'appareil représenté *fig. 52*. LL est une longue bande de métal, traversée perpendiculairement à son milieu par un axe AA', destiné à rester vertical, et autour duquel elle peut tourner librement dans une situation horizontale. Les deux bouts de la barre portent deux lames, fixées à angles droits sur sa direction; et, de l'une à l'autre, passe une baguette métallique dans laquelle sont enfilées des boules solides de diverses masses et de diverse nature, lesquelles peuvent glisser le long de la baguette avec très-peu de frottement. Si l'on place une de ces boules au milieu de la baguette, tout-à-fait sur le prolongement de l'axe de rotation AA', elle reste dans cette position pendant le mouvement, parce qu'il ne s'y produit pas de force centrifuge, ou, pour parler plus exactement, parce que les forces centrifuges de ses diverses parties, situées à des distances opposées du centre, sont égales et opposées. Mais, si l'on place cette même boule en un point de la baguette, situé à quelque distance de l'axe, et que l'on vienne ensuite à faire tourner la barre LL, la boule est emportée par la force centrifuge qui la sollicite, et elle glisse le long de la baguette, jusqu'à ce qu'elle arrive à l'extrémité de la barre où

elle est arrêtée par la résistance des lames terminales. On peut varier l'expérience de diverses manières, par exemple, en liant ensemble plusieurs boules par un fil, de manière à opposer leurs forces centrifuges, et choisissant le fil assez fort ou assez faible pour qu'il résiste ou qu'il se rompe. Il suffit d'avoir indiqué le fait général, pour qu'on en imagine aisément toutes les particularités.

Mais on peut aussi substituer aux balles, des liquides contenus dans des tubes de verre, fermés à leurs deux extrémités, dont l'une réponde au centre de rotation A, et l'autre à l'extrémité de la barre LL *fig. 53*. Alors si l'on dispose ces tubes dans une direction légèrement inclinée à l'horizon, et qu'on les remplisse en partie d'un liquide quelconque, d'eau colorée, par exemple, on verra d'abord, lorsque la machine sera immobile, l'eau rester au point le plus bas de chaque tube en vertu de la pesanteur qui la sollicite. Mais, si l'on fait tourner la barre LL avec une rapidité suffisante, la force centrifuge qui se développera dans les parties de cette eau vaincra l'effort de son poids, et la portera jusqu'aux bouts supérieurs de chaque tube, où elle la maintiendra contre sa tendance primitive, tant que le mouvement de rotation subsistera avec assez d'énergie.

Maintenant supposons que, dans cette eau, lorsqu'elle est d'abord en repos, on place une balle de plomb, métal qui est plus pesant que l'eau à volume égal; cette balle tombera au fond de l'eau par l'excès de son poids, et y restera. Mais, si l'on fait tourner la machine, et qu'on développe ainsi une force centrifuge, suffisante pour porter l'eau vers l'extrémité supérieure du tube, cette même force y portera aussi la balle, et même elle la lancera contre cette extrémité, de sorte que la balle se trouvera soutenue au point le plus haut du liquide, contre ce qui arrive ordinairement. C'est que la force résultante qui sollicite maintenant l'eau et le plomb, et qui contraint ces corps à monter le long du tube en s'éloignant du centre, les pousse vers le bout du tube le plus élevé. Et, de même que l'effort de la balle de plomb pour tomber vers la terre, sous l'influence de la pesanteur seule, surpassait celui

d'une boule d'eau d'un volume égal, de même l'effort qu'elle fait maintenant pour monter sous l'influence de la force résultante qui la sollicite, surpasse celui que fait une boule d'eau de même volume animée de la même vitesse; de sorte que la boule de plomb s'élève dans le second cas au haut du liquide, précisément par la même raison qui la faisait tomber au fond dans le premier. D'où l'on voit que, si l'on substituait à la balle de plomb une balle de liège, ou de toute autre substance, dont le poids fût moindre que celui de l'eau à volume égal, les phénomènes devraient être contraires; c'est-à-dire que la balle de liège qui flotte sur l'eau, sous l'influence de la pesanteur seule, devrait flotter *au-dessous* de la partie la plus basse de ce liquide, dans le cas où la force centrifuge aurait surmonté l'action de la pesanteur. C'est en effet ce qui confirme l'observation.

J'ai insisté sur ces phénomènes, parce qu'ils réalisent ce que j'ai dit plus haut, que deux masses dont les poids sont égaux se font encore équilibre lorsqu'elles sont animées par toute autre force accélératrice, qui, ainsi que la pesanteur, leur imprime, ou tend à leur imprimer d'égales vitesses. Dans les expériences précédentes, les balles de plomb ou de liège tendent à s'éloigner du centre avec la même vitesse que les particules liquides qui les environnent; mais comme, avec d'égales vitesses, elles ne sont pas équilibrées par des volumes égaux de liquide, quand elles sont animées par la pesanteur seule, cette égalité n'a pas lieu non plus sous l'influence combinée de la pesanteur et de la force centrifuge.

Une force pareille se produit également à la surface et dans chaque point de la masse d'un corps solide que l'on force de tourner autour d'un axe. Les molécules matérielles qui composent ce corps, sont alors comme autant de mobiles qui ont leur force centrifuge particulière, dépendante de la grandeur du cercle qu'elles décrivent et de la vitesse de leur circulation. Or, en vertu de la solidité qui les unit, elles sont obligées de circuler toutes en temps égal, de sorte que leurs vitesses sont comme leurs distances à l'axe de rotation, ou comme les rayons des cercles décrits. Donc, si le mouvement de circulation est

uniforme, leurs forces centrifuges seront proportionnelles à ces rayons mêmes. Ainsi les molécules feront plus d'efforts pour s'éloigner de l'axe à mesure que, par leur position dans le corps, elles s'en trouveront plus distantes. Tous ces efforts doivent être soutenus et contre-balancés par la cohésion des particules, pour que le corps ne se divise point. Mais, si le mouvement de rotation devient assez rapide pour vaincre cette résistance, les particules qui composent le corps s'en sépareront, s'échapperont par la tangente et se dissémineront dans l'espace. On peut aisément réaliser ce phénomène en laissant tomber des gouttes d'eau ou du sable très-fin sur la surface d'une toupie qui tourne avec rapidité. A l'instant où ces petits corps se posent sur la surface tournante, ils sont entraînés par elle et participent à son mouvement de rotation : ils acquièrent donc aussitôt une force centrifuge ; et, comme aucun lien ne les retient attachés à cette surface, ils cèdent à la force qui les sollicite et s'échappent ; ce que ne peuvent pas faire les particules même du corps de la toupie, qui adhèrent les unes aux autres par leur cohésion.

La terre tournant sur elle-même dans l'intervalle d'un jour sidéral, dont la durée est de 86164 secondes moyennes, toutes ses parties doivent éprouver ainsi des forces centrifuges résultantes de ce mouvement ; et les corps une fois détachés de sa masse devraient, s'ils n'étaient sollicités par aucune autre force, s'échapper par la tangente. Mais la pesanteur, par son énergie prépondérante, les rappelle à la surface, et les ferait tomber jusqu'au centre malgré la force centrifuge, si l'impénétrabilité du reste de la masse ne s'y opposait. A l'équateur, par exemple, le rayon de la terre est de 6376466 mètres, dont le double 12752932^m étant multiplié par $\frac{355}{113}$, rapport de la circonférence au diamètre, donne un contour égal à 40064521 : un corps placé sur ce cercle, le décrit en un jour sidéral composé de 86164 secondes moyennes, ce qui fait par seconde une vitesse de 465 mètres. Le carré de ce nombre est 216225 ; en le divisant par 12752932, nombre de mètres contenu dans le double du rayon de la terre, le quotient 0^m,01695 sera la valeur de la force centrifuge à la surface

de l'équateur, exprimée en mètres, c'est-à-dire, la longueur que cette force y fait décrire aux corps en une seconde de temps. Or, dans ce même temps, l'excès de la gravité sur la force centrifuge, y fait tomber les corps de $4^m, 89$; d'où il suit qu'en vertu de la gravité seule, ils tomberaient de $4^m, 89 + 0^m, 01695$, ou $4^m, 90695$. Ce nombre divisé par $0^m, 01695$, donne pour quotient 289 . Ainsi, à l'équateur, la force centrifuge est $\frac{1}{289}$ de la gravité. Ce rapport se rapprocherait de l'unité si la rotation de la terre s'accélérait; et il croîtrait comme le carré de la vitesse. Donc, puisque 289 est le carré de 17 , on voit que si la vitesse de circulation devenait dix-sept fois plus rapide, la force centrifuge à l'équateur égalerait la gravité, et les corps placés en cette partie de la terre cesseraient de peser sur sa surface. La force centrifuge combat ainsi la pesanteur dans tous les autres points de la surface de la terre, mais moins pourtant qu'à l'équateur; d'abord parce que les autres parallèles terrestres étant moins éloignés de l'axe de rotation, la force centrifuge y est moindre; et, en second lieu, parce que la direction de cette force se trouve alors oblique à la verticale, suivant laquelle la pesanteur est toujours dirigée. En supposant que les corps célestes aient été primitivement fluides, comme un grand nombre de phénomènes portent à le supposer, l'attraction mutuelle de leurs parties leur aurait fait prendre une forme absolument sphérique, si aucune autre force n'eût agi sur eux. Mais, comme ils sont tous doués d'un mouvement de rotation autour d'un axe, la force centrifuge de ce mouvement a dû rendre les parties situées près de l'équateur moins pesantes; ce qui a dû déterminer, en cet endroit, une plus grande accumulation de matière. Aussi observe-t-on que tous les corps célestes sont renflés à leur équateur, et aplatis à leurs pôles de rotation.

On peut rendre ce phénomène sensible au moyen de l'appareil représenté *fig.* 54. MM, MM. sont deux ressorts d'acier très-flexibles, que l'on a pliés en cercle, et dont les deux bouts sont fixés l'un au bas de l'axe AZ, l'autre, à un anneau A' qui peut glisser librement autour de cet axe. L'axe AZ lui-même est une tige de métal à laquelle on communique un

mouvement de rotation assez rapide par un mécanisme analogue à celui de la roue de rémouleur, c'est-à-dire, en l'enroulant par une corde qui passe sur une autre roue plus large RR, que l'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Cette roue en tournant fait tourner l'axe AZ; celui-ci, emportant avec lui les méridiens MM, développe dans tous leurs points une force centrifuge qui tend à les éloigner de lui dans le sens horizontal. Mais la longueur des ressorts qui forment ces méridiens étant fixe, leur diamètre horizontal ne peut s'agrandir sans que le diamètre vertical AA' ne se raccourcisse et ne fasse ainsi glisser l'anneau supérieur sur l'axe vertical. C'est, en effet, ce qui arrive lorsque l'on met l'appareil en mouvement : le sphéroïde que les ressorts figurent se renfle à son équateur, s'aplatit à ses pôles, et d'autant plus que le mouvement de rotation est plus rapide : ce que l'on peut aisément constater en plaçant sous l'anneau mobile A' une petite rondelle de drap enfilée dans l'axe, et que l'anneau pousse devant lui jusqu'au point de son plus grand abaissement.

En général, dans tout mouvement curviligne, il se produit toujours une force centrifuge, puisqu'en chaque point de la trajectoire décrite, le mobile tend toujours à s'échapper par la tangente; et, tant qu'il continue à suivre la courbe, cette force centrifuge est détruite par les autres forces qui y ramènent le mobile, soit que l'action de ces dernières se dirige vers un centre fixe ou non. Alors l'intensité de la force centrifuge devient, en général, variable dans les différens points de la trajectoire; mais on peut encore l'évaluer par les mêmes principes, en considérant le mouvement comme se faisant, à chaque instant, sur une circonférence de cercle, qui aurait avec la trajectoire deux élémens communs. Ce cercle, que l'on appelle *osculateur*, devra, généralement, être variable de rayon selon les points que l'on considère; mais on peut toujours déterminer la longueur de son rayon par le calcul. On peut évaluer de même la vitesse actuelle du mobile aux points de la trajectoire auxquels il répond. Alors la force centrifuge en ces points peut être considérée comme commune aux mouvemens qui auraient lieu en vertu de cette vitesse dans

le cercle ou sur la courbe , ce qui permet de l'évaluer par la règle rapportée plus haut.

CHAPITRE XI.

Oscillations du pendule.

IL y a encore un autre cas de mouvement curviligne qu'il nous faut particulièrement considérer , à cause de ses applications pratiques. C'est celui d'un corps solide pesant , suspendu par un axe fixe , et qui , tant soit peu écarté de la verticale , et abandonné ensuite à lui-même , va et revient de part et d'autre de cette ligne , par un mouvement que l'on appelle *oscillatoire*. Tout le monde sait que ce sont des verges solides mues de cette manière , et que l'on appelle des pendules , qui règlent le mouvement des horloges par lesquelles on mesure si exactement le temps. Cela suffit pour nous indiquer l'utilité qu'il y a à s'en occuper. Le cas le plus simple d'un pareil mouvement , celui par conséquent qui doit nous occuper d'abord , s'obtiendra en considérant un simple point matériel pesant tel que M , *fig.* 55 , suspendu à l'extrémité d'un fil OM , inextensible , inflexible , sans masse , et attaché par son extrémité supérieure O à un obstacle fixe. Concevons d'abord que le mobile M soit placé dans la verticale du point O , à la distance OM , prescrite par la longueur du fil , et qu'on l'abandonne à l'action unique de la pesanteur. Il est clair qu'il restera en repos ; car tout l'effort de la pesanteur pour le faire tomber est détruit par la résistance du fil. Mais , supposez qu'on écarte le mobile M de la verticale , en détournant aussi le fil qui le porte , et qu'on l'abandonne ensuite à lui-même , il est évident que la pesanteur tendra à le faire revenir à sa première position ; car la direction du fil lui étant devenue oblique , elle ne sera plus complètement détruite par sa résistance. Pour voir ceci de plus près , supposons que , par la nouvelle position M' du mobile , on mène une verticale $M'Z$, sur laquelle on prenne une longueur arbitraire $M'G$ pour représenter l'intensité absolue de la pesanteur. Menons ensuite par l'extrémité G deux lignes GP , GF , l'une perpen-

diculaire, l'autre parallèle à la direction actuelle du fil. Il est clair que la force $M'G$ pourra être considérée comme une résultante dont les composantes seraient $M'P$, et $M'F$, de sorte qu'on peut lui substituer celles-ci sans rien changer à l'état de la question. Or la première $M'P$, se trouvant dirigée dans le prolongement du fil, est détruite par sa résistance; et il ne reste d'actif que la force $M'F$, qui, lui étant perpendiculaire, n'en est nullement combattue. Ainsi le mobile tend à tomber en vertu de cette seule force; et comme rien ne s'oppose à ce qu'il lui obéisse, il se mettra en effet en mouvement suivant sa direction, qui est celle de la tangente au cercle qu'il peut décrire. En répétant la même construction pour différens points de l'arc $M'M$, et représentant toujours la pesanteur par des longueurs égales, on voit que la composante active $M'F$ diminue à mesure que le mobile se rapproche du point le plus bas du cercle, et qu'enfin elle devient nulle en ce point même, où la résistance du fil détruit l'effort total de la gravité. Si donc on suppose le point pesant M écarté de la verticale, et ensuite abandonné à lui-même, son mouvement de chute sera accéléré, puisqu'il est sollicité par une force continuellement active; mais ce mouvement ne suivra pas les lois de la chute libre, puisque l'intensité de la force qui l'accélère varie et diminue sans cesse, depuis le plus haut point de sa course jusqu'au point le plus bas.

Arrivé à ce point, le mobile, entièrement soutenu par le fil, se trouvera un instant soustrait à l'action de la pesanteur. Mais, en vertu de son inertie, il continuera à se mouvoir en vertu de la vitesse qu'il a précédemment acquise en tombant; et, comme il est forcé de décrire un cercle, il s'élèvera de l'autre côté de la verticale. Dès-lors, la pesanteur n'étant plus tout-à-fait détruite, agira sur lui pour le faire redescendre; et elle agira avec une énergie croissante, à mesure qu'il montera davantage dans l'arc qu'il décrit. Le mobile se trouvera donc dans le cas ordinaire d'un corps pesant lancé de bas en haut par une impulsion instantanée, avec cette différence que la pesanteur qui le sollicite ne sera pas constante, mais ira continuellement en croissant d'intensité avec le temps. Il arrivera donc,

de même, une époque où la vitesse de la première impulsion sera complètement détruite ; et cela aura évidemment lieu quand le mobile, que nous supposons dans le vide, se sera élevé de ce côté de la verticale, aussi haut que le point S ; d'où il a commencé à tomber de l'autre côté. Arrivé à ce terme, il recommencera de nouveau à tomber vers la verticale, en partant du repos comme la première fois. Il montera de même de l'autre côté, redescendra ensuite pour remonter de même ; et ses *oscillations* se continueront ainsi indéfiniment dans l'arc SMS' , pourvu qu'aucun obstacle, aucun frottement, aucune résistance, ne vienne les ralentir ou les arrêter. Ces allées et ces retours étant toujours déterminés par des causes identiquement les mêmes, il est évident que leur durée sera la même aussi ; c'est-à-dire que les oscillations successives seront isochrones entre elles.

La simplicité de ce cas idéal est altérée dans la pratique par diverses causes inévitables. D'abord on ne peut pas réaliser la disposition supposée d'un simple point matériel suspendu à un fil sans masse : il faut nécessairement employer des corps solides d'une dimension et d'un poids sensibles. Mais on supplée à cette nécessité par le calcul, quand on connaît la forme de ces corps et la densité de toutes leurs parties. Les géomètres ont trouvé des méthodes pour déduire de ces données la longueur du pendule simple idéal, qui ferait ses oscillations dans le même temps que le corps solide dont on s'est servi.

Un appareil de ce genre se nomme un *pendule composé*, et on peut lui donner diverses formes, diverses longueurs, selon les usages auxquels on l'applique. Celle qui sert ordinairement pour les horloges consiste dans une verge, ou un système de verges métalliques CA , *fig.* 56, au bas desquelles on fixe une lentille L , également métallique, que l'on fait fort mince sur ses bords, et très-pesante, pour fendre mieux l'air et en éprouver moins de résistance. Le haut de la verge est traversé perpendiculairement par un couteau d'acier fort poli, soudé avec sa masse même, et qui pose sur un plan ou dans une rainure d'acier, poli aussi avec beaucoup de soin. Quand on veut mettre le pendule en oscillation, on l'écarte un peu de la verticale, et on le laisse retomber en vertu de son poids.

Pour adapter cet appareil à la mesure du temps, on dispose une suite de roues dentées qui s'engrènent les unes dans les autres, de manière que toutes marchent quand une seule est mise en mouvement. On donne aux nombres de dents de ces roues les rapports qui existent entre les diverses divisions adoptées dans la mesure du temps, c'est-à-dire, entre les heures, les minutes, les secondes; et l'on adapte à leurs axes des aiguilles qui, en se mouvant sur un cadran, indiquent chaque pas qu'elles font. On enroule ensuite autour d'un de ces axes une corde flexible au bas de laquelle on suspend un poids qui tend à faire tourner toutes les roues, et qui même les forcerait à tourner précipitamment si on lui permettait d'agir librement. Mais, pour modérer sa chute, on adapte à l'appareil un pendule AL, *fig. 57*, dont le haut de la verge porte une espèce d'ancre EE, qui s'engrène dans les dents d'une des roues que le poids tire : cette ancre se nomme l'*échappement*. Elle est disposée de telle sorte que, lorsque le pendule est dirigé suivant la verticale, et en repos, sans être sollicité par aucune vitesse, les deux extrémités EE s'interposent entre les dents de la roue et arrêtent tout mouvement. Mais si l'on écarte un peu le pendule de part ou d'autre de la verticale, la roue devient libre de tourner, et elle tourne en effet par l'action du poids qui l'entraîne, jusqu'à ce que le pendule, en tombant, l'arrête par l'interposition de son échappement. Si tout est bien disposé, cela arrive quand il se trouve au point le plus bas de son oscillation. Mais alors il passe de l'autre côté de la verticale, en vertu de sa vitesse acquise, et de celle que le choc de la roue en mouvement lui communique; il échappe donc de nouveau, entre les dents de cette roue, et la laisse tourner de nouveau. Puis il vient de nouveau l'arrêter, et ainsi de suite, aussi long-temps que le poids qui sollicite les roues continue son action.

Dans les expériences de physique où l'on ne veut qu'observer les oscillations du pendule, sans en faire un régulateur, on cherche à se rapprocher le plus qu'il est possible de la disposition du pendule simple. On emploie alors, *fig. 58*, une boule de platine très-lourde, suspendue à un fil de cuivre qui est seulement assez gros pour la soutenir sans se rompre. Ce

fil tient à une petite calotte de cuivre travaillée sur le même diamètre que la boule, et qui, étant posée sur elle avec l'intermède de quelque substance grasse, y adhère avec une force suffisante pour que la boule ne tombe point. Un couteau très-poli est attaché à l'extrémité supérieure du fil, et pose sur des plans d'agate bien polis, afin que son mouvement d'oscillation éprouve le moins d'obstacle possible de la part du frottement.

Lorsqu'un pareil pendule est mis en mouvement, on s'aperçoit bientôt que l'amplitude des arcs qu'il décrit diminue peu-à-peu; et il finit par s'arrêter tout-à-fait. Ce ralentissement progressif est causé, en partie, par le frottement qui s'opère au point de suspension; mais il l'est beaucoup plus encore par la résistance que l'air oppose au mouvement de la boule. Cette résistance, toujours contraire à sa vitesse, allonge la durée de la demi-oscillation descendante, et abrège celle de la demi-oscillation ascendante, à très-peu près de la même quantité, de sorte que la somme de ces deux moitiés reste sensiblement la même que si le mouvement avait eu lieu dans le vide. Mais les excursions du mobile en sont successivement diminuées dans leur amplitude. Or, l'isochronisme des oscillations circulaires n'a lieu à la rigueur que lorsqu'elles sont d'une étendue constante; on voit donc que, sous ce point de vue, la résistance de l'air doit les altérer. Heureusement, cette altération est très-peu sensible lorsque les arcs sont petits; et il devient alors facile d'en déterminer l'influence par le calcul. En l'appliquant, comme une correction, aux oscillations observées, on les réduit toutes au cas idéal d'une amplitude infiniment petite, ce qui les rend toutes exactement isochrones.

Maintenant si, après avoir fait cette observation, on mesure aussi la longueur du pendule dont on s'est servi, et qu'on le réduise par le calcul au cas idéal du pendule simple, on peut, en comparant les durées des oscillations et les longueurs observées, déterminer plusieurs résultats importants.

Le premier est l'intensité absolue de la pesanteur. En effet, les oscillations étant produites par son action, elles

doivent être plus ou moins rapides, selon que son intensité est plus ou moins forte. On conçoit donc que cette intensité doit pouvoir se déduire du nombre d'oscillations faites en un temps donné, par un pendule d'une longueur connue. Ces deux élémens, le nombre et la longueur, peuvent se déterminer avec une exactitude extrême. Ils offrent donc un excellent moyen de calculer l'intensité de la pesanteur. C'est ainsi qu'on a trouvé qu'à la latitude de Paris, les corps décrivent $4^m,9044$ dans la première seconde de leur chute. En outre, la longueur du pendule simple qui ferait 100000 oscillations dans un jour moyen, y est de $0^m,741885$ à l'observatoire.

On trouve encore, conformément au calcul, que, pour divers pendules simples, de longueurs inégales, animés par une même pesanteur, les durées des oscillations sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs; de sorte qu'à mesure qu'un pendule s'allonge, les oscillations deviennent plus lentes selon ce rapport. Ce résultat sert à calculer la longueur qu'il faut donner à un pendule pour en obtenir des oscillations d'une durée déterminée. A la vérité cette durée varie par l'impression que le froid et le chaud font sur la verge du pendule, qu'elles raccourcissent ou allongent; mais on a trouvé le moyen de remédier à ces variations, comme nous le dirons plus tard.

Enfin on démontre, par le calcul, que les durées des oscillations d'un même pendule, soumis successivement à des pesanteurs différentes, varient réciproquement aux racines carrées de leurs intensités. Cette propriété permet donc de comparer les intensités de la pesanteur terrestre à différentes latitudes. L'on a ainsi découvert qu'elles croissent en allant de l'équateur aux pôles, ce qui est une conséquence de l'aplatissement de la terre.

On observe dans la nature un grand nombre de mouvemens, qui, sans suivre les mêmes lois que ceux du pendule, s'en rapprochent cependant par ce caractère, qu'ils sont, de même, alternatifs de part et d'autre d'un état de repos. Tel est, par exemple, celui d'une corde métallique tendue que l'on retire de sa position naturelle d'équilibre, et qu'on aban-

donne ensuite à elle-même. Ce mouvement et tous ceux de ce genre, qui sont ordinairement fort rapides, ont reçu le nom de *vibrations*. Nous aurons plus tard l'occasion d'en étudier quelques-uns par l'expérience.

Enfin, pour achever de réunir ici les résultats les plus usuels des mouvemens, nous dirons un mot de celui que peut prendre un corps solide libre, lancé par une impulsion primitive. Si cette impulsion passe par le centre de gravité du corps, et si elle est la seule cause de mouvement qui agisse sur lui, il prend seulement un mouvement de translation suivant la direction que cette impulsion lui imprime; et toutes ses parties se meuvent uniformément dans ce sens, parallèlement les unes aux autres, avec une vitesse commune. Mais si l'impulsion ne passe pas exactement par le centre de gravité du corps, il prend un mouvement composé, 1°. d'un mouvement de translation uniforme commun à toutes ses parties; 2°. d'un mouvement de rotation également uniforme autour d'un axe passant par son centre de gravité, mais dont la direction, dans l'intérieur de sa masse, peut être variable ou constante. Dans tous les corps solides on peut mener trois droites rectangulaires entre elles, qui sont autant d'axes de rotation *permanens*; c'est-à-dire que, si la rotation a commencé à se faire autour d'un de ces axes, elle continuera toujours autour de lui, pourvu toutefois que le corps n'éprouve ni résistance, ni choc, qui vienne troubler la liberté que nous avons supposée à ses mouvemens. Tous ces résultats se démontrent par la mécanique mathématique.

CHAPITRE XII.

Du choc des corps.

Jusqu'ici, pour imiter la constitution des corps solides, nous avons imaginé des systèmes de points matériels liés entre eux invariablement; mais cette rigidité absolue ne se rencontre point dans la nature. Tous les corps qu'elle nous offre, et que nous appelons solides, peuvent être, jusqu'à un certain point, comprimés sans se désunir, ni changer de constitution.

Ils ne font que céder momentanément sous l'effort qui les presse ; et , quand cet effort cesse , ils reviennent à leur figure primitive , ou au moins ils s'en rapprochent à des degrés divers. Cette tendance se désigne par la dénomination d'*élasticité*. Un corps qui , après la compression , reprendrait exactement sa figure primitive , serait *parfaitement élastique* ; il ne l'est qu'*imparfaitement* s'il ne revient qu'imparfaitement à son premier état. Nous verrons plus tard , par l'expérience , le rang que , sous ce rapport , il faut donner aux diverses classes de corps naturels , et nous examinerons quelle peut être la cause de leur réaction élastique ; mais , pour le moment , fidèles à la méthode que nous avons adoptée dans ce livre , nous ne voulons que préparer ici des notions abstraites sur les divers modes possibles de constitution que les systèmes matériels peuvent recevoir , afin d'en tirer toutes les lois générales qui sont de simples conséquences de l'inertie , et qui , comme telles , devront se réaliser aussi dans les corps naturels , quelle que soit la complication de leurs propriétés accidentelles.

L'absence ou l'existence de l'élasticité , et les divers degrés où elle peut exister dans un système matériel , ont une grande influence sur la manière dont ce système reçoit le mouvement ou le communique , quand il choque d'autres systèmes semblables , ou quand il est choqué par eux. Nous allons examiner ici les cas extrêmes de mollesse ou de ressort qui comprennent tous les autres. Seulement , pour plus de simplicité , nous supposerons que les systèmes choqués sont des sphères homogènes dont les centres se meuvent uniformément sur une même ligne droite , et dont tous les points sont simplement transportés parallèlement à cette droite , sans aucun mouvement de rotation. Quelles que soient les vitesses et les masses de deux sphères pareilles , elles se choqueront nécessairement , sur la droite même , d'une manière symétrique relativement à toutes les parties de leur masse ; et ainsi , il ne pourra résulter de leur rencontre qu'un changement dans leur mouvement de translation , changement qui les fera avancer ou reculer avec une certaine vitesse. Cette vitesse est donc le seul élément que nous avons à déterminer.

Supposons d'abord nos deux sphères compressibles, mais absolument dénuées d'élasticité, et lancées comme nous venons de le dire. Alors, quand elles viendront à se joindre, le premier effet de leur choc mutuel sera de les comprimer l'une contre l'autre, jusqu'à ce que l'impulsion qui animait chacune d'elles se soit répartie uniformément dans tout l'ensemble des deux masses; et, quand cela aura lieu, la compression s'arrêtera. Dès-lors, il s'établira une vitesse commune, qui s'obtiendra en divisant la somme des quantités de mouvement des deux corps, avant le choc, par la somme de leurs masses.

Supposons, par exemple, qu'en prenant de certaines quantités connues pour unités de vitesse et de masse, notre première sphère ait 3 parties de masse et 8 de vitesse, ce qui fait une quantité de mouvement exprimée par 24; tandis que la seconde aura seulement 1 partie de masse et 4 de vitesse, ce qui donne 4 pour la quantité de mouvement. Cela posé, si ces vitesses sont dirigées dans un même sens, la somme des quantités de mouvement sera 28; et 4 sera la somme des masses. Ainsi la vitesse commune après le choc, sera $\frac{28}{4}$ ou 7. Ce serait seulement $\frac{20}{4}$, ou 5, si les vitesses eussent été dirigées en sens contraire, parce qu'il aurait fallu employer les quantités de mouvement comme opposées.

Les résultats seraient encore les mêmes, si les deux sphères, au lieu de se mouvoir en ligne droite, décrivaient l'une et l'autre la circonférence d'un même cercle. Ceci fournit le moyen de vérifier, par l'expérience, les indications de la théorie, en suspendant des sphères compressibles à des fils très-longs, attachés à un même point fixe, comme des pendules, et les écartant plus ou moins de la verticale dans un même plan, puis les laissant retomber ensemble, de manière qu'elles se rencontrent au point le plus bas de leur course, et mesurant la hauteur où elles remontent, après le choc, de l'autre côté de la verticale. Car, ces hauteurs une fois connues, la théorie du mouvement pendulaire donnera la vitesse de projection qu'elles exigent; et, de même, d'après l'écart primitif donné aux deux masses, on connaîtra les vitesses indivi-

duelles que chacune d'elles avait en arrivant au point le plus bas de sa course, par conséquent à l'instant où le choc a eu lieu. Ces hauteurs se mesurent par le moyen d'une division circulaire parallèle au plan dans lequel on opère les mouvements. Il ne reste plus qu'à choisir des corps qui se rapprochent le plus possible de l'état purement compressible et non élastique que nous avons supposé. On emploie ordinairement pour cela des boules de terre glaise humectées et bien pétries, qui répondent en effet assez bien à ces conditions. On pourrait de même y employer, et peut-être avec plus d'avantage, des boules de farine humide et malaxée, qui sont presque totalement dénuées de ressort.

Dans ces exemples, la communication du mouvement, et sa répartition égale dans la masse totale, exigeront un certain temps, lequel sera d'autant moindre que les corps seront moins compressibles, c'est-à-dire plus *durs*. On peut concevoir, comme limite, un degré de compressibilité si faible que ce phénomène s'opérerait dans un temps inappréciable. Ce serait le cas des corps que l'on pourrait appeler *parfaitement durs* et non élastiques. La supposition d'une incompressibilité absolue non-seulement n'est point réalisée dans la nature, mais n'offrirait aucun moyen de concevoir la communication du mouvement.

Donnons maintenant à nos deux sphères une compressibilité et une élasticité parfaites; supposons d'abord qu'elles se choquent mutuellement en sens contraire avec des masses et des vitesses égales. Dans ce cas, dès qu'elles se toucheront, elles s'arrêteront l'une l'autre, puisque tout est égal; le point de leur premier contact sera la limite de leur course; et elles emploieront leur force à se comprimer mutuellement jusqu'à ce qu'elle soit tout-à-fait éteinte. Cet effort raccourcira leurs diamètres dans le sens du choc et allongera les diamètres perpendiculaires, de manière à changer les deux sphères en deux ellipsoïdes aplatis au point de contact. Mais une fois toute la force du choc ainsi usée, chacun de ces ellipsoïdes élastiques se débandera pour reprendre la forme de sphère, en reproduisant exactement les mêmes efforts qui l'avaient comprimé;

et, soit que l'on envisage cette restitution comme s'opérant sur le point de contact supposé fixe, ou comme se transmettant d'une des sphères à l'autre, il est visible qu'après la restitution chaque sphère sera repoussée en sens contraire de son mouvement avant le choc, et avec une vitesse égale à celle qu'elle avait en s'y présentant. Maintenant, si, au lieu de supposer les deux corps choqués égaux, on leur suppose des masses et des vitesses quelconques, il est clair qu'ils ne se comprimeront mutuellement que jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à une égale répartition de vitesse, comme cela avait lieu dans les corps simplement compressibles; d'où il suit que chaque corps n'usera dans la compression que l'excès de sa vitesse primitive sur la vitesse commune qui s'établirait dans l'état de compressibilité; après quoi sa réaction élastique lui rendra la même différence, en sens contraire. Ainsi il ne lui restera, en définitif, que l'excès de la vitesse commune sur cette portion de vitesse successivement perdue et restituée.

Pour appliquer ce résultat, reprenons l'exemple numérique que nous avons calculé plus haut pour les corps compressibles, et supposons les deux vitesses dirigées dans le même sens. Dans ce cas nous avons vu que la vitesse commune après le choc est 7; donc, si nos sphères sont élastiques, la première, qui avait pour vitesse 8, usera dans la compression $8 - 7$ ou 1 de vitesse; et, le reprenant en sens contraire après le choc, il ne lui restera que 6. Calculant de même pour l'autre sphère qui avait seulement 4 de vitesse, elle usera dans la compression $4 - 7$ ou -3 ; et les reprenant ensuite en sens contraire, elle se trouvera avoir pour vitesse définitive $7 + 3$ ou 10: de sorte que les deux sphères se mouvront encore dans le même sens après le choc, mais l'une plus lentement et l'autre plus vite qu'auparavant. Le même raisonnement fait voir que, si les deux corps étaient égaux en masse, et l'un d'eux en repos, l'autre en mouvement, celui-ci serait ramené au repos après le choc, et l'autre prendrait sa vitesse toute entière. On peut vérifier ces résultats, au moins par approximation, en substituant, dans l'appareil pendulaire, aux boules de terre glaise, des boules d'ivoire bien sphériques et homogènes, dont l'é-

lasticité, sans être parfaite, est au moins très-grande. Si plusieurs boules pareilles sont suspendues ainsi en contact sur une même file horizontale, et qu'ayant écarté la première de la verticale, on la laisse retomber sur les autres, la dernière seule part, et toutes les intermédiaires restent en repos, comme l'indique encore la théorie.

De même que nous avons considéré le choc de deux sphères, on pourrait considérer celui de deux corps de forme quelconque; les principes seraient les mêmes, mais la complication du problème serait beaucoup plus grande, parce qu'il faudrait déterminer les points de rencontre des corps et la direction de leur compression. Le seul exemple que nous nous bornerons à donner, dans ce genre, est celui d'une sphère qui tombe sur un plan.

D'abord, si l'on suppose le plan horizontal et l'élasticité des deux corps parfaite, il est évident que la sphère recevra, par la réaction, après le choc, une vitesse égale à celle qu'elle avait à l'instant où elle a touché le plan; et ainsi cette réaction devrait la faire remonter, dans le vide, à la hauteur précise d'où elle a commencé à tomber. Toutefois, quelles que soient les substances employées pour l'expérience, le retour n'atteint jamais ce terme, tant à cause de la résistance de l'air, qu'à cause de l'imparfaite élasticité. Maintenant, si, au lieu de supposer le plan horizontal, on le suppose incliné, la sphère doit évidemment, après sa réaction, rejaillir en faisant avec le plan le même angle qu'avant sa chute, et c'est en effet ce qu'on observe dans le premier moment; mais bientôt la pesanteur agissant sur le mobile, le ramène graduellement vers la terre en lui faisant décrire une parabole. Ceci fournit un moyen fort élégant pour démontrer aux yeux les lois du mouvement des projectiles, en laissant ainsi tomber une bille d'ivoire sur un petit tambour de parchemin bien égal, fortement tendu, et auquel on donne successivement différentes inclinaisons par rapport au plan horizontal. Car, en suspendant sur la route de la bille une suite d'anneaux à travers lesquels son mouvement la conduise, la série de ces anneaux rendra la parabole sensible aux yeux.

La loi de communication du mouvement que nous avons développée dans ce chapitre est très-générale : elle ne s'applique pas seulement au choc des corps , mais à la répartition de toutes les forces imaginables , entre les masses sur lesquelles on les fait agir. Ainsi , tout corps qui en tire ou en presse une autre , est pareillement tiré ou pressé par lui. Si l'on presse une pierre avec le doigt , le doigt est pressé aussi par la pierre ; et le cheval qui tire un fardeau par le moyen d'une corde , est tiré également par lui , puisque la corde qui les joint est également tendue dans un sens et dans l'autre , et tend également à les rapprocher par sa force de traction. De même ici , dans le choc des corps , un d'eux ne peut communiquer le mouvement à l'autre sans en perdre lui-même ; l'échange n'est pas entre les vitesses , mais entre les quantités de mouvement. La même réciprocité a lieu , en général , dans toutes les actions que nous présente la nature. L'aimant qui attire le fer , est attiré par lui ; la terre attire la lune et est attirée par elle. La pierre qui tombe est attirée et déplacée par la terre , qu'elle attire et *déplace* à son tour , quoique d'une quantité si petite , à cause de son peu de masse , qu'on ne peut l'apercevoir. C'est ce résultat universel que Newton a énoncé comme une loi générale de la nature , en disant que *la réaction est toujours égale et contraire à l'action.*

CHAPITRE XIII.

Des mouvemens des liquides incompressibles.

LES molécules matérielles qui composent les liquides étant considérées isolément les unes des autres , sont soumises aux mêmes lois de mouvement qui régissent les simples points matériels. Mais , lorsqu'une masse liquide est limitée , en certaines parties , par les parois d'un vase susceptible de résistance , les mouvemens des particules sont gênés par cette résistance qui les empêche de passer outre ; et il en résulte plusieurs conditions générales de mouvement qui appartiennent à toute la masse. Néanmoins , dans ce cas même , la mobilité des particules les unes parmi les autres , leur permet

de prendre une infinité de mouvemens propres, qui, pouvant être occasionnés par des causes, même très-légères, donnent au calcul général de ces phénomènes une complication inextricable. Aussi les questions que l'on a jusqu'à présent résolues l'ont été, pour la plupart, à l'aide de considérations particulières, qui en limitaient l'énoncé assez pour que l'on ait pu les attaquer directement. Nous allons indiquer ici, en abrégé, quelques-uns des résultats que l'on est parvenu ainsi à découvrir.

Les plus importans, par leur utilité, se rapportent au mouvement d'un liquide pesant qui s'écoule d'un vase solide par un orifice d'une forme et d'une grandeur données, percé au fond du vase ou dans ses parois. Pour analyser la manière dont ce mouvement s'opère, isolons par la pensée une tranche horizontale très-mince, située à une hauteur quelconque dans la masse liquide, et considérons les forces qui agissent sur elle. D'abord elle est sollicitée de haut en bas par son propre poids; et, si la forme du vase était exactement cylindrique, et que son fond fût entièrement ouvert, elle tomberait librement, en vertu de cette seule force, sans être aucunement influencée, dans sa chute, par les couches supérieures ou inférieures, qui partant du repos, en même temps qu'elle, et étant également sollicitées par la pesanteur, auraient à chaque instant des vitesses exactement égales à la sienne. Mais, lorsque l'ouverture pratiquée dans le vase n'est que partielle, ce qui est le cas ordinaire, cette indépendance de mouvemens n'a plus lieu, parce que les molécules liquides qui composent chaque couche horizontale, étant une fois descendues jusqu'au niveau de l'orifice, ne peuvent pas s'écouler simultanément, ni aussitôt qu'elles y arrivent; et ce retardement réagit sur le mouvement des couches supérieures. Alors chacune de celles-ci, outre sa tendance propre à descendre, est sollicitée par la différence des forces motrices qu'exercent, sur ses deux surfaces, les portions inférieures et supérieures du reste de la masse en mouvement; et c'est la combinaison de toutes ces forces qui détermine le mouvement réel qu'elle peut prendre. En outre, si le vase n'est pas

cylindrique dans toute sa hauteur, il faut que chaque tranche horizontale, considérée dans l'ensemble de ses particules, se moule, pour ainsi dire, sur chacune des sections du vase qu'elle traverse, et qu'ainsi, étant incompressible, son épaisseur verticale diminue ou augmente à mesure que le vase s'élargit ou se rétrécit. Cela ne peut pas se faire sans que quelques-unes des particules n'éprouvent des déplacements dans le sens horizontal. Enfin, elles en éprouvent nécessairement de tels quand elles arrivent près de l'orifice, et l'on peut les rendre sensibles dans un vase transparent, en mêlant à l'eau qui s'écoule, quelques petits corps opaques, à-peu-près de même densité qu'elle, par exemple, des globules de résine ou de cire à cacheter pilées. Car ces globules, à cause de l'égalité de densité, nageant parmi les molécules de l'eau, presque avec autant de liberté que ces molécules elles-mêmes, les mouvemens qu'ils prennent, et les directions qu'ils suivent, indiquent à l'œil le sens des courans qui se forment, et par lesquels ils sont entraînés. Or, on voit ainsi que de tels courans existent en effet près de l'orifice d'écoulement; et même, si l'orifice est formé par un ajutage rentrant, comme le montre la *fig. 59*, on voit les globules indicateurs remonter ainsi du fond du vase pour retourner au point de sortie. En général, même lorsque l'orifice est percé dans une paroi mince, les molécules qui s'en approchent convergent vers lui, de manière que la *veine fluide*, après sa sortie, va en se rétrécissant jusqu'à une certaine distance du vase, *fig. 60*, ce qui, vu l'incompressibilité des particules, ne peut avoir lieu sans que celles d'une même tranche ne se quittent. Mais, lorsque la forme du vase est à-peu-près cylindrique, ou lorsque la hauteur de l'eau est très-grande comparativement à la différence de largeur des tranches horizontales, ce qui accroît la force comprimante, les vitesses horizontales des particules liquides deviennent très-petites, comparativement à leurs vitesses verticales; et ces dernières sont alors, à très-peu de chose près, égales entre elles pour toutes les molécules d'une même tranche; de sorte que le cas idéal d'une égalité tout-à-fait complète doit être comme la limite de ceux que l'expérience réalise, et doit

conséquemment, dans les circonstances que nous avons admises, donner des résultats peu éloignés de la vérité. Cette considération particulière, introduite dans le calcul, le simplifie assez pour qu'on puisse en développer toutes les conséquences; et de là se déduisent les lois suivantes, que, pour simplifier, nous nous bornerons à énoncer dans le cas ordinaire où l'orifice d'écoulement peut être considéré comme très-petit, comparativement aux dimensions de la masse d'eau.

Lorsque l'eau, ou un autre liquide dont les molécules ont entre elles une mobilité parfaite, s'écoule d'un vase par un très-petit orifice, en vertu de son poids seul, et sans qu'aucune pression étrangère soit appliquée sur sa surface, la vitesse du liquide, à sa sortie, est la même que celle d'un corps pesant qui serait tombé, en chute libre, depuis la surface supérieure jusqu'au niveau de l'orifice, vitesse qui peut se calculer, comme on l'a vu page 75, d'après les lois des mouvemens uniformément accélérés. Ce résultat, découvert par Torricelli, est vrai encore, lorsque la surface supérieure et la surface de l'orifice éprouvent des pressions extérieures égales entre elles.

Pendant l'écoulement, chaque point de la masse fluide et des parois du vase éprouve une pression sensiblement égale au poids de la colonne fluide située au-dessus de son niveau, plus l'excès des forces étrangères qui peuvent être appliquées à la surface supérieure. Cette pression se trouve ainsi à chaque instant la même que si le liquide n'était pas en mouvement. C'est elle qui imprime aux particules effluentes leur vitesse; mais elle ne la leur donne toute entière que lorsqu'elle a pu agir sur elles pendant un certain temps : car il faudrait que son énergie fût infinie, pour produire une vitesse finie, par une action absolument instantanée. Aussi le mouvement de projection des molécules qui sortent par l'orifice est-il d'abord insensible et comme nul, et il n'acquiert sa vitesse complète qu'après un certain temps très-court, il est vrai, mais pourtant appréciable. C'est ce dont on peut aisément s'assurer en observant l'écoulement de l'eau par un orifice dont la direction ne soit pas absolument verticale, *fig. 61*. Car alors les molécules, après leur sortie, étant sollicitées à-la-fois par la

pesanteur et par la vitesse de projection qu'elles ont reçue à leur émergence, doivent décrire dans le vide une parabole, et, dans l'air, une courbe balistique ordinaire dont la *hauteur*, et l'*amplitude de jet*, varient avec la vitesse de projection; tellement que l'on peut juger du progrès croissant de cette vitesse par les changemens qu'éprouvent ces deux résultats de son action. Or, en effet, lorsqu'on répète l'expérience, on voit l'amplitude, d'abord insensible, augmenter peu-à-peu jusqu'à un maximum qu'elle n'atteint qu'après quelques instans.

Les lois précédentes s'appliquent également au cas où le vase se vide graduellement à mesure que l'eau s'écoule, et au cas où l'on entretient le niveau à une hauteur constante par l'addition continuelle de nouveau liquide. Il est bien facile de les vérifier par l'expérience, sur-tout dans ce dernier cas; car la pression exercée sur l'orifice étant alors constante, la vitesse d'écoulement le devient aussi; cette vitesse, comme on l'a vu tout-à-l'heure, dépend de la hauteur de l'eau au-dessus de l'orifice; on peut donc, d'après la loi de vitesse des corps graves, donnée page 75, calculer combien de pieds, ou de mètres, elle fait parcourir par seconde. En multipliant ce nombre par la surface de l'orifice, on connaîtra le volume du cylindre d'eau qui sort ainsi, en une seconde de temps; et l'on aura, proportionnellement, le volume qui devra s'écouler en un temps quelconque donné. Il n'y a donc qu'à mesurer la quantité réellement écoulée dans le même temps, et la comparer à l'évaluation précédente. Or, on trouve ainsi le résultat de l'observation toujours plus faible que le calcul ne l'indiquait. La différence tient au rétrécissement qui s'opère à la sortie du jet, et que l'on appelle la *contraction de la veine fluide*. Si l'on considère le filet qui part du centre de l'orifice comme un axe curviligne et central de la veine, on trouve que les sections faites dans la veine, perpendiculairement à cet axe, vont d'abord en diminuant de grandeur depuis l'orifice même jusqu'à un certain terme que l'on appelle la *section contractée*, après quoi la forme de la veine reste quelque temps permanente; et enfin elle s'élargit en gerbe en se mêlant à l'air. Or, le liquide étant incompressible, l'inégalité

des sections suppose nécessairement une inégalité de vitesse entre les diverses particules qui composent chacune d'elles, puisque le système général de ces particules ne pourrait jamais se rétrécir simultanément, au lieu qu'il le peut successivement, l'accélération des vitesses faisant passer dans un temps donné une égale quantité de liquide dans un plus petit espace. En effet, c'est ainsi que le phénomène s'opère. Les molécules qui partent des bords de l'orifice ont d'abord une vitesse moindre que celles du centre. Leur mouvement s'accélère à mesure qu'elles s'approchent de la section contractée; enfin, à cette section, la vitesse de tous les points depuis la surface jusqu'à l'axe, est par-tout la même et sensiblement conforme à celle qui se conclut par le calcul d'après la hauteur, ainsi que M. Hachette l'a soigneusement constaté. On voit donc que, dans les applications, la section contractée est le véritable orifice auquel on peut appliquer avec plus de réalité les lois obtenues par la considération du parallélisme des tranches. C'est aussi ce que l'on fait dans les expériences, et l'usage en peut être légitimé par une épreuve directe; car si l'on adapte au vase un ajutage exactement égal en grandeur et en forme à la portion de la veine fluide, comprise entre l'orifice et la section contractée, le produit d'écoulement ne change pas, non plus que la contraction, quoique la section contractée soit réellement devenue l'orifice. Cet accord permet de déterminer la contraction de la veine indirectement, mais toutefois avec plus d'exactitude que par la mesure immédiate de la section contractée; car il n'y a qu'à mesurer la quantité absolue de l'écoulement obtenu en un temps donné, par chaque orifice, sous une pression constante, et la comparer à celle que la loi de Torricelli devrait donner d'après la hauteur du liquide, et l'aire de l'orifice employé. Si l'on divise le premier de ces résultats par le second, leur rapport exprimera la proportion suivant laquelle il faudrait diminuer l'ouverture d'orifice employée dans le calcul, pour que le produit calculé devînt tel que l'observation le donne. Ce sera donc aussi la proportion qu'a réellement l'aire de la section contractée relativement à l'aire de l'orifice, et ainsi, comme

cette dernière est connue, on en pourra conclure l'aire de la section contractée elle-même. L'exactitude de cette méthode vient de ce qu'elle substitue à la mesure immédiate des dimensions de la veine, celles du temps et du produit de l'écoulement qui peuvent s'obtenir avec une précision indéfinie en prolongeant les observations. Lorsque la section contractée est ainsi connue par le calcul, si on la retranche de l'aire de l'orifice, et qu'on divise la différence par cette dernière quantité, le rapport fractionnaire qui en résulte, est ce qu'on appelle en hydraulique *la contraction*.

L'appareil le plus commode pour ce genre d'expériences est représenté *fig. 62*. C'est une grande cuve cylindrique ABCD, dans les parois de laquelle on pratique, à diverses hauteurs, de grandes ouvertures fermées en dedans par des plaques en contact avec la paroi même, et qui glissent dans une coulisse, de façon qu'on peut les élever ou les abaisser à volonté, et ouvrir ainsi ou fermer la paroi. Lorsqu'on veut faire une expérience on baisse toutes ces plaques, on remplit la cuve d'eau, puis on adapte par dehors d'autres plaques de métal mince qui se serrent avec des vis contre la paroi même, et dans lesquelles sont percés les orifices de diverses formes que l'on veut employer. Alors il ne reste qu'à lever la plaque intérieure correspondante à l'un de ces orifices, pour que l'écoulement ait lieu. Lorsque l'on veut maintenir la constance du niveau dans la cuve, on fait arriver horizontalement à la hauteur fixée un courant continu, et l'on fait de l'autre côté de la cuve, à la même hauteur, une large ouverture qui donne au liquide une libre issue dès qu'il tend à dépasser le point auquel on veut le maintenir. Afin d'obtenir de la régularité dans les phénomènes, il faut employer des quantités de liquides assez considérables pour que l'uniformité de l'écoulement puisse s'établir et se maintenir avec stabilité. Au lieu d'entretenir la constance du niveau par un courant affluent, on peut l'obtenir avec plus de facilité par le procédé suivant, que M. Prony a imaginé, et qui est représenté *fig. 63*. Il place dans la cuve même un cylindre creux FF, de même forme qu'elle, presque exactement de même grandeur, et dont les parois sont formées par

des lames de métal minces, exactement soudées ensemble, de manière à former un corps dont le volume soit moins pesant qu'un pareil volume d'eau; un appareil de ce genre se nomme *un flotteur*, parce qu'il flotte en effet à la surface du liquide. On y adapte latéralement deux tringles métalliques TT, qui, après s'être écartées de la cuve à quelque distance, se recourbent verticalement, et, sans toucher ses parois, vont soutenir au-dessous d'elle un vase ouvert V, muni d'un conduit latéral en fer-blanc, dont l'extrémité supérieure EE s'ouvre en entonnoir pour recevoir le produit du jet, à mesure que le liquide s'écoule par l'orifice latéral qu'on lui a ouvert. Ce tuyau, ainsi que le vase et les tringles métalliques, doivent être réellement considérés comme faisant partie du flotteur; et c'est tout ce système ensemble qui doit être plus léger qu'un pareil volume d'eau. Tout étant ainsi disposé, si l'on ouvre une issue au liquide en un des points quelconques des parois de la cuve, la quantité écoulée à chaque instant sera ramenée aussitôt dans le vase inférieur; et, ajoutant son poids à celui du flotteur, elle le contraindra à s'enfoncer davantage, de manière que l'augmentation de son enfoncement lui fasse déplacer un nouveau volume d'eau égal en poids à celui qui s'est écoulé. Or, la forme du flotteur a été supposée cylindrique, et d'un diamètre presque égal à celui de la cuve, de manière qu'il reste seulement un petit intervalle entre leurs parois, pour que le flottement puisse s'opérer en liberté, sans que l'axe du cylindre cesse d'être vertical. Donc le cylindre, en s'enfonçant, ne fera que remplacer identiquement, par son volume, le volume du cylindre d'eau absolument pareil qui sera sorti de la cuve par l'écoulement. Ainsi, ce remplacement ne changera absolument rien à la hauteur des colonnes fluides comprises entre les parois de la cuve et celles du flotteur; hauteur qui mesure la pression exercée sur tous les points intérieurs des parois de la cuve. Cette constance de niveau peut aisément être constatée à chaque instant, en plaçant dans l'intérieur de la cuve, entre ses parois et celles du cylindre, de petits flotteurs *ff*, portant une tige verticale divisée, assez longue pour dépasser les bords de la cuve, à laquelle on peut

les comparer sans cesse. Toutefois l'appareil disposé, comme nous venons de le dire, n'est pas exempt d'un défaut capital, qui est que le cylindre FF, en s'enfonçant dans la cuve, gêne les mouvemens des particules d'eau et les modifie; de sorte que les produits des expériences ainsi faites, ne sont réellement pas dans les conditions de parfaite liberté que la théorie suppose. Mais on se rapprochera bien davantage de ces conditions, si, au lieu de mettre le flotteur dans la cuve même, on le place dans une cuve auxiliaire, communiquant à la première par un tuyau percé presque à la hauteur du niveau constant; car alors les agitations produites dans les filets fluides s'éteindront en passant par le tuyau dans la cuve libre, où la descente graduelle des particules pourra dès-lors s'opérer avec une parfaite régularité. Pour compléter les avantages de cette disposition, il faudra employer deux cuves auxiliaires pareilles, ayant chacune leur flotteur, dont les tringles iront des deux côtés se réunir sous la grande cuve, pour y porter le vase destiné à recevoir le produit de l'écoulement.

Au reste, quelque procédé que l'on emploie pour obtenir la constance du niveau, si la masse fluide qui s'écoule est assez considérable, et la pression assez forte pour maîtriser les irrégularités accidentelles, les phénomènes de l'écoulement offrent un spectacle très-remarquable. Alors, si le liquide qui s'écoule est diaphane, si c'est de l'eau, par exemple, la portion de la veine qui n'est pas encore désunie par le mélange de l'air, offre absolument l'apparence d'un cristal bien pur, dont les formes géométriques peuvent être définies et mesurées avec la netteté la plus parfaite. Quoique les molécules liquides se succèdent rapidement, comme elles sont contiguës et homogènes, elles paraissent dans un repos absolu. Quelle que soit la forme de l'orifice, la courbe décrite par le filet central est toujours la même, et ne diffère pas sensiblement de la parabole que l'on obtiendrait en calculant la vitesse de projection d'après la différence de niveau. Mais tous les autres élémens de la section contractée varient avec les circonstances particulières de l'expérience, telles que la forme de l'orifice, sa grandeur, la hauteur du liquide, etc. On est loin de savoir embrasser ces modifications dans des lois géné-

rales; toutefois l'influence de chacune d'elles a été soigneusement étudiée par M. Hachette, et l'on peut voir l'extrait de ses recherches dans les Annales de Chimie et de Physique, pour 1816 et 1817.

On sait que certains corps plongés dans un liquide s'y mouillent, tandis que d'autres ne s'y mouillent point. Le premier cas indique une adhésion entre les particules du liquide et celles du corps qu'il mouille. C'est donc là une nouvelle force qui peut influer sur les phénomènes de l'écoulement, tels que les calcule la théorie. Aussi, nous dirons plus loin un mot de ces effets, quand nous ne considérerons plus les corps d'une manière abstraite, mais avec toutes les propriétés dont ils sont doués dans la nature.

Est-ce à cette cause ou à de simples réactions mécaniques, ou tout-à-la-fois à ces deux circonstances que sont dues les variations considérables que l'on observe dans la quantité de l'écoulement par des ajustages de diverses formes? Ayant percé un orifice plan dans une portion de paroi mince et plane, *fig. 64*, et observé la dépense qui s'opère en un temps donné, supposons que l'on remplace cet orifice par une paroi courbe, en conservant la même charge d'eau. Si la forme de cette nouvelle paroi est concave vers le liquide, *fig. 65*, le produit sera plus grand; si elle est convexe, *fig. 66*, il sera moindre. Il suffit même, pour produire des changemens considérables, que les bords de l'orifice soient un peu redressés hors de son plan, *fig. 67*, de manière à former une sorte de tuyau pyramidal très-court *ABCD*, dont la base *AB* s'adapte exactement à une ouverture percée dans la paroi plane. Si d'abord on place cet ajustage de manière que ses lèvres soient saillantes au dehors du liquide, la dépense en un temps donné sera, je suppose, comme 100; mais si on le retourne sur sa base, de manière que la saillie soit en dedans, la dépense sera réduite à 71; et la réduction peut devenir plus forte encore, en employant ainsi des tubes cylindriques d'un calibre très-étroit. M. Hachette a fait sur ce sujet beaucoup de recherches intéressantes et instructives.

Nous avons vu plus haut, que la veine fluide qui sort d'un orifice quelconque, décrit dans l'air une parabole déterminée par la direction et l'intensité de la pression qui la projette.

Cette parabole devient une ligne droite, si le plan de l'orifice est horizontal; et le liquide descend ou monte selon que la pression s'y trouve dirigée de haut en bas, ou de bas en haut. Pour réaliser ce dernier cas, concevez un vase vertical ABCD, *fig. 69*, communiquant par sa base à un canal horizontal BC, percé à sa surface supérieure d'un petit trou O de forme quelconque. Si l'on remplit d'eau le vase et le canal, et que l'on débouche ensuite l'orifice O, le liquide jaillira verticalement, et l'on aura le phénomène si connu des *jets d'eau*. La force d'impulsion en O sera égale à la vitesse qu'un corps pesant acquerrait en chute libre, s'il tombait depuis la surface supérieure AD du liquide jusqu'à la hauteur de l'orifice, ou plus exactement jusqu'à celle de la section contractée. Cette force est précisément celle qu'il faudrait employer pour faire remonter les molécules liquides jusqu'au niveau de la surface supérieure. Telle serait donc la hauteur du jet dans le vide; mais sa hauteur réelle dans l'air est beaucoup moindre à cause de la résistance que ce fluide oppose au mouvement. Selon Mariotte, un jet vertical de 5 pieds de hauteur exige une hauteur de réservoir de 5 pieds 1 pouce; et pour toute autre hauteur de jet, l'excès d'élévation du réservoir croît à très-peu de chose près comme les carrés de cette hauteur. Par exemple, si le jet doit être de 100 pieds, comme 100 contient 5 vingt fois, la différence en pouces sera le carré de 20, ou 400 pouces, qui font 33 pieds 4 pouces; ainsi la hauteur du réservoir, d'après cette règle, devra être 133 pieds 4 pouces.

Ce calcul suppose que les ouvertures des orifices sont suffisantes pour que le frottement du liquide, contre leurs bords, ne retarde pas sensiblement sa vitesse. Cela exige que l'on fasse l'orifice plus large, à mesure que l'on emploie de plus grandes vitesses. Mariotte a donné des règles, pour cet objet, dans son *Traité du mouvement des eaux*. Il faut aussi, pour obtenir toute la hauteur du jet, ne pas lui donner une direction rigoureusement verticale, parce que, si les molécules, après être parvenues au sommet de la gerbe, retombaient dans le jet même, elles choqueraient les particules ascendantes et diminueraient leur vitesse. On place quelquefois ainsi, par

amusement, des corps légers dans le jet, par exemple des œufs vides, et l'impulsion continuelle qu'ils reçoivent les soutient en les faisant tourner sur eux-mêmes avec rapidité. Cette destruction de vitesse par le choc, s'opère même de bas en haut, lorsqu'on place des obstacles solides dans un jet vertical descendant, comme M. Hachette l'a observé; car la dépense en est diminuée d'une manière notable, et d'autant plus, que l'obstacle est placé plus près de l'orifice; probablement parce que la contiguïté plus exacte des particules liquides y rend plus parfaite la communication du choc. Cette force d'impulsion des jets est employée dans les préparations anatomiques, pour introduire, dans les plus petits vaisseaux, des liquides colorés, qui les rendent sensibles en les distendant. La meilleure disposition de l'appareil me semble être celle que M. Duméril a indiquée, et qui est représentée *fig. 70. ABBB*, est un tube de verre vertical de deux ou trois centimètres de diamètre intérieur, destiné à servir de réservoir. Il est ouvert par le haut et fermé en bas par un bouchon de bois, qui y est luté avec de la cire. Ce bouchon est percé à son centre, pour recevoir à frottement un second tube plus petit, ayant seulement deux ou trois millimètres de diamètre intérieur et une longueur de deux ou trois centimètres. A l'extrémité de ce tube on adapte une tige flexible de gomme élastique, d'une longueur à-peu-près double, et d'une grosseur égale, que l'on ajuste d'abord par le seul frottement, et qu'on achève de fixer sur le tube, en l'enveloppant par plusieurs replis d'un fil très-serré; enfin, à l'autre extrémité de cette tige flexible, on adapte de même un dernier tube de verre très-court, dont le bout libre est effilé à la lampe, en forme de bec très-fin. Cela posé, si l'on fixe verticalement le grand tube et son appendice, et qu'on le remplisse d'un liquide quelconque, ce liquide sortira du bec ouvert, avec une force d'impulsion déterminée par la hauteur de la colonne; et, en tenant à la main la tige flexible, on donnera au jet telle direction que l'on voudra. En outre, on pourra déterminer, à volonté, l'instant de son départ, en serrant entre les doigts la tige flexible, et la relâchant quand on voudra que l'écoulement ait lieu.

On pourra donc ainsi chercher avec toute liberté les petits vaisseaux que l'on veut injecter, y introduire le bec capillaire avec toutes les précautions que leur délicatesse exige, et lâcher le jet ou le retenir, ou modérer sa masse, selon que les circonstances l'exigeront.

La mesure de l'écoulement par divers orifices, et sous des pressions diverses, est un élément sans cesse nécessaire pour la conduite et la distribution des eaux. En conséquence, je rapporterai ici les règles usitées dans ces opérations.

L'espèce d'unité qu'on y emploie s'appelle le *pouce d'eau*. C'est la quantité d'eau qui coule en une minute par un orifice circulaire, *fig. 71*, d'un pouce de diamètre, percé dans une paroi verticale très-mince, sous une pression de sept lignes d'eau comptée du centre de l'ouverture, ce qui exige que l'eau se tienne à huit lignes au-dessus de ce centre dans les parties de la surface les plus éloignées de l'endroit de l'écoulement, parce qu'il se fait en cet endroit un abaissement local, qui peut être évalué à une ligne, dans les circonstances assignées. Ces conditions posées, la quantité d'eau qui coule par l'orifice d'un pouce, en une minute, est 28 livres d'eau ou 14 pintes anciennes mesures de Paris, ce qui équivaut à un cylindre d'eau qui aurait un pouce de diamètre et 880 pouces de longueur.

Cette première mesure se subdivise en parties plus petites, comme un demi-pouce, un quart de pouce, etc., qui correspondent aux quantités d'eau écoulées ainsi pendant une minute, par des orifices circulaires en paroi mince, ayant leur centre à 7 lignes au-dessous de la surface de l'eau à l'endroit de l'écoulement, et ayant pour diamètre, la moitié, le quart ou telle autre fraction du pouce. La vitesse d'écoulement dans ces différens cas étant la même, à cause de l'égalité de pression, les volumes d'eau obtenus, en temps égal, sont proportionnels aux aires des orifices circulaires, par conséquent aux carrés de leurs diamètres. Ainsi, le demi-pouce d'eau donne le quart du volume du pouce d'eau, ou 7 livres par minute; le quart de pouce donne le seizième du pouce, ou 1 livre $\frac{3}{4}$; et ainsi du reste. On emploie aussi pour mesure les *lignes d'eau* qui donnent $\frac{1}{144}$ du volume du pouce, parce que le

pouce linéaire contient douze lignes. La forme de l'ouverture est toujours circulaire, ce qui facilite les comparaisons. D'après cela, si l'on veut évaluer le produit d'un ruisseau ou d'une fontaine, en pouces ou lignes d'eau, il n'y aura qu'à recevoir et mesurer l'eau qu'il donne en une minute. Autant de fois il y en aura 28 livres, autant il y aura de pouces d'eau. Pour rendre le résultat plus exact, il faut prolonger l'expérience pendant plusieurs minutes, et diviser le produit par leur nombre.

On peut aussi avoir besoin de cette évaluation dans des cas où il serait difficile et quelquefois impossible de recevoir et jauger immédiatement l'eau écoulée. Alors on y suppléera par l'observation de sa vitesse. On jettera sur la surface du courant une petite boule de cire, qu'on lestera de manière qu'elle s'y enfonce en presque totalité; ce qui formera un système presque de même densité que l'eau. Puis on observera, avec une montre à secondes, combien cette boule parcourt de pouces par minute; on divisera ce nombre par 880, et le quotient exprimera le nombre de *pouces d'eau* que donnerait une section circulaire d'un pouce de diamètre, faite à l'endroit du courant où l'on a observé. Cette réduction est nécessaire; car l'observation prouve que la vitesse d'une eau un peu profonde n'est pas tout-à-fait la même dans l'intérieur et à la surface.

Toutes les évaluations précédentes du pouce d'eau et de ses subdivisions sont prises, en supposant l'écoulement soumis à une pression de 7 lignes d'eau comptées depuis le centre de l'ouverture circulaire. Mais si cette hauteur devait être différente, on pourrait calculer le produit d'avance, d'après la règle de Torricelli, proportionnellement aux racines carrées des hauteurs. C'est-à-dire, par exemple, que 28 lignes de pression au lieu de 7, donneraient un produit double, 63 en donneraient un triple, et ainsi du reste.

La dernière question que nous considérerons ici relativement au mouvement des liquides est celle de la propagation des ondes. Lorsqu'on choque un point de la surface d'une eau tranquille, ou lorsque, après y avoir plongé l'extrémité d'un corps solide, on retire subitement ce corps, tout le monde sait

qu'il se forme autour du centre de l'ébranlement de petites vagues, qui se répandent rapidement de toutes parts. Il est clair que cette transmission du mouvement imprimé en un point, doit pouvoir se déduire mécaniquement de la constitution physique des liquides; c'est ce qu'a fait M. Poisson, pour le cas où l'ébranlement est produit par le soulèvement d'un corps plongé; et il est parvenu aux conséquences suivantes. Il y a toujours deux sortes d'ondes qui se forment autour du centre d'ébranlement. Les unes sont indépendantes de son étendue. Elles naissent au même instant en nombre infini, et se propagent également dans tous les sens avec des vitesses uniformément accélérées, comme celles des corps graves; seulement les intensités de ces vitesses sont inégales pour les différentes ondes; et les plus rapides sont aussi les plus protubérantes. Mais cette protubérance s'affaiblit en s'élargissant, à mesure qu'elles s'étendent; et, tant par cette circonstance que par la rapidité de leur vitesse, il est vraisemblable que les ondes de cette espèce ne sont jamais aperçues. Mais il se forme aussi, en même temps, d'autres ondes plus lentes, qui dépendent de l'ébranlement primitif, et qui deviennent appréciables parce qu'elles suivent d'autres lois. Celles-ci sont pareillement en nombre infini, et naissent ensemble au centre de l'ébranlement, d'où elles se propagent avec des vitesses inégales, de sorte que les plus protubérantes sont aussi les plus rapides; mais elles diffèrent des premières, en ce que leurs vitesses sont constantes, et leur propagation uniforme: en outre leur protubérance décroît tellement avec leur rapidité, que les premières d'entre elles peuvent être seules sensibles à l'observation. La dégradation des vitesses suit la même loi dans toutes les séries d'ondes; mais leur rapidité absolue dépend de l'étendue de l'ébranlement primitif, par exemple de la section à fleur d'eau du corps plongé. La dépendance mutuelle de ces deux élémens que M. Poisson a tirée de sa théorie, s'était présentée à moi il y a long-temps, dans une suite d'expériences faites avec des solides de révolution de diverses formes, que je plongeais dans l'eau à diverses profondeurs très-petites, et que je retirais subitement. Or, quand ces solides, soit cônes,

sphères, ellipsoïdes ou paraboloides, étaient plongés à des profondeurs telles que leur section à fleur d'eau devint la même, le temps de la propagation de la première onde sensible était le même aussi ; au lieu qu'il variait si la section à fleur d'eau était différente. Il serait intéressant de vérifier de même, par l'expérience, les autres indications de la théorie.

CHAPITRE XIV.

Sur les mouvemens des corps solides dans les milieux résistans.

UN corps solide qui se meut dans un fluide matériel, pousse devant lui les molécules qui se rencontrent sur sa route ; il use ainsi une partie de son mouvement ; car en vertu de l'inertie de la matière, la vitesse produite par une force déterminée diminue proportionnellement à la quantité de matière qu'on lui donne à mouvoir. Ainsi, dans le cas actuel, si l'on multiplie chaque molécule du corps et du liquide, par sa vitesse actuelle, la somme de ces produits devra être constante à toutes les époques du mouvement ; et ainsi, en supposant que le corps solide eût seulement reçu une impulsion primitive, de nature à n'être point renouvelée, il la perdrait peu-à-peu de cette manière. Ce partage de mouvement constitue ce que l'on appelle la résistance des liquides incompressibles.

La loi en serait bien facile à connaître, si les molécules liquides choquées s'éloignaient aussitôt du corps choquant, en emportant sa vitesse, sans revenir circuler autour de lui, et sans exciter dans les molécules voisines aucune agitation qui pût influencer sur son mouvement. En effet, dans cette supposition, considérons le mobile à un point quelconque de sa course où il y ait une vitesse déterminée, et partageons le temps en intervalles assez petits pour que, pendant chacun d'eux, il ne perde qu'une quantité infiniment petite de sa vitesse. Alors, pendant le premier instant qui suivra l'époque que nous considérons, le mobile choquera un certain nombre de particules du milieu résistant, auxquelles il communiquera une certaine

vitesse ; et, puisqu'elles sont supposées s'anéantir pour lui aussitôt après qu'il les a choquées, il est évident que, s'il avait, à cette même époque, une vitesse double, il en choquerait dans le même temps un nombre double, à chacune desquelles il communiquerait aussi une double vitesse, du moins en faisant abstraction de la quantité infiniment petite dont la sienne est diminuée par leur choc ; de sorte que la quantité totale de mouvement communiqué serait quadruple ; et le même raisonnement montre qu'en général cette quantité serait proportionnelle au carré de la vitesse du corps. Or, les particules du milieu ne peuvent l'acquérir sans que le corps lui-même la perde, et c'est là ce qui constitue la résistance du milieu : cette résistance serait donc aussi proportionnelle au carré de la vitesse du corps, et il faudrait la faire entrer dans le calcul des phénomènes, comme une force retardatrice qui agirait suivant cette loi. C'est aussi ce que l'expérience confirme dans les circonstances qui, par leur simplicité, se rapprochent de notre supposition, c'est-à-dire, dans lesquelles les molécules choquées ne réagissent plus sensiblement sur le mouvement du mobile ; mais en général, quelle que soit la complication de ces circonstances, on peut toujours employer la résistance proportionnelle au carré de la vitesse, comme une approximation qui renferme l'élément principal des résultats.

Pour montrer par un exemple comment l'introduction de cette force modifie les phénomènes, considérons son action sur la chute des corps. Quand un corps pesant tombe librement dans le vide, la pesanteur qui le sollicite toujours avec la même énergie, ajoute à chaque instant un petit accroissement égal à la vitesse qu'il a déjà acquise ; et de là résulte le progrès de son accélération. Mais si le corps tombe dans un fluide résistant, l'action que la pesanteur exerce sur lui, est, à chaque instant, combattue et diminuée d'une petite quantité que nous pouvons supposer proportionnelle au carré de sa vitesse acquise. Si le corps part du repos, cette force retardatrice est d'abord nulle, et ainsi le mouvement doit commencer par s'accélérer ; mais bientôt la résistance se développant avec la

vitesse, elle ralentit l'accélération. Enfin, si le mouvement se poursuit assez long-temps, il arrive un terme où l'énergie retardatrice de la résistance égale l'effort total de la gravité même; dès-lors le corps continue à se mouvoir, seulement en vertu de sa vitesse acquise, et comme s'il n'avait absolument aucun poids. Son mouvement devient donc uniforme et sa vitesse constante. C'est ce que l'on observe en effet sur tous les corps, qui tombent dans un liquide assez profond pour pouvoir parvenir à cette uniformité. La vitesse constante est proportionnelle à la racine carrée de la densité du corps, et réciproque à la racine carrée de la densité du milieu résistant; d'où il résulte que, dans le même milieu, les corps les plus denses doivent tomber avec une plus grande vitesse. Un corps plus léger que le liquide où il plonge, se comporte exactement de la même manière, en s'y élevant. Son mouvement est d'abord accéléré; mais après un certain temps, sa vitesse se fixe, et dès-lors il continue à s'élever uniformément jusqu'à ce qu'il arrive à la surface libre. Les liquides produisent encore une autre sorte de résistance qui provient de l'adhérence de leurs particules entre elles, et avec les corps qui s'y meuvent. Cette résistance, analogue au frottement, est constante pour chaque liquide et indépendante de la vitesse. L'expérience seule peut la déterminer, et nous donnerons plus tard les moyens de l'évaluer ainsi.

Lorsque les corps qui nagent à la surface des liquidés sont tant soit peu écartés de leur position naturelle d'équilibre, ils oscillent périodiquement de part et d'autre de cette position, pendant un certain temps dépendant de leur densité et de l'écart qu'on leur a donné autour de leur situation d'équilibre. Tel est le cas d'un navire qui, d'abord immobile, est dérangé de cet état par une bouffée de vent, ou par l'impulsion d'une vague. Ces mouvemens sont déterminables par le calcul, et leur théorie indique les règles qu'il faut suivre pour assurer la stabilité des vaisseaux.

CHAPITRE XV.

Des mouvemens des fluides aériformes.

Nous avons appelé fluides aériformes compressibles, ceux dont les particules sont écartées les unes des autres à d'assez grandes distances, et par un pouvoir répulsif assez énergique pour que, sans violer les lois de l'impénétrabilité, et même sans modifier en rien leur constitution gazeuse, nous puissions leur faire subir de très-grandes condensations. Comme tous les fluides de ce genre réagissent contre les forces qui les compriment, il en résulte que le moindre ébranlement excité dans un seul point de leur masse, se propage de proche en proche à la masse entière. Nous verrons par la suite que ce sont des ébranlemens ainsi propagés dans l'air, qui, venant choquer notre oreille, excitent en nous la sensation du son. Mais cette belle application des lois des mouvemens ne peut être solidement établie qu'après que l'on a déterminé, par l'expérience, les propriétés physiques de l'air et des autres substances gazeuses, ainsi que le mode suivant lequel ces substances résistent à la compression.

Les fluides aériformes opposent aussi au mouvement des corps une résistance qui naît de leur inertie, de leur réaction élastique et de leur viscosité, qui, pour petite qu'elle soit, n'est peut-être pas absolument nulle. C'est pourquoi les corps pesans qui y tombent ou qui s'y élèvent, acquièrent après un certain temps une vitesse constante. On en voit l'exemple dans la descente lente et paisible des personnes qui se laissent tomber en parachute, d'une grande hauteur.

LIVRE II.

*Exposé des phénomènes généraux et des moyens
d'observation communs à toutes les sciences,
d'expérience.*

DANS les chapitres qu'on vient de lire, nous avons établi les conditions abstraites de l'équilibre et du mouvement, pour des systèmes de particules matérielles inertes, assujetties aux divers modes d'agrégation qui distinguent les corps solides, liquides, aériformes. Nous allons maintenant sortir de ces abstractions pour considérer ces corps eux-mêmes, tels qu'ils existent réellement dans la nature, avec toutes les propriétés soit générales, soit particulières, dont ils sont doués. Nous chercherons à déterminer, par observation, l'espèce et l'action des forces d'où ces propriétés résultent; et, leur appliquant les lois abstraites que nous avons généralement établies, nous nous efforcerons d'en conclure les phénomènes qui en devront résulter. Cette déduction, lorsqu'elle sera possible, nous fera pénétrer dans l'essence même des phénomènes, dont elle développera tous les rapports; et, quand une complication excessive de données la rendra incomplète, l'enchaînement qu'elle établira, quoique partiel et interrompu en divers points, offrira encore à l'esprit un secours extrêmement utile, en fixant un petit nombre de faits principaux, autour desquels tous les autres devront se grouper. Telle est la marche de la vraie physique, de la seule qui soit solide et durable. L'observation et l'expérience lui fournissent ses matériaux, le raisonnement les ordonne, et le calcul les combine. Ne pouvant faire ici un usage direct de ce puissant instrument, nous en consulterons du moins les résultats comme les indications d'un guide fidèle; et, en les adaptant à nos observations, nous pourrons suivre encore l'enchaînement des conséquences qui en dérivent, aussi loin que peut aller notre faible intelligence quand elle n'a pas le secours des signes pour faciliter ses opérations.

CHAPITRE PREMIER.

Des procédés qui servent à mesurer l'étendue.

IL n'est point de science d'observation où l'on n'ait besoin perpétuellement de mesurer des longueurs, des largeurs, des épaisseurs, et de diviser des lignes droites ou circulaires en parties égales. Il faut donc avant tout nous instruire des procédés pratiques au moyen desquels on peut exécuter ces diverses opérations.

Les deux instrumens les plus simples qui servent à cet usage, sont le compas et la règle, représentés *fig. 1*. La règle sert pour tracer des lignes droites, le compas pour tracer des cercles, et pour diviser leur contour, et les longueurs des droites en parties égales. Ayant donné aux branches du compas une ouverture déterminée, si l'on porte cette ouverture sur les parties consécutives d'une ligne droite ou circulaire, en plaçant successivement chaque pointe au point qu'occupait l'autre dans l'opération précédente, la ligne ainsi parcourue se trouvera divisée en parties égales, dont la grandeur dépendra de l'ouverture arbitraire que l'on aura établie entre les deux branches.

Une première échelle de parties égales étant ainsi tracée, on peut, à l'aide d'une opération pareille, la subdiviser en parties plus petites dans un rapport donné, c'est-à-dire, qui soient, par exemple, la moitié, le dixième ou le vingtième des précédentes; mais il faut alors donner au compas une ouverture qui soit aussi la même fraction de celle que l'on a employée d'abord. C'est à quoi l'on parvient par quelques essais, en choisissant successivement des ouvertures diverses; puis les portant, le nombre de fois convenu, sur la division que l'on veut réduire, et observant si, après cette répétition, le dernier pas de l'instrument le porte en avant ou en arrière de la limite prescrite. Suivant que l'un ou l'autre de ces cas a lieu, on resserre ou on ouvre les branches du compas un peu davantage, et l'on se fixe enfin à l'ouverture qui paraît donner le plus exactement la coïncidence.

Mais il existe un procédé ingénieux, dû à un géomètre

français nommé Vernier, au moyen duquel une échelle de parties égales peut, sans aucun tracé nouveau, être facilement subdivisée en parties plus petites, et même d'une petitesse indéfinie. Ce procédé consiste à appliquer contre la division proposée, une autre division dont les parties ont avec les siennes un rapport connu; et le défaut de coïncidence des traits qui limitent les divisions correspondantes indique la fraction dont elles se dépassent mutuellement. Un exemple rendra ceci sensible. Soit *LL*, *fig. 2*, une règle divisée en parties égales, 0-1, 1-2, 2-3. Si l'on veut se servir de cette règle pour mesurer une longueur donnée, plus petite qu'elle, la ligne *AB*, par exemple, on verra bien, par la simple superposition, que cette ligne contient neuf divisions entières de la règle, plus une petite fraction représentée par l'intervalle *bB*, dont le point *B* excède la 9^e. division de la règle; mais la grandeur absolue de cette fraction et son rapport à une division entière, resteront inconnus. Pour le déterminer, construisez une autre règle *VV* *fig. 3*, divisée aussi en parties égales, mais en parties plus petites que les premières, dans une proportion connue; tellement, par exemple, que 9 divisions de la grande règle *LL* en vailent 10 de la petite règle *VV* que nous nommerons *un vernier*. Si vous posez ce vernier le long de la règle, comme le représente la figure, la première de ses divisions, qui est marquée 0, coïncidera avec la première de la règle, qui est aussi marquée 0; et la division 10 du vernier coïncidera aussi avec la division 9 de la règle; mais les divisions intermédiaires ne coïncideront pas. La seconde division du vernier sera en arrière de la seconde de la règle d'une quantité égale à la différence des deux divisions, c'est-à-dire, de $\frac{1}{10}$ D, en représentant par la lettre *D*, l'étendue quelconque d'une division de la grande règle *LL*. De même la troisième division du vernier sera de $\frac{2}{10}$ D en arrière de sa correspondante; et ainsi successivement, l'écart des suivantes sera exprimé par $\frac{3}{10}$ D, $\frac{4}{10}$ D, $\frac{5}{10}$ D, $\frac{6}{10}$ D, $\frac{7}{10}$ D, $\frac{8}{10}$ D, $\frac{9}{10}$ D, enfin $\frac{10}{10}$ D, ou D. Cette dernière différence doit en effet être égale à une division entière D, puisque, par construction, le 11^e. trait du vernier, qui est marqué 10, coïncide avec le 10^e. trait de la règle, qui est marqué par le chiffre 9;

Concevons maintenant que l'on pousse doucement le vernier le long de la règle, *fig. 4*, de manière que la coïncidence se fasse sur le second trait, marqué par le chiffre 1 : il est visible que, dans ce mouvement, le second trait du vernier s'est avancé d'une quantité égale à $\frac{1}{10} D$, puisque c'était là l'expression de sa distance au second trait de la règle LL, dans la position précédente. Chacune des autres divisions du vernier s'est donc avancée aussi d'une égale quantité, puisqu'elles se tiennent toutes à des distances invariables ; ainsi leurs écarts sont désormais exprimés par $+$ $\frac{1}{10} D$, 0, $-$ $\frac{1}{10} D$, $\frac{2}{10} D$, $\frac{3}{10} D$, $\frac{4}{10} D$, $\frac{5}{10} D$, $\frac{6}{10} D$, $\frac{7}{10} D$, $\frac{8}{10} D$, et enfin $\frac{9}{10} D$; d'où l'on voit que la division 1 est maintenant la seule qui coïncide avec les divisions de la règle.

Si, dans cette position, le point B, *fig. 2*, tombait précisément à l'extrémité de la 10^e. division du vernier, ou sur le onzième trait, on conclurait avec certitude que la petite fraction *bB* est égale à $\frac{1}{10} D$, de sorte que la longueur totale de la ligne AB serait 9 divisions de la grande règle LL, plus $\frac{1}{10}$.

Mais, si cette coïncidence n'a pas lieu, il n'y a qu'à pousser le vernier d'une division de plus, c'est-à-dire, de manière que sa seconde division coïncide avec celle de la règle *fig. 5*. Par ce mouvement, chaque trait aura encore marché d'une nouvelle quantité égale à $\frac{1}{10} D$, de sorte que leurs écarts, soit avant, soit après les divisions correspondantes de la règle, seront $+$ $\frac{2}{10} D$, $+$ $\frac{1}{10} D$, 0, $-$ $\frac{1}{10} D$, $\frac{2}{10} D$, $\frac{3}{10} D$, $\frac{4}{10} D$, $\frac{5}{10} D$, $\frac{6}{10} D$, $\frac{7}{10} D$, et enfin $\frac{8}{10} D$, pour le onzième. Si donc, dans cette nouvelle position, le point extrême B, *fig. 2*, répond exactement à la fin de la 10^e. division du vernier, ou au onzième trait, on en conclura qu'il dépasse la 9^e. division de la règle, d'une quantité égale à $\frac{2}{10} D$, c'est-à-dire, aux deux dixièmes d'une division ; ainsi la longueur de la ligne *bB* contiendra 9 divisions de la règle et $\frac{2}{10}$.

Si, dans cette seconde position, la 10^e. division du vernier n'avait pas atteint le point extrême B, on pousserait le vernier d'une division de plus. Si, cette troisième fois, le trait atteignait le point B, la longueur *bB* serait 9 div. $+$ $\frac{3}{10}$, et ainsi de suite. Par conséquent, si l'excès du point B sur la 9^e.

division de la règle est une des fractions $\frac{1}{10} D$, $\frac{2}{10} D$, $\frac{3}{10} D$, $\frac{4}{10} D$, $\frac{5}{10} D$, $\frac{6}{10} D$, $\frac{7}{10} D$, $\frac{8}{10} D$, $\frac{9}{10} D$, on l'évaluera exactement par cette méthode.

Mais si elle tombe entre deux quelconques de ces valeurs, on ne l'aura pas tout-à-fait exactement. Par exemple, si l'excès bB est plus grand que $\frac{6}{10} D$, et moindre que $\frac{7}{10} D$, on trouvera que le point B n'est pas encore atteint en faisant coïncider le 7^e. trait du vernier marqué 6, et qu'il est dépassé en faisant coïncider le 8^e. marqué 7. On évaluera donc la différence par estime, en voyant si la coïncidence est plus approchée pour l'une que pour l'autre; et l'on ajoutera la différence présumée à $\frac{6}{10} D$, ou on la retranchera de $\frac{7}{10} D$. Alors, à parler à la rigueur, la mesure ainsi obtenue pour bB ne sera pas absolument exacte, mais l'erreur sera certainement moindre que $\frac{1}{10} D$, puisque la valeur exacte est comprise entre deux expressions qui ne diffèrent que de cette quantité. Il est évident que l'on pousserait plus loin l'exactitude, si le vernier embrassait un plus grand nombre de divisions de la règle, puisqu'alors les différences de ses divisions à celles de la règle deviendraient moindres, et, par conséquent, sa marche d'une coïncidence à une autre serait plus petite; mais il y a une limite à cette précision dans la difficulté d'observer exactement sur quelle division se fait la coïncidence, difficulté qui augmente à mesure que les différences des parties du vernier et de la règle sont plus petites.

Nous venons de considérer le vernier appliqué à une division rectiligne. On l'applique également aux divisions circulaires, comme sont celles des limbes des cercles métalliques qui servent à observer les angles. Alors on fait les verniers circulaires aussi, et concentriques à la division de l'instrument. Voyez, *fig.* 6. Il est évident que leur propriété n'est point changée par cette modification; aussi on s'en sert de la même manière, et l'on évalue leurs indications comme pour les divisions rectilignes.

Dans tous les cas, pour que ces indications soient exactes, il est indispensablement nécessaire que le bord rectiligne ou circulaire du vernier s'applique exactement sur la division

dont il doit fractionner les parties ; c'est pourquoi on l'ajuste sur des pièces qui règlent sa marche conformément à cette condition. Il faut, de plus, que son mouvement soit lent, et gradué avec assez de délicatesse pour qu'on puisse l'amener exactement à ses diverses coïncidences ; en conséquence on le fait mouvoir par le moyen d'une vis disposée comme le représente la *fig. 7*. Cette vis est taillée à l'extrémité d'une tige cylindrique d'une certaine longueur, dont un des points porte un petit renflement R par lequel on la retient dans un collet CC, fixé aux parties immobiles de l'appareil, de sorte qu'elle ne peut plus que tourner sur son axe sans aller en avant ni en arrière. Son autre extrémité, qui forme la vis proprement dite, s'engage dans un écrou attaché à la pièce VV sur laquelle le vernier est tracé ; et cette pièce elle-même peut avancer et reculer, dans une coulisse parallèle à l'axe de la vis. Alors, en prenant la vis par sa tête TT, et la faisant tourner sur son axe, on conçoit qu'elle s'enfonce dans son écrou, ou qu'elle s'en dégage ; qu'ainsi elle l'attire ou le repousse, et qu'elle fait, par conséquent, avancer ou reculer le vernier auquel il est attaché.

Ici, la vis n'est employée que comme produisant un mouvement lent et gradué à volonté. Mais, en supposant ses filets espacés avec une régularité parfaite, ce que l'art permet d'atteindre, son mouvement révolatif peut lui-même servir de moyen de subdivision. Car, en conservant la même disposition que tout-à-l'heure, si le collet CC qui retient la tige l'enveloppe avec exactitude, et si l'écrou attaché à la pièce VV, qu'il fait mouvoir, est travaillé avec justesse, il est clair que, pour chaque tour entier de la vis, cette pièce avancera ou reculera de l'intervalle juste que les filets de la vis comprennent entre eux ; et, pour chaque moitié ou chaque quart de tour, elle marchera de la moitié ou du quart de cet intervalle. On pourra donc déterminer à volonté ces fractions, en traçant sur la tête de la vis une division circulaire de parties égales, *fig. 8*, et rapportant sa marche à un index fixe FF, lié aux parties immobiles de l'appareil. Car si la division circulaire est, par exemple, de 1000 parties, en tournant la vis d'une

seule, on fera avancer la pièce qu'elle conduit de $\frac{1}{1000}$ d'un de ses pas : de sorte qu'en supposant le pas d'un millimètre, le déplacement serait de la millième partie de cette quantité. Ce procédé est employé fréquemment dans les recherches de physique et d'astronomie. Il exige seulement, dans le travail des vis, une grande exactitude, que l'on obtient par l'opération appelée *le rodage*, laquelle consiste à faire tourner long-temps, sur *un tour*, la vis dans l'écrou qu'on veut lui donner, en interposant entre deux de l'émeri pour que les surfaces en contact s'usent mutuellement, et prennent ainsi une forme telle qu'elles s'appliquent parfaitement l'une à l'autre. Pour cela on compose l'écrou de deux pièces, qui d'abord n'embrassent pas tout le contour de la vis, mais que l'on serre de plus en plus contre elle, par des vis latérales, ou par des ressorts, à mesure que le corps de la vis s'use et s'amincit par le frottement continuel.

La vis ainsi perfectionnée peut être encore appliquée avec un grand succès à la mesure des épaisseurs des lames ; tel est le but de l'appareil représenté *fig. 9*. Cet appareil, d'abord imaginé par M. Cauchoix, pour mesurer la courbure des verres sphériques, a été nommé par lui *sphéromètre*. Il est essentiellement composé de trois branches d'acier horizontales formant entre elles des angles de 120° . Aux extrémités de ces trois branches et perpendiculairement à leur direction, se trouvent trois tiges d'acier, dont les bouts amincis en cylindre et tournés avec une précision extrême, sont terminés par trois plans d'une fort petite étendue. Au centre des trois branches est une vis parfaitement travaillée, dont la tête porte un cadran divisé. Quand on veut employer cet instrument pour mesurer l'égalité de courbure d'un verre sphérique, on le pose d'abord sur la surface du verre, et l'on tourne la vis centrale jusqu'à ce qu'elle arrive précisément au contact ; ce dont on s'aperçoit parce qu'alors l'instrument peut tourner sur le verre avec une liberté parfaite, sans qu'on observe dans son mouvement aucun ballottage sensible. Cet accord établi, on promène le sphéromètre sur d'autres parties du verre ; alors le moindre changement de courbure devient appréciable,

parce que la vis centrale et les trois pointes ne touchent plus simultanément. Lorsque la vis ne touche plus, le poids de l'instrument portant tout entier sur ses trois pieds, sa rotation produit un frottement rude, et un son très-différent de celui qu'il rendait d'abord. Si au contraire la vis est trop descendue, l'instrument ballote sur ses trois pieds, d'une façon qui devient sensible à l'oreille et au tact. La précision de ces deux indices est véritablement incroyable ; aucun autre procédé connu des arts ne peut lui être comparé. Pour s'en convaincre, il n'y a qu'à poser le sphéromètre sur un verre plan, puis amener la vis à un contact exact sur sa surface, et ensuite la tourner un peu à droite ou à gauche, jusqu'à ce que le défaut de contact devienne sensible par la raideur du frottement, ou le bruit du ballottage : alors, en lisant sur l'index de la division le peu de marche que ce changement suppose, on en sera certainement étonné.

D'après cela on peut aisément vérifier si la surface d'un verre supposé plan est réellement plane ; car, lorsque la vis du sphéromètre a été amenée jusqu'au contact sur une partie de cette surface, il n'y a qu'à promener l'instrument sur les autres parties du verre sans toucher la vis, et voir si le contact subsiste encore avec la même précision.

Supposons cette condition satisfaite. Si l'on vient à glisser entre le plan de verre et la pointe de la vis une lame à faces parallèles, quelque mince qu'on la suppose, il est clair que le sphéromètre ballottera. La quantité dont il faudra détourner la vis pour retrouver le contact, déterminera l'épaisseur de la lame interposée. Mais la pression de la vis sur la lame dans cette opération pourrait la briser si elle était très-mince, ou en général altérer sa surface si elle était susceptible d'être rayée ; c'est pourquoi il ne faut pas l'insérer directement sous la vis. Il faut d'abord poser celle-ci sur un morceau de verre plan, à faces parallèles, dont l'égalité d'épaisseur se vérifiera préalablement par le sphéromètre. Ce morceau étant placé sur le grand verre plan, on amènera la vis au contact exact sur sa surface supérieure, les trois autres pointes posant sur le grand verre ; puis on introduira, entre celui-ci et le verre supérieur, la lame que l'on voudra mesurer. Après

cette interposition le sphéromètre ballottera, on le ramènera au contact parfait en tournant la vis; et la marche de celle-ci, marquée par son index, indiquera l'épaisseur cherchée sans que la lame ait couru le moindre risque, quelles que soient sa fragilité et sa minceur.

Enfin, il arrive souvent dans les expériences, que l'on a besoin de comparer exactement les longueurs de deux règles qui doivent servir de mesure, ou en général les dimensions homologues de deux corps, soit pour s'assurer qu'elles sont égales, soit pour mesurer exactement leur différence, si elles en ont une. Il existe pour cela un instrument très-utile, que l'on appelle *le comparateur*, *fig. 10*. Il est essentiellement composé d'une règle métallique TR, qui doit être bien droite et assez forte pour ne point fléchir sensiblement. Cette règle, à l'une de ses extrémités, porte un talon fixe T, qui sert à appuyer un des bouts des mesures que l'on compare. Un châssis mobile RR parcourt la surface de la règle, et peut se fixer à volonté sur un quelconque de ses points, au moyen de deux fortes vis de pression. Ce châssis forme la partie essentielle du comparateur. Il porte un tourillon fixe *c* autour duquel tourne le levier coudé *bcb'*, dont les deux branches *bc*, *b'c* ont des longueurs inégales, qui sont entre elles, par exemple, comme 1 à 10. Il suit de là que si l'on pousse le sommet *b* du petit bras d'une quantité quelconque fort petite, le bout du grand bras *b'* décrit, autour du centre commun *c*, un arc dix fois plus considérable. Pour mesurer ce mouvement, on applique sur le châssis un arc circulaire DD, divisé, par exemple, en cinquièmes de millimètres, et l'on fixe à l'extrémité du grand bras *b'* un vernier qui permet d'évaluer les dixièmes de cette division, par conséquent les cinquantièmes de millimètres. Comme les mouvemens du point *b'* sont décuplés de ceux du point *b*, on voit que chaque partie indiquée par le vernier répond à $\frac{1}{500}$ de millimètre ou $\frac{2}{1000}$.

Maintenant, quand on veut comparer avec cet instrument les longueurs de deux règles B, B' très-peu différentes l'une de l'autre, on place l'une d'elles B, par exemple, sur le comparateur, de manière qu'elle repose librement sur sa surface,

et que l'une de ses extrémités soit appuyée contre le talon T ; puis on amène le châssis vers l'autre extrémité de B , et on le presse contre cette extrémité jusqu'à ce que le vernier VV réponde à-peu-près au milieu de la division. Alors on serre les vis de pression du châssis et l'on note exactement la division précise à laquelle répond l'index du vernier. Cela fait , sans toucher davantage au châssis , on enlève la première règle B , on lui substitue la seconde règle B' ; le petit bras b poussé par un ressort r , vient de nouveau s'appliquer exactement contre elle. Alors on lit la division où le vernier s'arrête. Si les longueurs des deux règles sont exactement égales , cette division sera la même que dans l'opération précédente ; mais si elles sont inégales , elle sera différente , et le déplacement de l'index indiquera de combien l'une surpasse l'autre.

Cette expérience , pour être exacte , exige une précaution indispensable , et à laquelle on ne peut donner trop d'attention , à cause des erreurs graves auxquelles on s'exposerait en la négligeant. Tout le monde sait que les dimensions des corps varient avec les divers degrés de froid et de chaud qu'ils éprouvent. Nous chercherons bientôt la cause et la mesure de ce phénomène ; mais ici nous l'admettrons seulement comme un fait dont les preuves sont à chaque instant sous nos yeux. D'après cela , une même barre métallique , par exemple , n'a pas tout-à-fait la même longueur dans les différentes saisons de l'année , ni dans les diverses alternatives de froid et de chaud où on l'a placée. Ainsi , quand on veut la comparer à une autre , il faut fixer avec soin les circonstances particulières où elle se trouve dans le moment de l'observation ; car ces circonstances déterminent sa longueur actuelle. Nous découvrirons bientôt les procédés nécessaires pour cette fixation ; mais , en attendant , je puis dire que l'on doit prendre toutes les précautions possibles afin de rendre ces circonstances égales pour les deux règles comparées. C'est pourquoi il convient d'opérer dans une chambre assez vaste pour que la présence de l'observateur ne la réchauffe pas sensiblement. Il faut que cette chambre ne soit pas exposée à la chaleur immédiate des rayons solaires , ou du moins qu'elle en soit abritée par des volets ; il faut laisser les règles pendant plusieurs

heures avant de commencer à les comparer, afin qu'elles se mettent au ton général des corps environnans et du comparateur lui-même. Enfin il faut à chaque comparaison laisser quelque temps sur le comparateur la règle que l'on y a placée, pour qu'elle perde l'excès de chaleur qu'on a pu lui communiquer en la touchant. Avec ces précautions on peut être assuré que les circonstances sensibles de chaleur et de froid sont les mêmes pour les deux règles que l'on compare; il ne reste donc plus qu'à fixer exactement l'indication de ces circonstances, et de leur état commun; c'est à quoi sert un instrument appelé le *thermomètre*, et que nous expliquerons plus tard. Le comparateur ne peut s'appliquer qu'à des règles terminées; mais on peut aussi avoir besoin de comparer des longueurs comprises entre deux traits tracés sur une surface plane. On y parvient par un procédé que nous expliquerons quand nous aurons fait connaître les instrumens d'optique que l'on appelle *microscopes*.

CHAPITRE II.

De la balance et de la manière de s'en servir.

APRÈS la mesure des dimensions des corps, ce qui est le plus nécessaire au physicien, c'est de savoir déterminer les rapports de leurs masses; car il faut qu'il en tienne compte pour apprécier les intensités des forces, par lesquelles les phénomènes sont produits. Nous avons reconnu, page 84, que ces rapports peuvent se conclure de la comparaison des poids; enfin nous avons vu que l'égalité de deux poids se constate aisément, en les suspendant aux deux extrémités d'un levier dont le centre est fixe et les bras égaux. Telle est la disposition générale des instrumens appelés *balances*. Je ne parlerai ici que de ceux dont la disposition et la construction sont assez parfaites pour servir aux physiciens et aux chimistes.

Le levier de ces balances, ou ce qu'on appelle communément le *fléau*, est une barre d'acier trempé LL', *fig. 11*, à laquelle on donne une grande force, afin qu'elle n'éprouve

point de flexion sensible par les poids qu'on veut lui faire supporter. Soit G son centre de gravité : on s'efforce de faire en sorte que les deux parties GL , GL' du fléau, situées de part et d'autre de ce point, aient des longueurs et des figures pareilles; on les nomme *les bras* de la balance. Aux deux extrémités L , L' de ces bras, on attache des cordons égaux en longueur et en poids, destinés à soutenir des plateaux A , A' , qui sont aussi égaux entre eux. Pour rendre sensibles les moindres mouvemens du fléau, on y adapte une aiguille SO perpendiculaire à LL' , et dirigée dans la verticale du centre de gravité G , au-dessus ou au-dessous de ce point. Tout l'appareil est soutenu en un point C , situé aussi dans cette même verticale. Pour que sa mobilité soit plus parfaite, et qu'il ne soit soutenu, pour ainsi dire, que dans ce seul point, on donne, à la pièce de suspension C , la forme d'un couteau que l'on fait en acier très-dur, et dont le tranchant vif pose sur un plan horizontal poli fait aussi en acier, ou avec quelque autre substance d'une grande dureté.

Maintenant il est clair que si l'on avait réussi à établir une égalité parfaite entre toutes les parties de l'appareil situées des deux côtés du point G , l'équilibre aurait lieu naturellement lorsque la barre LL' se tiendrait dans une situation horizontale; car le centre de gravité du système serait alors situé dans la verticale du point C . Par conséquent, pour connaître quand deux poids seraient égaux, il suffirait de les placer dans les deux plateaux de la balance, et de voir si l'équilibre ne serait point troublé, c'est-à-dire, si le fléau LL' reviendrait à une situation horizontale comme auparavant.

Mais, pour que cette observation soit possible, il y a dans la construction de la balance une condition essentielle à observer, c'est que le point de suspension C se trouve un peu au-dessus du centre de gravité G . Car si cette condition est remplie, lorsque le fléau aura été tant soit peu écarté de l'horizontalité, il tendra à y revenir par une suite d'oscillations; mais si le contraire avait lieu, et si le centre de gravité G se trouvait au-dessus du point de suspension, une fois qu'il serait dérangé le moins du monde de la verticale

du point C, rien ne pourrait plus l'y ramener, et le fléau tomberait indéfiniment du côté où l'emporterait la pesanteur. Or, cette mobilité indéfinie empêcherait d'obtenir jamais l'équilibre; car on ne peut espérer d'établir l'égalité des poids d'une manière tout-à-fait rigoureuse, mais seulement approchée, et telle que les erreurs qui peuvent y rester soient assez petites pour pouvoir être considérées comme nulles dans la comparaison des poids qu'on veut établir, et dans les conséquences qu'on en peut tirer.

En s'astreignant donc à la condition précédente, et supposant d'ailleurs une égalité parfaite entre toutes les parties de la balance situées de part et d'autre du centre de suspension, on aurait une balance parfaite. Mais cette égalité est une chimère. Quelque soin que l'on prenne pour l'établir dans la construction de la balance, on ne l'obtiendra jamais: il faut donc savoir s'en passer, et heureusement on peut, sans nuire en rien à l'exactitude, y suppléer par la méthode que nous allons exposer.

Peser un corps, c'est déterminer combien de fois le poids de ce corps contient une autre espèce de poids connue, par exemple, de grammes et de fractions de grammes. Pour le savoir, commencez par placer ce corps que j'appellerai M, dans un des plateaux de la balance, par exemple, dans le plateau A; puis faites-lui équilibre, en plaçant dans l'autre plateau A' des corps pesans quelconques; par exemple, des morceaux de cuivre, des grains de plomb, et enfin de petites feuilles de cuivre battu ou de petits morceaux de papier que vous ajouterez par parcelles, jusqu'à ce que l'aiguille SO soit parfaitement verticale, et vous indique ainsi l'horizontalité du fléau LL'. Cela fait, ôtez doucement le poids M, et substituez à sa place des grammes et des fractions de grammes, jusqu'à ce que l'aiguille SO soit redevenue verticale: la quantité qu'il faudra mettre de ces poids exprimera précisément le poids du corps M, puisque ces nouveaux poids, étant placés dans les mêmes circonstances que le corps M, font, de même que lui, équilibre au plateau A', chargé des corps que vous y avez placés.

On voit que cette méthode est indépendante de la longueur des bras de levier CL , CL' , ainsi que de l'inégalité de poids qui peut exister entre eux. Pour être parfaitement exacte, elle exige seulement deux conditions.

La première, c'est que les points de suspension L, L' soient bien rigoureusement les mêmes dans les deux opérations. En effet, la puissance d'un même poids, pour faire tourner le fléau, est inégale suivant qu'on le place à des distances diverses du centre de rotation C ; si donc le point de suspension du plateau A pouvait varier dans les deux pesées consécutives, il s'ensuit que, dans la seconde, il faudra employer réellement un poids différent de celui du corps M , pour faire équilibre au plateau A' , et aux poids dont on l'a chargé; et comme aucun indice n'avertirait de cette inégalité, il s'ensuivrait que l'on pourrait ainsi tomber dans de graves erreurs. Aussi l'artiste doit-il employer tous ses soins pour établir et assurer la constance des points de suspension L, L' . Le meilleur moyen d'y parvenir, c'est que cette suspension se fasse aussi par des couteaux d'acier croisés, à tranchant vif, comme le représente la *fig.* 12; car alors les points LL' étant déterminés par le croisement de deux de ces couteaux suspendus l'un à l'autre sur leur tranchant, ils sont aussi fixes, aussi invariables que l'on puisse le désirer, sur-tout quand on ramène toujours le fléau à la position horizontale. C'est ainsi que sont disposées les excellentes balances de Fortin.

La seconde condition à remplir, c'est que la balance soit très-sensible, c'est-à-dire, que, lorsqu'elle est en équilibre et chargée, le moindre petit poids mis dans un des plateaux ou dans l'autre suffise pour déranger cet équilibre et faire mouvoir l'aiguille SO . Cette sensibilité dépend uniquement de la suspension C ; elle sera d'autant plus parfaite qu'il y aura moins de frottement dans ce point, entre le couteau C et le plan qui le porte: car le frottement qui résulte de la superposition de deux corps est une force qui s'exerce dans la direction de leurs surfaces, et qui s'oppose aux autres forces qui tendraient à détacher ces surfaces l'une de l'autre; ainsi le frot-

tement du couteau C, sur son support, doit s'opposer à ce que le fléau LL' tourné autour du point C. En effet, cette rotation ne peut avoir lieu sans détacher l'une de l'autre les parties du couteau et du support qui se touchent. Il faut une force pour détruire leur adhésion, et par conséquent l'aiguille ne deviendra mobile que lorsque l'on aura ajouté dans l'un des plateaux ou dans l'autre, l'excès de poids nécessaire pour la surmonter.

C'est afin de diminuer cette inertie que l'on fait le couteau à tranchant vif, et qu'on lui donne, ainsi qu'au plan qui le porte, le poli le plus parfait. Pour que ces pièces ne s'altèrent point en pressant continuellement l'une sur l'autre, on dispose sous les bras du fléau deux fourchettes FF', qui, dans les intervalles des expériences, le saisissent et le soutiennent dans une position horizontale, sans le soulever. Ces fourchettes sont mobiles, au moyen d'une manivelle représentée par N dans la figure. Quand on veut se servir de la balance, on les abaisse; le fléau devient libre, et les branches se mettent en mouvement: cesse-t-on d'observer, on relève les fourchettes, le fléau LL' est ramené à l'horizontalité et au repos. Enfin, pour éviter les mouvemens accidentels produits par les agitations de l'air, on enferme tout l'instrument dans une cage vitrée, où l'on pratique seulement les ouvertures nécessaires pour placer les poids et les corps que l'on veut peser; il est utile de placer dans cette caisse une capsule remplie de chaux vive, de muriate de chaux, ou de quelque autre sorte de sel propre à attirer l'humidité de l'air, et que l'on a soin de renouveler de temps en temps; par ce moyen, l'intérieur de l'instrument est toujours sec, et les pièces d'acier qui le composent ne se rouillent pas.

On voit aussi que, pour diminuer son volume, il convient que l'aiguille soit dirigée de haut en bas, comme nous l'avons représenté dans la *fig.* 11. Cette disposition a encore l'avantage de rendre l'observation de ses mouvemens plus facile. Pour les apprécier exactement, on trace sur le pied de l'instrument, et perpendiculairement à la colonne qui le porte, une division horizontale de parties égales, au-des-

sus de laquelle l'extrémité inférieure de l'aiguille oscille quand elle est prête à se mettre en équilibre ; car cet équilibre ne s'établit qu'après une longue suite d'oscillations très-lentes. Le zéro de la division doit être placé dans la verticale du point C, et l'on juge que la balance est en équilibre ou va arriver à l'équilibre lorsque les oscillations de l'aiguille sont extrêmement petites, et s'étendent, de part et d'autre, à distances égales du zéro de la division. Il n'est pas même nécessaire alors d'attendre que le mouvement d'oscillation de la balance ait cessé entièrement ; il suffit, dans la seconde pesée, de ramener l'oscillation entre les mêmes termes. Il faut aussi prendre une précaution toute particulière pour ne pas donner de secousse à l'instrument, quand on ôte le corps M de son plateau, pour le remplacer par des poids équivalens ; car une pareille secousse pourrait changer le mode de contact du couteau C sur son support, et par conséquent aussi le frottement des deux pièces l'une sur l'autre, d'où résulterait un changement dans les excès de poids nécessaires pour vaincre le frottement ; au lieu que, s'il reste le même dans les deux pesées successives, son effet n'empêche pas ces deux pesées d'être exactement comparables, et par conséquent la masse des poids qui remplace le corps M est encore exactement égale à la masse même de ce corps.

Pour passer ainsi avec sûreté d'une pesée à l'autre, il faut, lorsque la première pesée est faite, élever doucement les deux fourchettes, afin de ramener le fléau à son repos sans le décharger ; puis, avant d'ôter le corps M, on ajoute dans le plateau où il se trouve, ou mieux encore dans un second plateau auxiliaire *a*, un autre corps quelconque dont le poids soit à-peu-près la moitié du sien. Cela fait, on ôte le corps M ; on le remplace approximativement par le nombre de grammes que l'on présume devoir lui être à-peu-près égal ; on ôte alors le corps étranger que l'on avait ajouté, et qui avait seulement servi pour maintenir le même contact du couteau sur son support et conserver l'inertie du fléau. Alors on abaisse les fourchettes, le fléau redevient libre avec le même degré de mobilité que la première fois ; et toutes les circonstances étant

redeviennent semblables à celles de la dernière pesée, on achève l'équilibre de la même manière.

L'artiste qui construit la balance a soin que le plan de la division parcourue par l'aiguille soit exactement parallèle au plan de suspension du couteau. Alors, pour rendre ce dernier horizontal, lorsque l'on monte la balance, il suffit de rendre horizontale la plaque sur laquelle la division est tracée. Pour cela, on se sert d'un niveau à bulle d'air, que l'on pose sur cette division, et l'on cale la table qui porte la balance, jusqu'à ce que ce niveau indique l'horizontalité. Il faut même que l'horizontalité ait lieu dans tous les sens, afin que le plan qui porte le couteau ne se renverse point en avant ou en arrière, mais soit aussi horizontal. Quand ces conditions sont remplies, la balance a toute sa sensibilité, elle est en état d'agir; et, chaque fois qu'on atteint l'équilibre, les oscillations de l'aiguille sont lentes, régulières, et s'étendent à des amplitudes égales de part et d'autre du zéro de la division. Les balances de ce genre, construites par M. Fortin, sont tellement sensibles, que, chargées, dans chaque plateau, de mille grammes, un seul milligramme suffit pour les faire trébucher.

J'ai dû entrer dans tous ces détails, parce que la détermination précise des poids est un des élémens les plus importants de la physique, et qu'on est sans cesse obligé d'y recourir. La méthode des doubles pesées que je viens d'exposer, est due à Borda. Elle est facile et sûre; c'est la seule qui, dans la pratique, soit réellement indépendante de l'inégalité des bras de la balance et de l'effet du frottement. En l'employant avec les précautions que nous avons expliquées, on obtiendra, aussi exactement qu'il est possible, les poids des corps au moment où on les aura soumis à cette opération. Mais, en répétant l'expérience sur le même corps, à différentes époques, on y trouvera quelques différences, sur-tout si son volume est considérable et son poids faible. Cela vient de ce que les pesées sont faites dans l'air, qui est un fluide pesant, comme nous le prouverons bientôt. Nous avons reconnu dans le premier livre que les corps plongés dans un fluide y perdent une partie de leur poids égale à celui du volume de fluide qu'ils

déplacent. Ainsi, lorsque nous pesons des corps dans l'air, ce n'est réellement pas leur poids absolu que nous observons, mais l'excès de leur poids sur celui d'un pareil volume d'air. Or, nous prouverons également par l'expérience que l'air pris à la surface de la terre n'a pas toujours le même poids sous le même volume, parce qu'une infinité de causes accidentelles le dilatent ou le condensent. Ces variations doivent donc changer la perte de poids des corps que l'on y pèse; par conséquent, pour avoir le vrai poids de ces corps, il faut y ajouter le poids variable du volume d'air qu'ils déplacent, afin de les réduire au même cas que si on les eût pesés dans un espace entièrement vide d'air et de toute autre matière pesante. C'est en effet ce que nous ferons par la suite; mais, pour y parvenir, il nous faut acquérir un assez grand nombre de connaissances expérimentales qui nous manquent encore. J'ai voulu seulement indiquer ici, d'après l'expérience, la nécessité de ces réductions pour avoir les poids constans et absolus des corps; nous apprendrons plus loin, et toujours par l'expérience, comment on peut les effectuer.

CHAPITRE III.

De la construction du Thermomètre, et de la manière de s'en servir.

Dès que l'on commence à porter son attention sur l'ensemble des phénomènes physiques et chimiques, on voit que l'agent le plus puissant, le plus actif et le plus généralement employé dans la nature et dans les arts, c'est le feu. Nous sentons à chaque instant les effets qu'il produit sur nos organes, soit lorsqu'il les brûle par une trop grande ardeur, soit lorsqu'il les réchauffe doucement dans les rigueurs de l'hiver. Il échauffe toutes les substances; et, s'il ne les embrase, il les fond, les rend liquides, les fait rougir, bouillir, et les convertit en vapeurs. Même lorsqu'il semble agir avec moins d'énergie, il étend les dimensions des corps, il change leur volume et les

modifie sans cesse dans leurs propriétés les plus cachées. Pour pouvoir observer ces propriétés d'une manière comparable dans différens corps, ou dans le même corps à des époques différentes, il faut nous prémunir contre cette cause perpétuelle de variation; et, puisque nous ne pouvons l'empêcher d'agir, il faut au moins trouver quelque manière de fixer l'état précis où elle met chaque corps à l'instant où nous l'observons.

Mais d'abord, réduisons cette cause à son expression la plus abstraite. Quoique le mot de feu entraîne communément avec lui l'idée de flamme et de lumière, on peut aisément reconnaître que tous les phénomènes dont nous venons de parler peuvent être produits sans le concours de ces deux circonstances. Car si j'ai fait fondre du plomb dans un vase de fer par le moyen du feu, ce plomb, qui ne sera point enflammé et qui ne jettera pas de lumière, deviendra capable à son tour d'échauffer d'autres corps; il fera fondre la glace, le soufre et l'étain; il enflammera la cire, il fera bouillir l'eau et tous les autres liquides, il les convertira en vapeur. Puisqu'il agit ainsi, sur ces corps, sans flamme ni lumière, nous pouvons par la pensée séparer ces deux modifications du principe, quel qu'il soit, qui produit tous ces effets; et, pour fixer invariablement cette séparation, pour désigner isolément ce principe, nous lui donnerons un nom particulier, nous l'appellerons le *calorique*.

Cette distinction simple et naturelle nous conduit à voir que le mot *chaleur*, dans lequel on enferme ordinairement l'idée vague d'une cause, n'exprime réellement que la sensation que le calorique produit sur nos organes, et, par extension, celle qu'il pourrait produire sur des organes plus résistans, ou même sur des corps non organisés. Désormais nous emploierons toujours le mot *chaleur* dans cette seule acception, pour exprimer généralement le mode d'action particulier au calorique.

Mais la sensation de la chaleur, lorsque nous l'éprouvons, n'a pas toujours la même énergie; il y a des degrés entre la douce chaleur que nous ressentons dans un bain et celle qui

nous brûle lorsque nous touchons un fer rouge. La chaleur qu'excite un seul charbon embrasé suffit pour enflammer le soufre; elle ne suffit plus pour fondre le cuivre ou l'argent. Afin de définir les différentes énergies du calorique dans ces diverses circonstances, nous leur donnerons le nom de *températures*; et nous appellerons températures plus ou moins chaudes celles qui produiront ou qui seront capables de produire, sur nous ou sur les autres corps, des sensations plus ou moins vives de chaleur. Nous ne voulons par-là qu'exprimer l'*inégalité* de ces sensations et de leurs effets, non la mesurer, ni la fixer; encore moins prétendons-nous en tirer quelque induction sur la manière dont elles dépendent du calorique qui les produit. Toutes ces choses ne peuvent se déterminer sûrement que par des mesures précises que nous chercherons plus tard; mais auparavant il fallait au moins concevoir le besoin de les chercher.

Il arrive souvent, dans les sciences, que ceux qui introduisent une expression nouvelle pour exprimer la cause inconnue d'un phénomène, se laissent ensuite entraîner à détourner cette définition de son sens abstrait pour la réaliser et lui donner un corps; cela est arrivé, par exemple, pour le calorique. La plus grande partie des physiciens et des chimistes regardent le calorique comme une matière à laquelle ils attribuent plusieurs propriétés analogues à celles que les autres substances matérielles possèdent, telles que l'élasticité, la compressibilité et la faculté d'entrer en combinaison avec d'autres corps. Ces propriétés matérielles, ils les lui supposent par analogie; car, comme on ne peut voir le calorique ni le peser, ils sont obligés, tout en le regardant comme une matière, de le dépouiller, au moins pour nos sens, des propriétés les plus apparentes par lesquelles nous puissions nous assurer de l'existence matérielle des corps; je veux dire l'impénétrabilité et la pesanteur. Nous examinerons plus tard, par l'expérience, la probabilité de cette hypothèse; mais nous ne pouvons le faire avec philosophie qu'après avoir établi, par l'expérience, les lois physiques auxquelles les effets observables du calorique sont assujettis. Jusqu'à cette époque, nous nous en tiendrons

scrupuleusement au sens abstrait des dénominations que nous avons adoptées. Le calorique ne sera pour nous que la cause inconnue de la sensation de la chaleur, et le mot de température n'exprimera que les diverses énergies de son action sensible.

Nous nous trouvons ainsi arrêtés toutes les fois que nous voulons remonter aux causes premières des phénomènes; la fin de notre science est de reculer le doute, et de le faire porter sur les seuls objets que notre raison ne peut, ou n'a pas encore pu atteindre. L'art des expériences consiste à découvrir dans les phénomènes ceux qui sont les plus généraux, les plus influens. Ces faits bien constatés, exactement reconnus, servent ensuite de principes pour arriver aux autres faits comme conséquences. Alors nos incertitudes ne portent plus sur les phénomènes généraux ni sur leur combinaison, les seules choses qui nous soient réellement utiles; elles portent uniquement sur la cause première d'un petit nombre de faits; et, si elles sont inévitables, elles sont du moins réduites à leurs justes bornes. Nous voyons les phénomènes se succéder, comme les générations des hommes, dans un ordre que nous observons, mais sans pouvoir dire, ou même concevoir, comment il a commencé. Nous suivons les anneaux d'une chaîne infinie; nous pouvons bien, en ne la quittant pas, remonter d'un anneau à un autre; mais le point où la chaîne est suspendue n'est pas à la portée de nos faibles mains.

Pour découvrir et fixer les rapports naturels des phénomènes entre eux, il ne suffit pas de les observer vaguement, et de les envelopper dans des hypothèses toujours vacillantes et incertaines; il faut déterminer d'une manière précise la nature et l'étendue de leurs effets, afin de n'avoir à combiner dans nos raisonnemens que des données rigoureuses; en un mot, il faut les mesurer. Mesurer et peser, voilà les deux grands secrets de la chimie et de la physique; ce sont là les causes de toutes les découvertes que ces deux sciences ont faites dans ces derniers temps.

Or, pour fixer par des mesures précises les divers degrés d'action du calorique, choisissons-nous les effets dévorans et destructifs qu'il exerce sur presque tous les corps de la na-

ture ? Non , sans doute , puisque l'altération même qui en résulte dans la constitution de ces corps exclurait toute idée de comparaison. Trouverons-nous des termes plus fixes dans les sensations variables de chaleur et de froid que nous éprouvons ? Pas davantage. Il ne faut pas avoir beaucoup réfléchi sur la nature de nos sensations, pour s'apercevoir que les indications qu'elles nous donnent sont purement relatives. La quantité de lumière qui suffit pour nous faire discerner les objets dans une salle de spectacle où nous sommes restés quelque temps, nous semble une obscurité complète quand nos yeux viennent d'être frappés par le vif éclat du jour. Le même temps de dégel, qui nous paraît d'une douceur étonnante lorsqu'il survient tout-à-coup au milieu des rigueurs de l'hiver, nous semblerait un froid insupportable si nous l'éprouvions subitement au milieu des grandes chaleurs de l'été. C'est par cette raison que la température des souterrains nous semble froide en été et chaude en hiver, quoique, dans la réalité, elle reste constamment la même, comme nous le prouverons par la suite. On conçoit donc, par ces exemples, que les divers degrés d'intensité de nos sensations ne peuvent nous fournir une mesure constante des causes qui les produisent, puisque l'idée que nous avons de cette intensité n'est jamais que relative, et que le seul fait qu'elle constate est une succession d'inégalités, sans aucune appréciation absolue.

Nous sommes ainsi conduits à chercher parmi les phénomènes, dont le calorique est la cause, ceux qui, s'exerçant sur des substances inorganiques, les modifient momentanément d'une manière reconnaissable, sans néanmoins altérer leur nature ni leur constitution intime ; de sorte que la cause étant ôtée, les corps reprennent exactement leur premier état, quel que soit le nombre de ces variations passagères auxquelles on les ait exposés. Or, il existe un phénomène dont le calorique est la cause principale, et qui remplit parfaitement toutes ces conditions ; c'est celui que l'on appelle la dilatation et la contraction des corps.

C'est un fait général et facile à constater, que tous les corps que l'on chauffe, sans changer leur constitution, s'é-

tendent dans tous les sens , de manière à occuper un volume plus considérable que celui qu'ils occupaient d'abord. Cette modification des corps se nomme *dilatation* ; et lorsqu'un corps l'éprouve, on dit qu'il se *dilate*. Tous les corps, quelle que soit leur nature, sont susceptibles d'éprouver cet effet.

La dilatation des corps solides, particulièrement des métaux, est fort petite tant qu'ils sont encore éloignés de l'état où ils se fondent ; cependant les effets en deviennent sensibles dans une infinité d'expériences journalières. Dans les grandes conduites d'eau, où l'on emploie des tuyaux de fonte métallique attachés ensemble par des vis de fer, la différence de la chaleur de l'hiver à l'été fait tellement varier les dimensions de cette longue barre métallique, que l'on est obligé de placer, de distance en distance, des tuyaux construits de manière à pouvoir glisser les uns dans les autres, pour se prêter aux effets de ces dilatations et contractions alternatives ; sans quoi la colonne se romprait infailliblement. Les appareils de ce genre se nomment des compensateurs. On est aussi obligé d'en mettre dans les constructions des ponts en fer. C'est encore la dilatation des métaux qui fait que les verges des pendules s'allongent dans l'été et se raccourcissent dans l'hiver, de manière à faire tantôt retarder, tantôt avancer leur mouvement, que l'on est obligé, par cette raison, de corriger dans ces deux extrêmes, à moins qu'on n'ait prévenu l'effet de ces variations par un procédé que nous ferons connaître plus loin.

Les dilatations des liquides sont beaucoup plus considérables que celles des corps solides, dans les mêmes circonstances. Un vase, fût-il formé du métal le plus solide, étant rempli d'eau et bien bouché, s'il est exposé ensuite à une forte chaleur, de manière que l'eau ne puisse s'en échapper par aucun interstice, crevera infailliblement avec une grande explosion : ce qui prouve que l'eau renfermée se dilate plus que la matière du vase. Mais, pour observer ces effets d'une manière plus facile et moins dangereuse, prenez une fiole de verre mince, dont le corps soit large et le col étroit : remplissez-la entièrement ou presque entièrement d'eau, ou de tout autre liquide ;

puis approchez-la graduellement du feu : vous verrez bientôt la liqueur se dilater, s'élever dans le col du flacon, le remplir entièrement, et se renverser par-dessus les bords long-temps avant de bouillir. Plus le col est étroit par rapport à la capacité de la fiole, plus l'expérience est prompte et l'effet sensible ; aussi rien ne convient mieux, pour ces expériences, qu'une boule de verre, soufflée à l'extrémité d'un tube dont l'intérieur est très-étroit. Alors, quand on observe avec attention, on remarque avec surprise que, dans le premier moment de l'action du calorique, la liqueur descend dans le tube au lieu de monter. Cela vient de ce que la substance du verre, éprouvant la première la chaleur, se dilate aussi la première, et avant que le liquide ait encore éprouvé la même influence ; mais la chaleur continuant de pénétrer tout l'appareil, le liquide commence bientôt à se dilater, et ne tarde pas à l'emporter sur le verre, par l'excès de sa dilatation.

On peut rendre également sensibles les effets de la dilatation et de la contraction, dans les substances aériformes, c'est-à-dire, dont la constitution est analogue à celle de l'air et des vapeurs. Par exemple, c'est la force élastique de la vapeur de l'eau qui soulève les pistons des pompes à feu. Mais, pour nous borner à des expériences usuelles, tout le monde a éprouvé combien il est quelquefois difficile d'introduire un liquide dans un flacon dont le col est extrêmement étroit, comme le sont, par exemple, ceux des flacons à essence : cela vient de la résistance de l'air intérieur qui, trouvant l'orifice étroit du tube bouché par la petite colonne de liquide qu'on y a introduite, s'oppose invinciblement à son passage. Mais voulez-vous éluder cet obstacle ? chauffez le flacon ; l'air qu'il contient, en s'échauffant aussi, se dilatera plus que le verre ; le volume du flacon ne suffira plus pour le contenir : il en sortira donc une partie ; alors renversez le flacon dans le liquide que vous voulez y introduire, et attendez quelques instans ; l'air resté dans le flacon se refroidira, se contractera, et fera place au liquide qui s'y introduira pour occuper la place vide, obéissant en cela à la pression que l'air extérieur exerce sur tous les corps, comme nous le prouverons bientôt.

En mesurant avec soin les dimensions des corps, après les avoir exposés à diverses températures, on trouve généralement que, si le feu n'a point altéré leur constitution ou leur nature, ils reviennent exactement aux mêmes dimensions qu'ils avaient d'abord, quel que soit le nombre de fois qu'on les expose à ces changemens alternatifs. Cette propriété s'observe, par exemple, dans les métaux, quand on ne les échauffe pas jusqu'à les fondre; dans les liquides, quand on ne les échauffe pas jusqu'à les faire bouillir (1). On trouve, à la vérité, que l'argile et quelques autres substances semblent, au contraire, se contracter quand on les expose au feu après les avoir imbibées d'eau : mais alors elles ne reviennent plus à leurs premières dimensions par le refroidissement; ce qui montre que leur contraction est l'effet du desséchement qu'elles éprouvent, ou d'une combinaison plus intime de leurs élémens, et non pas un effet passager de la chaleur. Ce phénomène se nomme le retrait; on est obligé d'y avoir égard dans la construction des vases de terre et de porcelaine, sans quoi ils n'auraient pas, en sortant du fourneau, la forme qu'on veut leur donner; mais on voit, d'après sa cause, qu'il ne fait point une exception aux lois générales de la dilatation des corps.

Cette propriété, que tous les corps possèdent, de se dilater par l'effet de la chaleur, et de revenir aux mêmes dimensions quand on les ramène aux mêmes circonstances, offre un moyen très-simple et très-exact pour mesurer des degrés égaux et inégaux de chaleur. On l'a employée de la manière la plus heureuse dans la construction des instrumens que l'on appelle des thermomètres, c'est-à-dire, *mesureurs de la chaleur*. Tout le monde les connaît et en fait usage; mais on ne connaît pas aussi généralement les principes sur lesquels

(1) Pour reconnaître cette propriété dans les liquides, il faut les observer dans des tubes fermés de toutes parts, afin que la chaleur n'enlève pas une portion de leur substance en la réduisant en vapeur. Avec cette précaution, on trouve que, s'ils ne changent pas de constitution intime, c'est-à-dire, s'ils continuent de former la même substance qu'ils formaient d'abord, ils reviennent exactement aux mêmes dimensions quand la température redevient la même.

ils sont fondés, et qui garantissent la certitude de leurs indications.

A la rigueur, tous les corps pourraient être employés à cet usage, puisque tous, comme nous venons de le voir, sont sensibles aux variations de la chaleur; mais, pour rendre l'instrument exact et commode, il y a un choix à faire entre eux. Si nous employons un corps solide, par exemple, une barre métallique, ses dilatations et ses contractions seront trop petites pour pouvoir être facilement observées. Si nous voulons les apercevoir, il faudra les agrandir par des rouages et des leviers qui en rendront l'observation très-minutieuse, et même souvent inexacte. Si au contraire nous employons, pour construire notre thermomètre, une substance aériforme, par exemple, l'air ou quelque autre gaz, les dilatations et les contractions seront tellement considérables, qu'il deviendra très-incommode de les mesurer, quand les variations de la chaleur auront quelque étendue. Les variations de volume des liquides, plus grandes que celles des corps solides, et moindres que celles des gaz, offrent un moyen terme exempt de ces inconvéniens opposés, et par conséquent nous sommes conduits à chercher notre thermomètre dans cette classe intermédiaire de corps.

Il en est un parmi eux que ses qualités physiques et chimiques rendent éminemment propre à cet usage; c'est celui que l'on nomme *mercure* ou *vif-argent*, parce qu'en effet il ressemble à de l'argent qui serait rendu coulant par la chaleur. Le mercure supporte, avant de bouillir et de se réduire en vapeur, plus de chaleur que tous les autres fluides, excepté certaines huiles; et l'on peut aussi, sans qu'il se gèle, l'exposer à des degrés de froid qui solidifieraient tous les autres liquides, excepté certaines liqueurs spiritueuses, comme l'esprit-de-vin ou l'éther. En outre, le mercure a l'avantage d'être plus sensible que tout autre liquide à l'action de la chaleur; et enfin les variations de son volume, dans l'étendue des phénomènes qu'il est le plus ordinaire d'observer, sont, comme nous le verrons par la suite, parfaitement régulières et proportionnelles à celles que les so-

lides et les gaz éprouvent dans des circonstances semblables. Toutes ces propriétés doivent nous porter à nous servir du mercure dans la construction de nos thermomètres, préférablement à tout autre corps.

Mais, pour que tous les thermomètres à mercure aient une marche semblable, et soient comparables les uns aux autres, dans tous les pays du monde, on conçoit qu'il faut que la substance employée soit constamment la même, et qu'elle ait des propriétés constamment semblables. On y parvient en employant le mercure dans son plus grand état de pureté. Le mercure pur est un véritable métal liquide, qui pèse environ treize fois et demi autant que l'eau à volume égal. On ne le trouve presque jamais à cet état de pureté dans le commerce; il tient ordinairement en dissolution quelques parties d'argent, de plomb, d'étain, ou de cuivre, métaux avec lesquels il se combine facilement. Pour le purifier, il faut d'abord le dégager de la terre, des pierres et des autres substances qui peuvent s'y trouver grossièrement mêlées. Pour cela, il suffit de le renfermer dans un morceau de peau de chamois, d'en former pour ainsi dire un nouet, et de le serrer fortement entre les doigts. Le mercure pressé s'échappe à travers les pores imperceptibles de la peau, et se tamise en une fine pluie argentée, abandonnant dans cette opération tout ce qui n'était que mélangé, et non pas combiné avec sa substance.

Pour séparer maintenant les métaux qui peuvent être alliés avec lui, on profite de ce que ces métaux sont à peine vaporisables par les plus grands feux que nous puissions produire, tandis que le mercure bout et se réduit en vapeurs à un degré de chaleur qui n'est pas très-considérable. On chauffe l'alliage dans des vases fermés, disposés de manière à pouvoir condenser par le refroidissement les vapeurs qui s'y forment, et à recueillir le liquide qui en résulte. La chaleur volatilise le mercure, sans pouvoir vaporiser les métaux qui étaient combinés avec lui: il se fait donc une séparation; les métaux restent fixés au fond de l'appareil, et le mercure pur se retrouve dans le réfrigérant.

Lorsqu'on veut appliquer ce procédé à de petites quantités,

telles que celles dont on a ordinairement besoin dans les usages de la chimie et de la physique, on place le mercure impur dans une petite cornue de verre ou de porcelaine, et l'on reçoit les vapeurs dans un ballon de verre que l'on fait communiquer à la cornue, au moyen d'un tuyau de verre que l'on appelle une allonge. On lute (1) ce tuyau au col de la cornue par un bout, à celui du ballon par l'autre, et l'appareil se trouve complètement fermé. On allume sous la cornue un feu de charbon d'abord très-faible, dont on accroît graduellement l'activité, et l'on plonge, au contraire, le ballon dans de l'eau froide ou dans de la glace pilée, afin de condenser, par le refroidissement, les vapeurs qui se forment. On conçoit que l'allonge est nécessaire pour éloigner la cornue que l'on chauffe, du ballon que l'on refroidit. Il est bon qu'elle soit en verre ou en porcelaine, substances qui transmettent difficilement la chaleur; et de plus, il est utile que sa direction s'abaisse en allant de la cornue au ballon, afin que les vapeurs qui s'y condensent puissent s'écouler plus facilement, sans retomber dans la cornue, où il faudrait les vaporiser de nouveau.

Lorsqu'on a ainsi obtenu le mercure bien pur, il faut l'enfermer dans un appareil qui rende ses dilatations et ses contractions sensibles, et qui permette de les observer facilement. Pour cela on souffle à la lampe d'émailleur une boule de verre creuse à l'extrémité d'un tube de verre très-fin. On remplit de mercure la boule et une partie du tube, par un procédé que j'indiquerai tout-à-l'heure. Comme, d'après cette disposition, la capacité de la boule est très-considérable, relativement au diamètre intérieur du tube, on conçoit qu'une très-petite dilatation, dans le volume du mercure qu'elle renferme, se manifeste dans le tube par un allongement consi-

(1) On appelle *lut*, en chimie, une composition pâteuse qui s'applique aux ouvertures des appareils pour les boucher. Il y en a de diverses espèces appropriées aux différentes circonstances de froid, de chaleur ou d'humidité que les appareils doivent subir. Leur composition et leur emploi sont expliqués dans le quatrième volume du *Traité de chimie* de M. Thenard.

dérable de la colonne fluide. On peut ainsi rendre sensibles de très-petites variations de chaleur; mais l'exécution de cette idée très-simple exige diverses attentions.

D'abord il faut souffler la boule : pour cela on fond l'extrémité du tube à la lampe d'émailleur, on l'arrondit en bouton en la pétrissant, avec l'extrémité d'une petite tige de cuivre ou de fer que l'on plonge aussi dans la flamme pour la tenir chaude; après quoi, en soufflant avec la bouche par l'extrémité ouverte du tube, on étend en boule sphérique cette partie fondue. Mais la dernière partie de l'opération a l'inconvénient d'introduire dans le tube de l'humidité qu'on a ensuite bien de la peine à en faire sortir. D'ailleurs il serait très-difficile de souffler ainsi une boule à l'extrémité d'un tube très-étroit. Au lieu de cela, introduisez l'extrémité ouverte du tube dans le col d'une petite bouteille de caoutchouc ou gomme élastique, et liez bien ce col autour d'elle, de manière qu'il l'enveloppe et la serre exactement. Puis, quand l'autre extrémité du tube sera fondue, et son bouton formé et bien arrondi, redressez le tube verticalement, la partie froide restant en haut, et pressez avec la main la bouteille de caoutchouc. L'air sec qu'elle contient fera l'effet du souffle; il forcera le bouton de s'étendre, et l'arrondira en boule sans aucun des inconvéniens dont nous avons parlé. Seulement, pour que cette boule conserve sa forme, il faut maintenir la pression jusqu'à ce que le verre soit durci par le refroidissement.

Maintenant, pour que le thermomètre soit toujours semblable à lui-même et constant dans ses indications, il faut que le tube soit d'un calibre égal dans toute sa longueur, afin que des dilatations égales dans le mercure de la boule soient marquées par des accroissemens égaux dans la hauteur de la colonne. Quand on veut avoir un bon thermomètre, on choisit parmi un grand nombre de tubes de verre ceux qui approchent le plus de cette égalité. Pour les éprouver, on y introduit une goutte de mercure, qui s'allonge en un cylindre, dont on mesure la longueur. On promène ce cylindre dans les différentes parties de tube; et, comme son volume reste tou-

jours le même, il doit, si le tube est par-tout d'égal diamètre, occuper partout une égale longueur. On ne trouve pas aisément des tubes qui satisfassent à cette condition, et il est même presque impossible qu'ils la remplissent avec toute rigueur. C'est pourquoi, lorsqu'on aspire à la dernière exactitude, il faut corriger les petites inégalités qu'ils peuvent offrir, en les divisant en portions d'égal volume. Cela se fait à l'aide d'un procédé imaginé par M. Gay-Lussac, et que j'ai exposé dans le *Traité général*.

Il y a aussi quelques précautions à prendre pour faire entrer le mercure dans la boule du thermomètre. Comme le tube par lequel on doit l'y introduire est ordinairement très-étroit, on éprouve ici l'espèce de difficulté dont j'ai parlé précédemment, et qui est causée par la résistance de l'air intérieur; mais on l'évite par le moyen que j'ai indiqué. On chauffe la boule de verre; l'air qu'elle contient se dilate, s'échappe; on profite de cet instant pour plonger l'orifice ouvert du tube dans le mercure qu'on veut y introduire, et ensuite, lorsque la boule se refroidit, la pression de l'air extérieur l'y fait monter. Il est bon de chauffer aussi très-fortement le tube avant d'y introduire le mercure, afin de vaporiser l'eau qu'on a pu y introduire en soufflant la boule, si on la fait avec la bouche, et aussi pour chasser la petite couche d'air et d'humidité qui s'attache toujours au verre dans l'état ordinaire de l'air. Même, dans cette opération, il faut commencer par chauffer le tube seul, et non la boule; puis, quand il est très-chaud, on le redresse, on chauffe subitement la boule à son tour, et l'air qu'elle renferme se dilatant avec rapidité, chasse devant lui toutes les petites impuretés que le tube pourrait contenir, et qui auraient gêné le mouvement du mercure le long de ses parois.

En opérant comme nous venons de le dire, il arrive parfois que l'on ne fait pas entrer du premier coup dans l'appareil autant de mercure qu'il en faut pour remplir la boule et une partie du tube. Alors on recommence l'opération, en chauffant de nouveau la boule et le mercure qu'elle contient. Quand elle est fortement échauffée, on plonge de même dans

un bain de mercure l'orifice du tube qui est resté ouvert ; et, en répétant cette manœuvre un petit nombre de fois, on parvient à faire entrer dans la boule et dans le tube autant de mercure que l'on veut.

Mais quelle est la quantité qu'il faudra ainsi y introduire ? Cela dépend de l'usage auquel le thermomètre est destiné. Si vous voulez qu'il puisse servir depuis la température de l'eau bouillante jusqu'aux plus grands froids que l'on puisse éprouver dans nos climats, il faut qu'il y ait entre la capacité de la boule et la longueur du tube, certaines proportions que l'expérience apprend aisément à reconnaître. Si l'on a mis trop de mercure, ou si le tube n'est point d'une longueur suffisante, il arrivera qu'à la température de l'eau bouillante le mercure remplira tout le thermomètre, et s'écoulera par son orifice, s'il est ouvert ; ou, s'il est fermé, ira frapper le sommet du tube, et le brisera. Si, au contraire, on n'a pas mis assez de mercure, il arrivera, dans les plus grands froids, qu'il rentrera tout entier dans la boule, et que l'on ne pourra plus observer ses contractions. Quand on essaie, pour la première fois, de faire un thermomètre, ce n'est que par expérience, par exemple, en mettant tour-à-tour l'appareil dans l'eau bouillante et dans la glace, que l'on apprend à reconnaître à-peu-près les quantités de mercure qu'il faut admettre ; mais, quand on connaît les lois de la dilatation du mercure, le calcul donne des moyens directs et sûrs pour éviter ces inconvéniens. C'est ce que l'on peut voir dans le *Traité général*. Ici je me bornerai à supposer qu'on ait réussi, comme je viens de le dire, par des essais.

Ce n'est pas tout encore : quand le mercure est introduit dans le tube et dans la boule, il faut chasser toutes les petites bulles d'air qui ont pu s'entremêler avec lui ; car leurs dilatations, différentes de celle du mercure, et leur compressibilité, altéreraient la régularité des mouvemens observés. Le seul moyen de les exclure complètement et avec certitude, c'est de chauffer la boule jusqu'à faire bouillir le mercure avant que le tube soit fermé. Par ce moyen on chasse infailliblement tout l'air. Mais cette opération chasserait aussi du tube une

partie du mercure que l'on y a fait entrer, et qui est nécessaire pour remplir la boule à des degrés de chaleur moindre. Pour éviter cet inconvénient, il faut que l'extrémité ouverte du tube soit gonflée en forme de petit ballon, comme le montre la *fig.* 14 ; de sorte que le mercure, en se dilatant et sortant du tube par son expansion, ne s'élançe point au-dehors, mais ne fasse que se répandre dans ce réservoir. Quand l'ébullition aura cessé, et que le mercure se contractera sur lui-même, la pression de l'air extérieur suffira seule pour faire rentrer dans le tube tout ce qui en était sorti. Une précaution très-nécessaire dans cette expérience, c'est de présenter le tube au feu, dans une direction un peu inclinée à l'horizon, comme le représente la figure, afin de diminuer la pression que la colonne de mercure contenue dans sa tige exerce sur le mercure de la boule, pression qui s'oppose à l'ébullition.

Cette opération faite, si l'on croit avoir introduit assez de mercure pour les extrêmes de chaleur et de froid auxquels on veut exposer le thermomètre, il faut le fermer hermétiquement, car il ne serait plus comparable à lui-même si une portion de mercure venait à s'en échapper. Il faut même, en le fermant, tâcher d'exclure tout l'air qui pourrait rester dans le tube au-dessus de la colonne, non que cet air puisse s'opposer à la dilatation du mercure, qui se fait avec une force irrésistible, mais de peur qu'en agitant le thermomètre, quelques petites bulles d'air ne s'introduisent dans la colonne et n'en interrompent la continuité ; car alors il serait fort difficile de les faire partir, sur-tout si le tube était très-étroit. Pour chasser entièrement cet air, voici comment on opère. On commence par effiler à la lampe l'extrémité ouverte du tube que l'on avait précédemment gonflée en réservoir ; on chauffe ensuite la boule du thermomètre jusqu'à ce que le mercure, dilaté par la chaleur ; arrive presque à cette extrémité ; quand il y est parvenu, on fond brusquement le bout du tube à la flamme d'une bougie, que l'on allonge en un trait de feu en la soufflant avec un chalumeau de verre. Ce tube se trouve ainsi fermé, et l'air n'y peut plus rentrer, quand le mercure se contracte de nouveau en se refroidissant. Alors on arrondit à la

lampe le bout que l'on vient de sceller, de peur qu'il ne se brise trop facilement.

On peut aisément reconnaître si un thermomètre a été fait avec cette précaution : il suffit de le renverser de manière que la boule vienne en haut. S'il est purgé d'air, et si l'intérieur du tube n'est point d'une finesse extrême, le mercure, que rien ne soutient, tombe librement et remplit tout le tube ; mais si tout l'air n'a point été chassé, la colonne ne tombe point jusqu'au fond du tube, parce que l'air qui s'y trouve résiste, en vertu de sa force élastique, et l'empêche d'y arriver.

Quand on porte des thermomètres en voyage, il arrive souvent que la colonne de mercure se sépare ainsi en plusieurs parties ; et, pour peu qu'il reste de l'air dans le tube, ces diverses parties ne se rejoignent pas facilement. Il faut alors attacher le sommet du tube à une corde longue de un ou deux mètres, et le faire tourner ainsi au bout de cette corde, comme une fronde, aussi rapidement qu'il est possible. La force centrifuge s'exerçant avec plus d'énergie sur le mercure que sur l'air, à cause de l'excès de sa masse, suffit ordinairement pour réunir les colonnes séparées. Il serait mieux de pratiquer un petit renflement au haut du tube ; et, quand il y aurait quelque séparation dans la colonne, on chaufferait fortement la boule du thermomètre jusqu'à faire monter le mercure dans ce renflement ; après quoi, le laissant refroidir avec lenteur, il rentrerait dans le tube en une seule masse continue. Je recommande cette précaution aux praticiens.

Voilà donc notre thermomètre fait ; il faut maintenant l'employer aux expériences.

Supposons d'abord que nous le plongeons dans un vase plein de neige ou de glace fondante, nous verrons aussitôt le mercure du tube descendre et s'arrêter à un certain terme fixe, après lequel il ne variera plus, du moins tant que la neige ou la glace ne sera pas fondue entièrement. Cependant, si l'air extérieur est plus chaud que l'eau qui résulte de cette fusion, il est clair qu'il communique continuellement à celle-ci de la chaleur. Puisque le mercure du thermomètre n'indique

point cette communication, c'est une preuve que cette chaleur ne lui parvient pas. Elle est donc employée toute entière à fondre la glace ou la neige que l'eau contient; et la disparition de la chaleur a lieu ainsi jusqu'à ce que le mélange renfermé dans le vase soit entièrement liquide. Alors, et seulement alors, la chaleur communiquée à l'eau se transmet au thermomètre, et le mercure commence à monter dans le tube.

Nous voyons par-là que la glace ou la neige qui fondent, amènent le volume du mercure à un état constant et déterminé; autant de fois on répétera l'expérience, autant de fois le mercure reviendra à ce volume, et l'extrémité de la colonne comprise dans le tube s'arrêtera au même point. Marquons donc ce point fixe sur le tube de notre thermomètre, il nous indiquera la *température de la glace fondante*.

Si nous plongeons de même notre thermomètre dans d'autres substances plus ou moins chaudes, le mercure qu'il renferme prendra des volumes différens, et nous verrons la colonne comprise dans le tube s'arrêter à autant de points qui seront pour nous la marque d'autant de températures diverses. Nous fixerons pour nous l'idée de chacune de ces températures, en marquant sur notre tube le point qui lui correspond.

Les distances de ces points entre eux seront en général différentes pour chaque thermomètre que l'on construira. Leur position dépendra des rapports de capacité de la boule et du tube, ainsi que de la quantité plus ou moins grande de mercure qu'on y aura introduite. Par conséquent, si l'on se borne à ce que nous avons fait jusqu'à présent, chaque observateur ne pourra retrouver les mêmes températures qu'en se servant du même thermomètre qui les lui aura une fois indiquées. S'il le brise, toutes ses expériences sont perdues; il ne pourra jamais fixer, pour les autres observateurs, les termes dont il a voulu parler. Afin d'éviter cet inconvénient, on cherche dans les expériences mêmes un autre point de température constante différent de la glace fondante; et l'on regarde l'intervalle qui sépare ces deux termes comme l'unité

en parties de laquelle on énonce toutes les dilatations observées. Ce second point fixe, adopté généralement, est la température de l'eau distillée bouillante.

En effet, lorsqu'on plonge le thermomètre dans un vase rempli d'eau bouillante, le mercure monte rapidement jusqu'à un certain terme, et s'y fixe. Quelque chaleur que l'on applique ensuite au vase, et à quelque feu qu'on le pousse, tant que toute l'eau ne sera pas vaporisée, le thermomètre ne variera plus; ici donc, toute la chaleur introduite dans l'eau est employée à la vaporiser, de même que, dans notre première expérience sur la glace fondante, toute la chaleur introduite était employée à fondre la glace. Ce phénomène est général dans la théorie de la chaleur; tous les termes de fusion et de vaporisation des corps sont fixes pour chacun d'eux, quoique différens pour les différentes substances. Le thermomètre le prouve par son immobilité quand on le plonge dans ces corps, lorsqu'ils changent ainsi d'état.

Puisque nous convenons de choisir pour second point fixe la chaleur de l'eau bouillante, marquons ce point sur le tube. De là, jusqu'au point de la glace fondante, il y a sur chaque thermomètre un certain intervalle; divisons cet intervalle en un certain nombre de parties égales, par exemple, en cent parties, que nous nommons degrés; et marquons-les sur le tube, en écrivant 0 à côté du terme de la glace fondante, et 100° à côté du terme de l'eau bouillante: cette convention une fois faite, tous les thermomètres, construits sur la même division, seront exactement comparables; car lorsqu'ils seront exposés aux mêmes températures, l'extrémité de la colonne de mercure s'arrêtera au même nombre de degrés.

C'est ce que prouve l'expérience, et l'on peut démontrer qu'il en doit être ainsi: en effet, lorsque deux thermomètres de grosseur différente passent de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante, les quantités absolues de mercure qu'ils contiennent se dilatent dans une même proportion. Or, en graduant le thermomètre, on ne fait que diviser ces dilatations totales en un même nombre de parties égales; ainsi chacune des parties conserve encore une même

proportion avec le volume primitif à 0° . Si l'on place les deux thermomètres dans une autre circonstance où les masses de mercure qu'ils contiennent doivent encore se dilater dans une proportion pareille, ce qui aura lieu si on les expose à une même température, les dilatations de ces masses seront encore d'un même nombre de parties, et conséquemment marquées par un même nombre de degrés de chaque graduation. D'après cela, lorsqu'un physicien de Paris, par exemple, écrira qu'il a observé tel phénomène à une température de dix degrés centésimaux au-dessus de 0° ou du terme de la glace fondante, le physicien de Londres ou de Pétersbourg saura précisément de quelle température il veut parler, et pourra la reproduire dans son laboratoire, s'il veut répéter les mêmes expériences. On prolonge ordinairement la division au-dessous du terme de la glace fondante, car le mercure ne se gèle que fort au-dessous de ce terme; et l'on peut aussi la prolonger au-dessus du terme de l'ébullition de l'eau, car le mercure est encore bien loin de bouillir à cette limite. Il faut seulement, quand on désigne une température en degrés du thermomètre, avoir soin de dire si ces degrés sont comptés au-dessus ou au-dessous du terme de la glace fondante, qui est toujours représenté par 0.

Ce qui rend en général comparables tous les thermomètres construits avec la même division et le même fluide, c'est, comme on vient de le voir, l'égalité absolue des dilatations qui s'y produisent quand on les expose à la même température. Mais cet accord n'aurait plus lieu en général entre deux thermomètres qui seraient construits avec des fluides différens, à moins que les dilatations de ces deux fluides pour chaque degré ne fussent proportionnelles l'une à l'autre.

Comme la division centésimale est la plus commode pour le calcul, nous en avons parlé d'abord; cependant elle n'est pas la seule qui soit usitée. On a employé pendant long-temps, et beaucoup de physiciens emploient encore, une division en 80 parties, que l'on appelle de Réaumur, parce qu'on suppose que ce savant célèbre l'a le premier adoptée. Mais, puisqu'en général la graduation ne sert qu'à marquer des

fractions de la dilatation totale, on conçoit qu'un autre choix de division n'empêche pas ces thermomètres d'être comparables entre eux et avec les thermomètres centésimaux. Il suffit de se rappeler que 80° de Réaumur valent 100° de l'échelle centésimale, ou, ce qui revient au même, que chacun des premiers vaut $\frac{1}{8}$ des autres. Alors, pour traduire un nombre de degrés de Réaumur dans le nombre correspondant de degrés centésimaux, il suffit de le multiplier par $\frac{10}{8}$; réciproquement un nombre de degrés centésimaux étant donné, si on le multiplie par $\frac{8}{10}$, on le convertira en degrés de Réaumur.

Les Anglais se servent d'une autre division, imaginée et employée d'abord par Fahrenheit, physicien de Dantzig, qui a beaucoup contribué au perfectionnement des thermomètres. Dans cette division, le terme de la glace fondante est marqué 32, le terme de l'eau bouillante 212; l'intervalle de ces deux termes se trouve donc divisé en 180 parties, au lieu de 100 que l'on emploie dans notre échelle centésimale. Ainsi, chaque degré du thermomètre de Fahrenheit vaut $\frac{10}{9}$ ou $\frac{5}{9}$ du degré centésimal, et il vaut $\frac{8}{9}$ ou $\frac{4}{9}$ du degré de Réaumur. Cela suffit pour comparer les températures exprimées suivant ces différens modes de division. On conçoit, d'ailleurs, que le commencement des divisions, adopté dans tous ces systèmes, est absolument arbitraire: il suffit qu'il soit convenu, et que la division toute entière soit réglée d'après deux termes fixes.

La première invention des thermomètres date de la fin du seizième siècle. Les uns l'attribuent à Sanctorius, d'autres à Galilée; d'autres à un paysan hollandais, nommé Drebbel. L'idée de manifester ainsi les changemens de température par la dilatation des corps est sans doute ingénieuse; mais pour qu'elle devînt utile à la physique, il fallait en tirer une mesure précise et comparable, telle que la donne le choix d'une échelle composée d'un nombre déterminé de degrés, et comprise entre deux températures fixes. Cette modification importante qui, seule, constitue réellement le thermomètre, me paraît due à Newton. Ce grand homme ne pouvait toucher à un sujet d'expériences sans y porter l'exactitude qui

lui était propre, et qui était un de ses principaux moyens de découvertes. Il avait bien senti la nécessité d'un intervalle fixe; et, dès 1701, il avait pris pour températures fixes la glace fondante et l'eau bouillante, comme nous le faisons encore aujourd'hui. Il employait pour liquide, l'huile de lin. Le zéro de sa division était la glace fondante, et au terme de l'eau bouillante, il marquait 34°: ainsi 34° du thermomètre de Newton en valent 100 de l'échelle centésimale, de sorte que chacun de ces degrés réduits aux nôtres, vaut $\frac{100}{34}$. Newton observa, avec son thermomètre, les degrés de fusion d'un grand nombre de substances; et il reconnut que toutes ces températures étaient constantes; ce qui était un fait capital pour la théorie de la chaleur.

Plusieurs physiciens ont aussi employé des thermomètres construits avec d'autres substances. On se sert encore fréquemment de thermomètres à alcool. Mais comme ce liquide, à l'air libre, bout à une température moindre que 100°, on ne fait pas aller l'échelle jusqu'à ce terme, et on la règle par comparaison avec quelque thermomètre à mercure, déjà construit précédemment. C'est une très-mauvaise méthode; rien n'est si aisé que de faire aller les thermomètres d'alcool jusqu'à la température de l'eau bouillante et au-delà. Il ne faut que les fermer avec les mêmes précautions que nous avons prescrites pour le thermomètre à mercure, c'est-à-dire, de manière qu'il ne reste point du tout d'air dans l'intérieur du tube; car alors, par une propriété que nous ferons connaître plus tard, la seule vapeur d'alcool qui se développera naturellement par l'effet de l'accroissement de la chaleur, empêchera l'alcool, encore liquide, d'entrer en ébullition; et l'accroissement de sa température n'étant plus limité par ce phénomène, il continuera de se dilater indéfiniment. C'est pourquoi, en construisant un pareil thermomètre, il faudra laisser au-dessus du liquide un espace assez considérable destiné à cette dilatation. Pour en exclure l'air, il suffira de faire bouillir fortement l'alcool dans la boule et dans le tube, et de fermer celui-ci subitement par un trait de feu du chalumeau pendant l'ébullition; car les vapeurs de l'alcool développées

dans le tube, et qui en sortiront avec violence, auront, en peu d'instans, entraîné tout l'air qui s'y trouvait. La marche d'un pareil thermomètre, comparée à celle du thermomètre à mercure, n'est pas uniforme dans les températures élevées; mais elle le devient graduellement de plus en plus, à mesure que l'alcool se refroidit, et enfin elle l'est tout-à-fait dans les températures très-basses.

Les températures de la glace fondante et de l'eau bouillante étant les fondemens de nos thermomètres, il est extrêmement important d'examiner avec soin si elles sont parfaitement constantes, ou si quelques causes accidentelles peuvent les faire varier.

D'abord, en commençant par la température de la glace ou de la neige fondante, je ferai remarquer qu'il ne faut pas la confondre avec celle de l'eau qui commence à se geler; car on verra plus loin que l'eau, dans certaines circonstances, peut devenir très-sensiblement plus froide que la glace fondante, et abaisser le thermomètre au-dessous de zéro, sans cesser d'être liquide; par conséquent la température à laquelle elle se gèle ne peut pas être regardée comme fixe.

Il n'en est pas ainsi de la température à laquelle la glace et la neige se fondent; celle-ci est constamment la même, pourvu que l'eau qui a donné cette neige ou cette glace soit pure; car l'eau chargée de sels se gèle à des températures beaucoup plus basses, et par conséquent elle devient liquide à des degrés différens. L'eau de pluie gelée, ou la neige non souillée d'impuretés, donneront, en se fondant, le terme inférieur de notre échelle thermométrique, sans qu'on ait à y redouter aucune erreur.

Il y a beaucoup plus de variations dans le terme de l'ébullition de l'eau. D'abord il faut exclure l'eau chargée de sels; car elle bout à des températures différentes de l'eau pure, et communément plus hautes; mais, même en se servant de celle-ci, on n'obtient pas l'ébullition au même point du thermomètre à différens jours et dans différens lieux. Nous verrons dans le chapitre suivant, que ces variations qui, dans un même lieu, peuvent aller au plus à 1 ou 2°, sont dues aux

changemens de la pression exercée par l'atmosphère sur la surface de l'eau chaude, comme sur celle de tous les autres corps. Pour que l'eau bouille, il faut que la force élastique de sa vapeur surmonte cette pression, et ainsi le degré de l'ébullition doit varier quand la pression varie. Mais la cause de ces inégalités étant connue par l'expérience, nous donnerons le moyen de les évaluer, et de ramener toutes les observations à la pression moyenne qui a lieu au niveau des mers, terme adopté généralement pour fixer la température de 100° . On pourrait y suppléer dès à présent, en réglant le terme le plus élevé du thermomètre sur la fusion de quelque corps, par exemple, d'un alliage de deux parties de plomb, trois d'étain et cinq de bismuth; car Newton a reconnu qu'un pareil alliage se fond à la température de 100° , telle que nous venons de la définir. Mais il est plus simple et plus commode d'observer la température de l'eau bouillante, et d'y faire, selon les circonstances où l'on opère, la petite correction nécessaire pour la ramener précisément à 100° .

Il y a aussi quelques différences dans le degré de l'ébullition selon la nature des vases que l'on emploie, et selon celle des substances qui se trouvent mêlées à l'eau, même quand elle ne peut les dissoudre. Ce phénomène a été remarqué par M. Gay-Lussac. La même eau, qui, mise dans un vase de métal, bout à 100° d'un thermomètre donné, ne bout qu'à $101^{\circ} \frac{1}{4}$ dans un vase de verre; et, quand elle a cessé de bouillir dans un pareil vase, elle recommence si l'on y jette une pincée de limaille de fer. D'après cela on voit que, pour assigner à la température de l'ébullition des circonstances parfaitement fixes, il faut définir la nature du vase où elle a lieu. C'est pourquoi nous adopterons pour cette température, celle qui s'obtient quand l'eau bout dans un vase de métal.

Ce n'est pas tout d'avoir déterminé des températures parfaitement fixes, il faut encore les bien observer; or, il y a pour cela deux conditions essentielles, et qui ont été négligées trop souvent.

La première est commune à l'observation de la glace fondante et à celle de l'eau bouillante. Il faut que le thermomètre

y soit entièrement plongé dans toute la partie de sa capacité qui contient du mercure. Car, si l'on se borne, par exemple, à y plonger la boule seule, comme on le fait trop ordinairement, on conçoit que le cylindre de mercure qui se trouve élevé dans le tube au-dessus de cette boule ne prend pas la même température; et par conséquent il ne prend pas non plus le volume qu'il aurait s'il y était aussi plongé. A la vérité, on peut remédier à cette erreur par le calcul, quand on connaît les lois de la dilatation du mercure, ainsi que la longueur et la température de la partie non plongée. Mais comme cette température n'est jamais bien connue, et qu'on est réduit à la supposer égale à celle de l'air environnant, ce qui peut ne pas être tout-à-fait exact, on voit qu'il sera toujours plus avantageux d'éviter une pareille incertitude, en plongeant entièrement le mercure dans la température à laquelle on veut l'assujettir.

Cette condition est aisée à remplir pour la température de la glace fondante; mais, pour celle de l'eau bouillante, elle offre une difficulté. En effet, elle exige que l'on emploie un vase un peu profond; or, s'il l'est seulement de quelques décimètres, et qu'on y enfonce successivement un même thermomètre à diverses profondeurs, on s'apercevra aisément, par la dilatation du mercure, que, pendant l'ébullition, l'eau est un peu plus chaude au fond qu'à la surface. Cela vient de ce que la vapeur aqueuse, lorsqu'on l'empêche de s'échapper, peut acquérir une température beaucoup plus élevée que celle de l'eau bouillante; et c'est ce dont on a la preuve, en faisant bouillir de l'eau dans un appareil fermé de toutes parts, que l'on nomme digesteur de Papin, du nom du physicien qui l'a imaginé. Dans cet appareil, la vapeur aqueuse, et l'eau même, acquièrent une température énorme. Réduisons maintenant ce résultat aux circonstances de notre expérience. On voit que la vapeur aqueuse, qui se forme au fond du vase, sera moins libre que celle de la surface, puisqu'elle sera pressée par le poids de la colonne d'eau qui est au-dessus d'elle: elle devra donc s'échauffer davantage, avant de s'échapper. Elle devra même communiquer à l'eau cet excès de chaleur; et, par cette double

cause, la partie du thermomètre plongée dans les couches inférieures, sera plus échauffée qu'à la surface. Mais, d'un autre côté, nous avons vu que le thermomètre doit être plongé entièrement dans la température que l'on veut lui donner; par conséquent, si nous voulons le mettre à la température de l'ébullition de la surface, il faudra l'y coucher horizontalement, ce qui augmente beaucoup la difficulté de l'opération.

Heureusement on a trouvé le moyen d'y suppléer, d'après une remarque bien facile à faire; c'est que la température de l'eau bouillante à la surface est exactement la même que celle de la vapeur qui s'en échappe. Pour vérifier ce fait, prenez un vase métallique dont le col soit long et étroit, tel que le représente la *fig. 15*; versez dans ce vase de l'eau jusqu'à une hauteur connue, par exemple, en HH; puis faites chauffer cette eau en mettant le vase sur le feu; et, lorsqu'elle sera en ébullition complète, plongez-y un thermomètre MB à une très-petite profondeur, et observez le point M où le mercure s'arrête dans le tube. L'ébullition continuant toujours, je suppose que vous ayez employé une quantité d'eau telle, que le point M vienne justement tout auprès de l'orifice GG. Alors sortez un peu votre thermomètre de l'eau HH, de manière que sa boule et son tube se trouvent uniquement plongés dans la vapeur; vous n'y apercevrez pas la plus légère différence, et le mercure se tiendra précisément au même point qu'auparavant. Il est donc indifférent que la boule soit plongée dans l'eau, à une profondeur très-petite, ou dans la vapeur, et par conséquent la température de cette eau, et celle de la vapeur qui s'en échappe, sont les mêmes aussi.

Ceci nous donne un moyen très-simple de régler nos thermomètres; mais on peut encore le perfectionner. Il ne faut pas que la vapeur aqueuse sorte par le même orifice qui sert à introduire le thermomètre, car elle empêcherait de voir exactement le point où la colonne de mercure se termine. Il ne faut pas cependant que cette vapeur soit enfermée, car elle s'échaufferait au-dessus du terme de l'ébullition; ainsi, nous devons lui laisser un libre passage pour s'échapper dans l'air. On remplit toutes ces conditions au moyen d'un vase à deux

ouvertures, tel que le représente la *fig.* 16 ; l'une MM, fermée par un bouchon de liège *bb*, sert à introduire les thermomètres que l'on veut régler ; et l'autre *oo* tout-à-fait ouverte, sert pour laisser échapper la vapeur. On fait monter et descendre à volonté les tubes à travers le bouchon *bb*, selon leur longueur. Quand on veut observer l'extrémité de la colonne de mercure, pour y marquer le point de l'ébullition, l'on ne fait que les tirer un moment jusqu'à ce point, et on le marque aussitôt avec de l'encre de la Chine, ou, ce qui est mieux encore, avec quelque substance non soluble dans la vapeur. Cela fait, on les redescend pendant quelques instans, puis on les retire de nouveau pour répéter l'expérience, et voir si l'extrémité de la colonne de mercure reste invariablement au même point. Quand cette constance est bien vérifiée, on fixe ce point par un trait de diamant très-fin tracé sur le tube même.

D'après les règles auxquelles nous avons été obligés de nous assujettir pour la construction des thermomètres, on voit que, lorsqu'on veut employer ces instrumens à mesurer la température d'un milieu quelconque, il faut que tout le volume du mercure contenu, tant dans la boule que dans la tige, soit plongé dans cette température-là ; car c'est réellement tout ce volume dont la dilatation observée a déterminé sur l'échelle les points de 0° et de 100°. Cette précaution importante est trop fréquemment omise dans les applications. J'ajoute aussi qu'en général il serait avantageux de régler les thermomètres, et de les employer, en plaçant leur tige dans une situation horizontale. Car, dans toute autre, la colonne de mercure contenue dans leur tige presse par son poids l'enveloppe de verre de dedans en dehors ; et elle presse inégalement, selon la direction qu'on lui donne par rapport à la verticale. Or, le verre étant une substance extrêmement élastique, cette pression suffit pour changer sensiblement la capacité intérieure de la boule, et conséquemment pour faire varier les positions absolues auxquelles doivent répondre les différens degrés.

Enfin, j'ai supposé que les tubes de tous les thermomètres

étaient exactement cylindriques, ou qu'on avait suppléé à leurs petites irrégularités en y traçant des divisions d'égal volume, par le procédé de M. Gay-Lussac. Voici pour les gros tubes un autre procédé fort simple et assez usuel pour qu'il soit nécessaire d'en parler ici. On souffle à la lampe une ampoule de verre AA, *fig. 17*, dont la capacité soit assez petite pour servir d'unité de volume, et dont les extrémités AA soient amincies en tube d'un petit diamètre. En plongeant cette ampoule dans un bain de mercure, elle se remplit; et si on la retire en bouchant ses deux extrémités avec les doigts, elle contiendra toujours le même volume de mercure, pourvu que la température soit constante. On verse ce volume dans le tube ou dans les vases que l'on veut graduer, et l'on marque sur leur surface le point où le mercure se termine à chaque quantité que l'on verse. Il faut seulement avoir soin que toute l'opération soit faite à une température parfaitement constante, pour que l'ampoule ait toujours exactement la même capacité, et que les quantités successives de mercure que l'on verse, dans le tube ou dans le vase que l'on gradue, conservent aussi le même volume qu'elles avaient en y arrivant.

Un appareil assez volumineux pour être fait de cette manière aurait nécessairement moins de sensibilité qu'un petit thermomètre, c'est-à-dire qu'à cause de sa masse il serait moins rapidement affecté par les variations de la chaleur; mais il serait très-commode pour déterminer la quantité absolue dont le mercure se dilate en passant de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante; ce qui suffirait ensuite pour prévoir les longueurs qu'il faudrait donner aux tubes de thermomètres, lorsque la capacité de leur boule serait connue. Car, supposez que l'on suive comparativement la marche du mercure dans le gros tube et dans un thermomètre centésimal ordinaire, en les exposant tous deux à la même température, par exemple, en les plongeant tous deux dans la même eau: on verra ainsi de combien de parties le volume du mercure se dilate pour chaque degré. A la vérité, ce résultat ne sera pas tout-à-fait exact, parce que le verre se dilate aussi en

même temps que le mercure qu'il renferme ; et ainsi la dilatation observée pour ce liquide ne sera réellement que l'excès de sa dilatation véritable sur celle du verre ; mais c'est précisément cette différence de dilatation qu'il nous est nécessaire de connaître, pour prévoir avec sûreté les longueurs que nous devons donner aux tubes de nos thermomètres, selon les capacités de leur boule, et selon les intervalles de températures auxquels nous voudrions les faire servir.

En employant un procédé analogue à celui que nous venons de décrire, MM. Dulong et Petit ont trouvé que la dilatation apparente du mercure, depuis le terme de la glace fondante jusqu'à celui de l'eau bouillante, est exactement $\frac{1^{\circ}}{648}$ du volume qu'il occupe à la première de ces deux températures, et ils ont trouvé de plus que la marche de cette dilatation est constante pour chaque degré du thermomètre compris dans cet intervalle, c'est-à-dire qu'elle est de $\frac{1^{\circ}}{6480}$ par chaque degré de la division en 100 parties. Ceci est une conséquence de ce que, dans cette opération, le gros et le petit thermomètres sont faits avec le même liquide que l'on compare.

C'est là, comme nous l'avons dit, la dilatation apparente. Quand nous aurons mesuré directement la dilatation du verre, et que nous pourrions en tenir compte dans cette expérience, nous trouverons que la dilatation vraie du mercure entre les termes de la glace fondante et de l'eau bouillante est $\frac{1^{\circ}}{550}$ de son volume à 0°, ce qui fait $\frac{1^{\circ}}{5500}$ par chaque degré du thermomètre centésimal. Elle est plus forte que la dilatation apparente, comme cela doit être, puisque celle-ci n'est réellement que l'excès de la dilatation propre du mercure sur celle du verre.

Il est très-important de remarquer que les indications du thermomètre sont tout-à-fait indépendantes de la quantité absolue de cette dilatation ; si elle était, par exemple, double ou triple de ce que nous venons de rapporter, pourvu qu'elle suivit la même proportion dans toutes les températures, les nombres de degrés indiqués par le thermomètre seraient encore les mêmes dans les mêmes circonstances ; seulement, avec les mêmes dimensions initiales dans la température de la

glace fondante, les dilatations jusqu'à l'eau bouillante seraient doubles ou triples; et les degrés, qui sont la centième partie de cet intervalle, seraient aussi deux ou trois fois plus grands. Cette remarque prouve que les différentes espèces de verre dont on peut se servir pour fabriquer les thermomètres, ne les empêchent nullement d'être comparables; car nous prouverons plus loin, par l'expérience, que, dans toute l'étendue de l'échelle thermométrique, c'est-à-dire de 0 à 100°, les dilatations du mercure sont exactement proportionnelles à celles du verre et de tous les autres corps solides qui ne fondent qu'à de hautes températures; d'où il suit que l'inégale dilatabilité des différentes espèces de verre altère proportionnellement les longueurs absolues de l'intervalle fondamental et celles de tous les degrés; de sorte que ces degrés correspondent encore exactement aux mêmes températures, quoique, dans les différens thermomètres, ils puissent être inégaux en longueur. Il n'y a de changé que la valeur absolue de la dilatation apparente du mercure, et ce changement n'empêche pas les thermomètres d'être comparables; de même qu'ils le seraient encore si on les construisait avec différens liquides, dont les dilatations, quoique très-inégales, seraient constamment proportionnelles entre elles dans tout l'intervalle où l'on voudrait les employer.

Les thermomètres à liquide, lorsque leur tube est bien purgé d'air, peuvent, comme je l'ai déjà annoncé, être employés à des températures qui dépassent beaucoup le terme de l'ébullition à l'air libre de la substance qu'ils renferment. Avec cette précaution, leur usage s'étend fort au-delà de ce que l'on suppose communément. Toutefois, pour des températures très-élevées, telles que celle où le fer devient rouge, et celles où la plupart des métaux fondent, il faut nécessairement recourir à d'autres procédés que je ferai connaître quand nous étudierons spécialement les propriétés et les lois du calorique.

Par tout ce qui vient d'être dit dans ce chapitre, on voit qu'un grand nombre de physiciens distingués ont travaillé depuis long-temps pour donner au thermomètre toute l'exac-

titude et toute la sensibilité dont il est susceptible. Tant de recherches employées à fabriquer un petit instrument de verre peuvent paraître minutieuses, si l'on n'y voit qu'un objet de pure curiosité; elles sont de la plus haute importance, si l'on fait attention aux conséquences qui en dérivent, et aux connaissances que nous en tirons sur les phénomènes de la nature. Les applications du thermomètre dans la physique, la chimie et les autres sciences naturelles, sont innombrables. Les indications qu'il nous donne sont la base de toute la théorie de la chaleur; il est le régulateur de toutes les opérations chimiques; l'astronome le consulte à chaque instant dans ses observations, pour calculer les déviations que les rayons lumineux émanés des astres éprouvent en traversant l'atmosphère, qui les brise et les courbe plus ou moins, selon sa température. C'est encore au thermomètre que nous devons toutes les connaissances que nous avons sur la chaleur animale, produite et entretenue par la respiration. C'est lui qui fixe la température moyenne de la terre et des climats; qui nous montre la chaleur terrestre constante dans chaque lieu, mais diminuant d'intensité depuis l'équateur jusqu'aux pôles constamment glacés; c'est encore lui qui nous apprend que la chaleur décroît à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, vers la région des neiges éternelles, ou qu'on s'enfonce dans les abîmes des mers, d'où résultent les changemens progressifs de la végétation à diverses hauteurs. Lorsqu'on voit tant de résultats obtenus par le seul secours d'un peu de mercure enfermé dans un tube de verre, et qu'on songe qu'un petit morceau de fer, suspendu sur un pivot, a fait découvrir le Nouveau-Monde, on conçoit que rien de ce qui peut agrandir et perfectionner les sens de l'homme, ne doit être d'une légère considération; et ce motif me servira d'excuse à moi-même pour la multiplicité des détails dans lesquels je viens d'entrer.

CHAPITRE IV.

Sur les destructions et les reproductions de chaleur qui s'observent pendant le changement d'état des corps.

LE thermomètre nous a fait découvrir que la température de chaque corps reste constante pendant que ce corps se fond ou se vaporise. Si on continue à le chauffer pendant la durée de ces phénomènes, toute la chaleur que l'on produit se détruit ; elle n'a d'autres effets que de continuer à fondre le corps ou à le vaporiser.

Cette destruction de chaleur est un fait si remarquable qu'il nous faut y insister particulièrement.

On en peut observer les effets dans une infinité de circonstances, autrement que par l'immobilité du thermomètre. Prenez une certaine quantité d'eau, par exemple, un poids de 10 kilogrammes, et chauffez-la jusqu'à la température de 75 degrés centésimaux. Alors mêlez-y 10 kilogrammes d'eau liquide, à la température de la glace fondante, et provenant de la fusion de la glace ; vous aurez ainsi 20 kilogrammes d'eau à une température d'environ 37,5, c'est-à-dire, exactement ou presque exactement intermédiaire entre celles des masses égales que vous avez mêlées. Mais si, au lieu de ces 10 kilogrammes d'eau froide encore liquide, vous employez 10 kilogrammes de neige ou de glace fondante, par conséquent à la même température, avec cette seule différence d'être encore solide, la température du mélange, après la fusion de cette glace ou de cette neige, sera précisément de 0 degré ; ainsi, l'eau liquide à zéro, en se mêlant avec l'eau chaude, la refroidit beaucoup moins que ne fait le même poids de glace ou de neige à la même température, qui s'y réchauffe et s'y fond tout à-la-fois.

Cette destruction de chaleur paraît une condition nécessaire de la liquéfaction ; car elle a lieu également à toute autre température chaque fois que la liquéfaction a lieu. En voici

des exemples. Il existe des acides qui sont si avides d'eau, qu'ils dissolvent même la neige et la glace, c'est-à-dire, qu'ils la rendent liquide comme eux pour la combiner avec leur propre substance. Il existe aussi des sels qui, lorsqu'on les mêle avec la neige ou la glace pilée, se combinent pareillement avec elles et forment un tout liquide. Pour que ces combinaisons se fassent, il n'est pas nécessaire que la température de ces substances soit plus élevée que celle de la neige; car elles exercent encore leur pouvoir dissolvant à la température de la neige fondante, et même bien au-dessous. Alors la destruction de chaleur qui doit avoir lieu pour que la neige ou la glace deviennent liquides, se produit encore, mais se produit aux dépens de la température même du mélange, de sorte que celle-ci s'abaisse considérablement. C'est ce qui arrive, par exemple, quand on mêle des poids égaux de neige et de muriate de soude solide; si ces substances sont à la température de la glace fondante, et si le mélange est fait d'une manière rapide, la température descend jusqu'à 18 degrés au-dessous de 0. Si l'on fait refroidir séparément, dans cette température, deux parties de muriate de chaux et une de neige, et qu'on les mêle ensuite, la température du mélange descendra jusqu'à 54 degrés au-dessous de 0; enfin, si l'on fait refroidir encore dans cette dernière température quatre parties de neige et cinq d'acide sulfurique étendu d'eau, et qu'on les mêle ensuite, la température s'abaissera jusqu'à 68 degrés au-dessous de zéro. Tous ces phénomènes nous prouvent que la destruction de chaleur indiquée par le thermomètre, dans la fusion de la glace et des autres corps solides qui se fondent à des températures plus élevées, ne tient pas à l'élévation de ces températures. C'est un phénomène général, lié à l'acte même de la liquéfaction; et la preuve évidente que cet acte est la véritable cause de l'abaissement de température, c'est que si les substances que l'on mêle sont préalablement refroidies au-dessous de la température que peut soutenir le liquide qui en résulte, c'est-à-dire, de manière à pouvoir geler ce liquide, le mélange ne produit plus aucun refroidissement.

Voici maintenant un autre phénomène, qui est pour ainsi dire l'inverse de ceux que nous venons d'examiner. Toute cette chaleur que les corps avaient détruite en se fondant ou se vaporisant, se reproduit, et reparait quand ils repassent par des états contraires, c'est-à-dire, quand ils se transforment de vapeur en liquides, ou de liquides en solides. Si vous mêlez 10 kilogrammes d'eau bouillante avec 10 kilogrammes d'eau liquide à 0 degré, vous aurez 20 kilogrammes d'eau à une température exactement ou presque exactement intermédiaire, c'est-à-dire, de 50 degrés. Mais si, au lieu d'eau bouillante, vous employez 10 kilogrammes de vapeur à la même température, la chaleur qui en résultera sera bien plus considérable, car elle suffira, non-seulement pour échauffer jusqu'à 50°, mais pour faire *bouillir* 57 kilogrammes d'eau à 0°. Ainsi cette vapeur, en se condensant et redevenant liquide, reproduit et restitue la chaleur qu'elle avait détruite en se formant.

Nous chercherons plus loin à mesurer ces effets avec exactitude; avant de le tenter, il faut que nous nous formions beaucoup de moyens d'observation qui nous manquent, et que nous acquérions plus de connaissance sur la constitution des corps; mais il était dès-à-présent nécessaire d'insister sur ces phénomènes remarquables, pour pouvoir y rapporter plusieurs autres faits analogues qui se présenteront bientôt à nous dans le cours des expériences, et dont, sans cela, l'observation directe nous aurait entièrement échappé.

Ces disparitions et ces réapparitions de chaleur ont servi de base au système des chimistes, qui regardent le calorique comme une matière. Ils en ont conclu que le calorique pouvait exister dans deux états différens, ou combiné ou libre. Combiné avec la substance des corps, il disparaît à nos sens, et n'agit plus sur le thermomètre; ils l'appellent alors *chaleur latente*, c'est-à-dire cachée. Dégagé de cette combinaison, ils lui donnent le nom de *chaleur libre*; alors il agit sur le thermomètre et sur nos organes, il dilate les corps, les fond, les vaporise, et produit tous les phénomènes de température. On voit que ce système est parfaitement approprié

aux circonstances qui s'observent quand les corps changent d'état. Il est, pour ainsi dire, moulé sur eux; mais satisfait-il également aux autres faits qui ne lui ont pas servi de base, par exemple, à la propagation de la chaleur dans l'air et à travers les corps? Ce sont des questions que nous examinerons par l'expérience, quand nous étudierons spécialement les propriétés du calorique.

Au contraire, d'autres physiciens, considérant la chaleur comme l'effet d'un simple mouvement de vibration excité dans les particules des corps, assimilent les effets que nous venons d'examiner à la loi connue en mécanique sous le nom de conservation des forces vives. On appelle ainsi, dans un système de corps, la somme des produits de leurs masses par les carrés de leurs vitesses, et l'on démontre que cette somme est constante lorsque le mouvement du système n'est dû qu'aux attractions réciproques des corps qui le composent. Ainsi, en regardant la chaleur comme un effet produit dans les corps par la force vive résultante du mouvement de vibration de leurs particules, on voit que sa quantité totale doit rester constante dans tous les différens états par lesquels ils peuvent passer; et l'on conçoit alors pourquoi après s'être augmentée, par exemple, dans le corps qui se vaporise, aux dépens de celui qui l'échauffe, elle y diminue de nouveau, et est restituée quand ce corps revient à l'état de liquidité. Mais on voit aussi que cette hypothèse est, de même que la précédente, spécialement établie sur les phénomènes qui se passent dans les changemens d'état des corps, et par conséquent il faudra la soumettre encore à d'autres épreuves indépendantes de ces premiers principes, pour pouvoir apprécier sa probabilité par l'étendue de ses applications.

Les partisans de la matérialité du calorique se sont beaucoup occupés de savoir si les degrés du thermomètre étaient ou non proportionnels aux quantités de calorique introduites dans les corps. Mais en réduisant, comme nous l'avons fait, l'idée de température à sa signification véritable, qui n'exprime qu'un état apparent et sensible, où les corps se trouvent amenés par l'action que le calorique exerce sur eux, on

voit que le thermomètre, pour indiquer cet état, n'a pas besoin d'avoir une marche proportionnelle à l'intensité d'action que le calorique exerce sur lui ; il suffit que ses indications soient toujours semblables et constantes, c'est-à-dire, que, quand l'action sensible du calorique redevient la même, le degré de température indiqué par le thermomètre soit le même aussi. Or, cette constance se vérifie parfaitement toutes les fois qu'on en réitère l'épreuve, en exposant le thermomètre à des circonstances semblables, par exemple, quand on le plonge dans un même corps échauffé jusqu'au degré de fusion. Seulement pour que cette observation soit exacte et comparable à elle-même, quoique faite avec différens thermomètres, il faut que leur masse soit toujours si petite, comparativement à celle des corps dans lesquels on les plonge, qu'on puisse la considérer comme nulle, afin que leur introduction dans ces corps n'en change pas sensiblement la température, et puisse la partager et l'indiquer sans l'affaiblir. Voilà à quoi se réduit l'indication du thermomètre : vouloir proportionner sa marche à la quantité ou à l'intensité du calorique qui agit sur les corps, c'est vouloir lier une hypothèse à un fait certain, et compliquer un instrument simple par une condition qui lui est étrangère. Pour nous, fidèles à nos définitions, nous continuerons de regarder le calorique comme un principe dont nous ignorons la nature. Nous appellerons chaleur l'impression sensible de ce principe sur nos organes et sur les corps ; et enfin la température sera l'énergie plus ou moins vive de ces effets. Le thermomètre, en fixant les températures par ses indications, apprend que l'action sensible du calorique est plus grande, ou égale ou moindre ; il nous indique donc des différences et non des rapports.

CHAPITRE V.

De la pression atmosphérique et du Baromètre.

AVANT que la physique fût devenue une science d'expérience, c'est-à-dire, jusqu'au temps de Galilée, on s'imaginait qu'aucune partie de l'espace ne pouvait être vide de matière,

et l'on exprimait cette impossibilité en disant que la nature a horreur du vide. Ainsi, lorsqu'on voyait l'eau monter dans des pompes à l'instant où l'on élevait le piston, on disait que le piston, en s'élevant, tendait à faire un vide dans les tuyaux de la pompe ; mais que la nature qui avait horreur du vide, s'empressait d'y faire monter l'eau pour le remplir. Personne ne s'avisait de demander comment la nature, qui n'est que l'ensemble des phénomènes, pouvait ainsi se personnifier et se transformer en un être susceptible de passion. A cette époque le doute n'était pas inventé. Un jour des fonteniers de Florence ayant construit une pompe très-longue dans le dessein d'élever de l'eau à une hauteur plus grande qu'ils n'avaient coutume de faire, ils trouvèrent qu'elle montait dans le corps de pompe jusqu'à trente-deux pieds environ, mais qu'elle ne *voulait* pas absolument monter plus haut, quoique l'on continuât de faire marcher le piston. Fort étonnés de cet accident, ils allèrent consulter Galilée, qui leur dit, en se moquant d'eux, qu'apparemment la nature n'avait horreur du vide que jusqu'à la hauteur de trente-deux pieds. Déjà ce philosophe avait entrevu que ce phénomène, et d'autres semblables, étaient de simples résultats mécaniques produits par la pesanteur de l'air ; mais il n'avait probablement pas encore arrêté tout-à-fait ses idées sur un sujet si nouveau ; et il aimait mieux donner aux fonteniers cette défaite que de hasarder son secret. Il mourut sans l'avoir fait connaître ; et ce fut Torricelli, son disciple, qui, par une expérience extrêmement frappante et ingénieuse, mit cette découverte dans tout son jour. Il remplit de mercure un tube de verre long de trois pieds, et fermé par un de ses bouts ; puis, bouchant l'autre bout avec le doigt, il renversa le tube et le plongea par cette extrémité dans un vase ouvert où il y avait aussi du mercure ; alors, retirant le doigt, il cessa de soutenir la colonne de mercure contenue dans le tube. Aussitôt on la vit tomber, laissant le haut du tube vide ; mais elle s'arrêta bientôt, et, après plusieurs oscillations, elle resta suspendue en équilibre, n'ayant plus qu'environ vingt-huit pouces de longueur, ce qui, dans nos divisions métriques, répond à-peu-près à 0^m,76.

D'après cela, il est évident que si, dans les pompes, la

nature n'avait horreur du vide que jusqu'à trente-deux pieds, elle n'en avait horreur, dans les tubes pleins de mercure, que jusqu'à la hauteur de vingt-huit pouces. Cette conclusion était si ridicule, qu'il fallut bien enfin douter du principe, et renoncer à ce grand axiome : *non datur vacuum in rerum naturâ.*

La cause réelle de ces phénomènes est simple et facile à découvrir ; mais il faut la déduire des propriétés mécaniques de l'air, c'est-à-dire, qu'après avoir établi les propriétés de ce fluide, telles que l'expérience nous les fait connaître, il faut montrer que les phénomènes dont nous venons de parler en sont des conséquences inévitables. Voilà la marche de la bonne physique.

Le fluide rare et transparent qui nous environne de toutes parts, et que nous nommons l'air, est un corps qui jouit, comme tous les autres, des propriétés générales de la matière ; il est résistant, il est pesant ; sa résistance se fait sentir lorsque nous le pressons dans un espace fermé, dans une vessie, par exemple. Il est si bien un corps, que son choc mécanique met en mouvement une infinité de machines : c'est lui qui pousse les ailes des moulins et qui gonfle les voiles des vaisseaux. On peut même s'assurer de son poids en le pesant à la balance ; car si on l'extrait de l'intérieur d'un ballon de verre, comme on peut y parvenir par un procédé que nous ferons bientôt connaître, ce ballon, fermé ensuite et pesé, se trouve plus léger qu'auparavant. D'après cela, quand la surface d'un liquide, tel que l'eau ou le mercure, se trouve librement exposée à l'air, elle est réellement pressée par tout le poids de la colonne d'air qui repose sur elle. Comme cette pression est égale sur tous les points de la surface liquide, elle n'y produit aucun mouvement ; mais, supposez qu'ayant plongé dans le liquide l'extrémité inférieure d'un tuyau de pompe, on vienne à tirer en haut le piston, ou, pour prendre un exemple encore plus simple, supposez qu'ayant plongé ainsi le bout inférieur d'un chalumeau de paille, on aspire par l'autre bout l'air qu'il contient : dans l'un et l'autre cas les molécules de la surface liquide, qui se trouvent dans l'intérieur du tube, sont évi-

demment déchargées d'une partie du poids de l'air qui pesait sur elles, tandis que les parties de la surface qui sont hors du tube sont encore pressées aussi fort qu'auparavant; alors le liquide doit nécessairement céder par le côté où la pression est moindre, c'est-à-dire qu'il doit monter dans le tube jusqu'à ce que le poids de la colonne de liquide élevée, joint à l'élasticité de l'air qui y était resté, forme une pression égale à celle de l'air extérieur. Quand cette égalité a lieu, tous les points situés à la surface du liquide sont pressés également; il n'y a donc pas de raison pour qu'ils se mettent en mouvement d'un côté plutôt que d'un autre, et, par conséquent, l'équilibre doit subsister.

On voit par ce raisonnement que, s'il était possible d'ôter tout l'air contenu dans l'intérieur d'un tube, le liquide monterait jusqu'à ce que son poids seul fit équilibre au poids de l'atmosphère. C'est le cas de l'eau dans les pompes, c'est le cas de l'expérience de Torricelli.

Quoique cette conclusion soit de toute évidence, nous avons un moyen de la vérifier, et il ne faut pas le négliger; car c'est en marchant ainsi des faits à leurs conséquences, et des conséquences à de nouveaux faits, que l'on avance avec sûreté dans l'étude de la nature. Je dis donc que, si l'ascension de l'eau et du mercure est réellement déterminée par la pression de l'air, il faut que le poids de la colonne d'eau de trente-deux pieds, élevée dans les pompes, soit égale à celui de la colonne de mercure de vingt-huit pouces, qui se soutient dans le tube de Torricelli, en supposant toutefois que les bases de ces deux colonnes soient égales. Or, il est bien aisé de voir si cela est vrai ou non. En effet, en pesant, dans des balances très-exactes, des volumes égaux d'eau et de mercure, à des températures égales, par exemple, des ballons de verre remplis successivement de ces deux liquides, on trouve que le mercure pèse, à fort peu de chose près, treize fois et demi autant que l'eau. Ainsi, selon notre raisonnement, la colonne de mercure, élevée dans le tube de Torricelli, doit être treize fois et demi moins longue que la colonne d'eau des fonteniers. Or, celle-ci était de trente-deux pieds, qui font trois

cent quatre-vingt-quatre pouces ; si vous divisez ce nombre par treize et demi, vous trouverez pour quotient vingt-huit pouces : c'est en effet la longueur qu'a réellement la colonne de mercure dans l'expérience de Torricelli ; et l'accord est si juste, qu'on aurait pu prévoir cette longueur, par notre calcul, toutaussi exactement qu'on la détermine par l'expérience même. Cette possibilité de prédire les phénomènes est le caractère de la certitude. Admettons donc que l'air est pesant, et que la pression de l'atmosphère est la véritable cause des phénomènes que nous venons d'examiner ; mais cherchons à soumettre encore notre conclusion à d'autres épreuves ; examinons tous les autres effets que cette pression peut produire, et voyons si l'expérience les confirme.

La pression de l'air, comme celle de tous les autres fluides pesans, ne doit pas s'exercer seulement de haut en bas ; elle doit comprimer dans tous les sens les surfaces des corps que l'air touche. C'est ainsi, par exemple, qu'un navire qui flotte sur l'eau est soutenu et soulevé de bas en haut par la pression de l'eau qui l'environne. De là, il résulte que, lorsqu'un corps est exposé à l'air, chaque point de sa surface est pressé par cet air, comme il le serait par le poids d'une colonne d'eau qui aurait trente-deux pieds de hauteur, ou par une colonne de mercure haute de vingt-huit pouces. On a calculé à quoi pouvait monter la totalité de cette pression sur toute la surface du corps d'un homme de moyenne grandeur, et on a trouvé qu'elle surpassait trente-trois milliers de livres, ou environ seize mille kilogrammes.

On trouvera peut-être ce résultat bien incroyable, et l'on pensera qu'une pression si considérable devrait gêner beaucoup, ou même empêcher tout-à-fait nos mouvemens ; mais, en général, dans les sciences, il faut raisonner avant de juger, et ne point se hâter de rejeter un résultat comme absurde, uniquement parce qu'il nous étonne. Voici un autre exemple bien plus fort. Il y a dans la mer des poissons qui vivent habituellement à de très-grandes profondeurs. Les pêcheurs en prennent quelquefois à deux ou trois mille pieds au-dessous de la surface de l'eau. Ces poissons se trouvent donc chargés,

pendant toute leur vie, du poids d'une colonne d'eau de deux ou trois mille pieds, c'est-à-dire soixante-dix-huit ou quatre-vingts fois plus lourde que le poids de l'atmosphère; cependant ils ne sont point écrasés par cet énorme poids. Non-seulement ils vivent, mais ils se meuvent en tous sens avec la plus grande agilité. Cela est encore bien plus extraordinaire que de nous voir supporter si aisément la pression de l'air. Mais tout le merveilleux disparaît si l'on fait attention que les poissons dont nous venons de parler, sont intérieurement remplis et pénétrés de liquides qui résistent à la pression de l'eau extérieure, en vertu de leur impénétrabilité; de sorte que les membranes de l'animal n'en sont pas plus altérées que ne le serait la pellicule la plus mince que l'on descendrait à une pareille profondeur. Quant à la facilité des mouvemens, elle tient à ce que le corps du poisson est également pressé par-dessus et par-dessous, à droite et à gauche, de sorte que la pression se contre-balance d'elle-même; et ainsi il lui est aussi aisé de se déplacer que s'il nageait à la surface même de l'eau. Semblablement pour nous, qui supportons le poids de l'atmosphère, l'intérieur de notre corps et nos os même sont remplis, ou de liquides incompressibles, capables de supporter toutes les pressions, ou d'air aussi élastique que l'air du dehors, et qui contre-balance son poids: voilà pourquoi nous n'en sommes pas incommodés; et nous n'éprouvons non plus aucune difficulté à nous mouvoir, parce que la pression de l'air se contre-balance de toutes parts sur les diverses parties de notre corps, comme celle de l'eau sur le corps des poissons. Nous ne pourrions être écrasés par l'air extérieur, que si l'on détruisait en nous l'air intérieur qui lui fait équilibre, et, au contraire, nous souffririons beaucoup si l'on nous déchargeait tout-à-coup de cette pression, en nous plaçant dans le vide; car alors l'air intérieur n'ayant plus rien qui lui résistât, se dilaterait, nous gonflerait et nous ferait périr infailliblement. Cela arrive à un grand nombre de poissons, quand on les retire du fond des abîmes de la mer, et même seulement d'une profondeur de vingt ou trente mètres. La plupart d'entre eux ont, dans l'intérieur de leur corps, une vessie remplie d'air,

non pas d'air atmosphérique, mais d'une espèce particulière de gaz, qui se trouve produite et sécrétée par un résultat de leur organisation. Tant que ces animaux restent à la profondeur où ils vivent d'ordinaire, l'air contenu dans leur vessie a le degré de compression et d'élasticité nécessaire pour supporter le poids de l'eau qui pèse sur eux; mais, si tout-à-coup on les tire hors de l'eau, comme ils n'ont pas tous des conduits assez larges pour chasser promptement le superflu de cet air, et comme quelques-uns même n'en ont pas du tout, il arrive que leur vessie se gonfle, se crève, et l'air qu'elle contenait, occupant un volume quatre-vingts ou cent fois plus considérable, remplit leur corps, renverse leur estomac en dehors, le force même à sortir par la gueule et les fait périr. Alors on peut les laisser sur l'eau, ils ne vont pas à fond, leur corps flotte sur la surface, soutenu par cet estomac rempli d'air, comme par un ballon.

En général la connaissance de la pression de l'air donne la clef d'une foule de résultats physiques qui se répètent sans cesse sous nos yeux. L'emploi de cette pression comme moteur s'applique à une infinité d'usages. L'un des plus simples et des plus utiles aux physiciens, c'est l'usage qu'on en fait pour produire des courans constans d'eau, d'air ou de différens gaz. Les appareils qui réalisent cette application s'appellent des *gazomètres*. Leur construction est décrite dans le *Traité général*.

L'appareil de Torricelli a reçu des physiciens le nom de *baromètre*, qui signifie mesure de la pesanteur, parce qu'en effet il mesure la pression exercée par l'atmosphère dans le lieu où il est placé. Son usage est indispensable dans une infinité d'expériences; et l'on peut aisément prévoir cette nécessité; car la pression exercée par l'atmosphère étant une force comprimante qui se combine presque toujours avec les autres forces dont nous pouvons disposer, on conçoit qu'il faut y avoir égard pour obtenir des résultats exacts. Je dois donc, avant d'aller plus loin, expliquer en détail toutes les précautions qu'il faut prendre pour rendre le baromètre aussi parfait, aussi exact qu'on puisse le désirer.

La première condition pour y réussir, c'est d'exclure exactement l'air de l'intérieur du tube de verre où le mercure doit rester suspendu. Or, c'est une chose qui demande quelques précautions. Pour exposer le procédé dans sa plus grande simplicité, je me suis d'abord contenté de supposer que l'on versait du mercure dans le tube, et qu'on le renversait ensuite en posant le doigt sur l'extrémité ouverte, pour empêcher le mercure de tomber; mais si l'on bornait là ses soins, on n'aurait jamais qu'un baromètre fort imparfait. D'abord le mercure, comme tous les autres liquides, absorbe de l'air, s'en pénètre, le mêle, le combine avec sa propre substance. Cet air s'y trouve donc engagé par deux causes; l'attraction du mercure pour lui, et la pression de l'atmosphère qui s'oppose au développement de son élasticité. Mais, une fois placé dans le vide barométrique, la pression de l'atmosphère étant supprimée, il fait les plus grands efforts pour se dégager, et il s'échappe en effet en bulles qui traversent le mercure et viennent crever à sa surface. Alors, se répandant à l'intérieur du tube barométrique, il s'oppose à la pression exercée par l'air du dehors, la contre-balance en partie, en vertu de sa propre élasticité, et par conséquent oblige la colonne de mercure à descendre plus bas qu'elle ne descendrait si l'intérieur du tube était parfaitement vide; de sorte que la hauteur observée de cette colonne n'exprime plus la véritable pression de l'atmosphère, mais seulement l'excès de la pression du dehors sur celle du dedans. On voit donc que, pour connaître la pression véritable, il faut commencer par chasser tout l'air qui est ainsi engagé entre les particules du mercure; on y parvient en chauffant le mercure jusqu'à le faire bouillir; la chaleur, déterminant une augmentation d'élasticité de l'air combiné, le force à se séparer, et une fois dégagé des liens de l'affinité qui le retenaient, il s'échappe en bulles à travers le liquide; on ferme alors avec soin le vase qui contient celui-ci; on le laisse refroidir, et on le garde pour s'en servir au besoin.

Ce n'est pas tout : l'expérience prouve que les molécules de l'eau et de l'air adhèrent très-fortement à la surface du verre;

et comme il y a toujours de l'eau en vapeur répandue dans l'atmosphère, il arrive qu'une petite couche d'eau et d'air s'attache aux parois intérieures des tubes de verre, et y adhère très-fortement. Si donc on emploie un pareil tube sans préparation pour faire un baromètre, et qu'on y verse du mercure, lorsqu'on aura rempli le tube, qu'on l'aura renversé, et que la colonne de mercure sera descendue comme à l'ordinaire, la petite couche d'eau et d'air qui adhérerait aux parois du tube ne se trouvera plus comprimée par l'atmosphère qui pesait auparavant sur elle. Il lui arrivera donc la même chose qu'aux particules d'air qui étaient combinées avec le mercure avant qu'on l'eût fait bouillir; c'est-à-dire qu'une portion de cette couche échappera à l'attraction du verre, se réduira en vapeur élastique dans l'intérieur du tube, et contre-balancera, en partie, par son élasticité, la pression extérieure de l'atmosphère; de sorte que, par l'action de cette seconde cause, la colonne de mercure du baromètre se tiendra encore trop bas. La seule ressource que l'on ait pour chasser cette petite couche d'humidité, c'est de chauffer si fortement le tube, qu'on l'oblige à se dégager; et même il faut que cette opération se fasse après que le mercure a été introduit dans le tube; car, sans cela, l'eau et l'air y rentreraient pendant qu'on s'occuperait de le remplir, et s'attacheraient de nouveau à ses parois. Le meilleur moyen, le plus sûr pour dissiper toutes ces causes d'erreur, c'est de verser peu-à-peu le mercure dans le tube, et de chauffer, à chaque fois, celui-ci, assez fortement pour l'y faire bouillir.

Il est vrai que cette opération paraît très-difficile au premier abord; car le verre étant une substance si fragile, qui se casse si vite par l'effet subit de la chaleur, on doit craindre que les tubes ne se brisent dans cette tentative, et qu'il n'arrive perpétuellement des accidens: cependant la chose devient très-facile en s'y prenant avec précaution, et sur-tout en se conduisant d'après les remarques que nous avons déjà faites sur la dilatation. Quand un corps que l'on chauffe se brise, sa rupture n'est pas occasionnée par l'action seule de la chaleur; car cette action devrait fondre le corps, et non le briser. Sa

rupture ne vient que de l'action inégale de la chaleur qui, s'exerçant différemment sur ses diverses parties, les dilate ainsi d'une manière inégale. Si la dilatation est lente et graduelle, le corps, cédant peu-à-peu, éprouve l'effet du feu sans se briser; mais lorsque des parties voisines sont subitement dilatées dans des proportions très-différentes, elles ne peuvent plus obéir ensemble à des forces aussi inégales; si l'effort qu'elles font devient assez énergique pour vaincre la force de cohésion qui les retenait unies les unes aux autres, elles se séparent et le corps se brise : ainsi, pour éviter sa rupture, il ne faut que le chauffer graduellement; c'est ce que l'expérience confirme. En s'y prenant avec précaution et d'une manière convenable, on peut faire aisément bouillir de l'eau et du mercure dans des vaisseaux de verre; la chose est même d'autant plus facile, que ces vaisseaux sont plus minces, parce qu'alors la chaleur s'y propage plus aisément, et pénètre toute leur masse avec plus de facilité.

Cela posé, voici comment on opère : on prend un petit fourneau de terre, échancré par un bord; on y met du charbon allumé, que l'on dispose cependant de manière à ne pas former de flamme, car la flamme briserait infailliblement le tube si elle le touchait immédiatement. Puis on présente le tube vide sur ce feu, de loin d'abord, puis d'un peu plus près, puis de plus près encore, jusqu'à ce qu'enfin on l'échauffe très-fortement. En même temps on le fait tourner sur lui-même, entre les doigts, pour qu'il s'échauffe de tous les côtés, et on le promène sur le feu dans toute sa longueur. Cette première opération a pour objet de chasser les petites gouttes d'eau qui pourraient se trouver par hasard dans le tube; car si l'on attendait pour cela qu'on eût versé le mercure, la vapeur qu'elles produiraient le chasseraient dehors par son expansion, ou du moins elle occasionnerait des secousses qui pourraient briser l'appareil. Le tube étant ainsi bien séché, on y verse du mercure déjà bouilli, non pas assez pour le remplir tout entier, mais seulement assez pour y occuper une longueur de cinq ou six centimètres; puis on présente de nouveau le tube sur le feu, mais encore avec plus de précaution qu'aupa-

ravant : on le chauffe graduellement , de plus en plus , jusqu'à ce que le mercure se mette à bouillir. Après quelques instans d'ébullition , l'on retire le tube , on le ferme avec un bouchon , de peur que l'humidité ne s'y introduise , et on le laisse refroidir. Cette opération doit se faire dans une chambre dont les fenêtres soient ouvertes , ou du moins dont l'étendue soit assez grande pour que les vapeurs , qui s'exhalent du mercure bouillant , n'incommodent pas celui qui opère. Quand le tube est refroidi , on le reprend ; on y verse une nouvelle quantité de mercure à-peu-près égale à la première ; on l'y fait de nouveau bouillir , et l'on répète ainsi l'expérience jusqu'à ce que le tube soit presque tout plein. On ajoute alors la petite portion de mercure qui manque ; mais on ne la fait pas bouillir dans le tube , parce que l'ébullition la chasserait dehors ; cela fait , on pose le doigt sur l'orifice ouvert du tube , en prenant bien garde de ne pas laisser d'air entre deux ; on le renverse , et on le plonge dans sa cuvette comme à l'ordinaire : la colonne s'abaisse ; et , comme il n'y a pas du tout d'air ni de vapeur élastique au-dessus d'elle , sa longueur mesure exactement la pression de l'atmosphère.

Il me reste à parler des moyens que l'on emploie pour connaître avec précision la longueur de cette colonne. Une des dispositions les plus commodes est celle qui est représentée dans la *fig.* 18. C'est la construction des baromètres de Fortin. Le tube de verre est enfermé dans un tube de cuivre qui le protège , et qui est fendu dans sa longueur , afin que l'on puisse apercevoir la colonne de mercure. Ce système est attaché , par le haut , à une suspension mobile dans deux sens rectangulaires , de sorte que la colonne se tient toujours verticale par l'effet de son propre poids. La cuvette , dans laquelle le tube plonge , a un fond mobile qui s'élève et s'abaisse à volonté , par le moyen d'une vis V , ce qui fait monter ou descendre le niveau intérieur du mercure dans la cuvette. Quand on veut observer la hauteur du baromètre , on se sert de ce mouvement pour amener la surface du mercure de la cuvette parfaitement en contact avec l'extrémité d'une pointe d'ivoire très-fine P , qui est fixée verticalement dans l'intérieur de l'appareil. Le

tube de cuivre porte des divisions, dont l'origine répond très-exactement à l'extrémité inférieure de cette pointe. Il ne reste donc plus qu'à voir à quel point de ces divisions répond l'extrémité supérieure de la colonne de mercure. Pour que cette observation puisse se faire avec plus d'exactitude, le tube de cuivre porte un curseur C, muni d'un vernier, qui permet d'apprécier au moins jusques aux dixièmes de millimètres. On y adapte inférieurement deux petits plans de cuivre verticaux, dont les extrémités déterminent un plan de mire parfaitement perpendiculaire à la longueur du tube. Quand on veut faire l'observation, l'on fait mouvoir le vernier jusqu'à ce que le plan de mire devienne exactement tangent à la convexité supérieure du mercure. Alors la division tracée sur le tube vous indique précisément la distance comprise entre le plan de mire du curseur et l'extrémité inférieure P de la pointe d'ivoire. Cette distance est la longueur de la colonne barométrique, élevée au-dessus du niveau intérieur de la cuvette. C'est par conséquent cette longueur qui mesure la pression de l'atmosphère au moment où l'on a observé. Il est presque inutile de dire que, pendant toute l'opération, l'instrument doit être maintenu dans une situation parfaitement verticale, condition que l'on remplit en le laissant pendre librement sur sa suspension.

Pour rendre toutes les observations de ce genre comparables entre elles, il est nécessaire de déterminer la température du mercure qui compose la colonne barométrique; car le mercure, comme tous les autres corps, se dilate par la chaleur; et nous avons même déjà annoncé que, pour chaque degré du thermomètre centésimal, la dilatation de son volume est égale à $\frac{1}{5550}$ du volume primitif, que la même masse occupait à 0°. Il suit de là qu'une même masse de mercure, moulée en un cylindre d'un rayon constant, occupera plus de longueur, à mesure que sa température s'élèvera davantage; et son allongement sera proportionnel à la dilatation de son volume. Conséquemment, pour juger de la masse par la longueur, il faudra ramener toutes les observations à une même température, par exemple à celle de 0°, ce qui se fera, en

retranchant de la colonne observée $\frac{1}{5550}$ de sa longueur si la température est élevée de 1° au-dessus de 0° , $\frac{2}{5550}$ si elle est élevée de 2° , $\frac{3}{5550}$ si elle est élevée de 3° , et ainsi de suite.

Pour connaître exactement la température de la colonne barométrique, on enchâsse un petit thermomètre très-sensible dans la monture même de l'instrument, et on note le degré que ce thermomètre indique. Il est visible, en effet, que la température de l'appareil ne peut pas changer sans que le thermomètre, qui fait corps avec lui, ne se ressente de ces variations. Cette température peut être assez différente de celle de l'air extérieur, non-seulement quand le baromètre est placé dans un appartement fermé, mais même quand il est exposé à l'air libre; car les variations de la température affectent bien plus rapidement un fluide rare et léger comme l'air, qu'une masse solide, comme celle du mercure et du cuivre, dont le baromètre est formé.

Cependant on doit aussi observer la température de l'air. Cela se fait avec un thermomètre fort sensible, exposé à l'air libre et à l'ombre, mais loin des murailles et de tous les autres corps qui pourraient lui renvoyer de la chaleur. La connaissance de cette température est utile pour déterminer complètement les circonstances dans lesquelles l'atmosphère se trouve au moment de l'observation. C'est une donnée nécessaire pour le calcul des réfractions astronomiques et pour la détermination des différences de niveau, par le moyen des observations barométriques, application importante dont nous parlerons plus loin.

Lorsque l'on veut transporter le baromètre que nous venons de décrire, on tourne la vis inférieure qui élève le niveau de la cuvette, de manière que sa capacité diminuant, le mercure la remplisse en totalité, et remonte ensuite, par son excès de volume, jusqu'au sommet du tube. Alors on renverse l'instrument où l'air ne peut plus rentrer; on le met dans un étui convenablement préparé, et on le transporte. Lorsqu'on veut observer de nouveau, on commence par remettre l'appareil dans une situation verticale; on abaisse le fond mobile, le mercure descend, et on le laisse ainsi des-

centre jusqu'à ce que son niveau dans la cuvette affleure l'extrémité inférieure de la tige d'ivoire ; puis on achève l'observation comme nous l'avons dit plus haut.

La longueur de la colonne barométrique ainsi observée, au même instant, dans le même lieu, avec des baromètres également purgés d'air et construits avec une perfection égale, n'est pas exactement la même. Elle est d'autant moindre, que les tubes sont plus étroits ; et la preuve que cette variété du diamètre intérieur est la seule cause qui la modifie, c'est que la différence cesse d'être sensible au-delà d'une certaine largeur du tube, que l'on pourrait fixer, par exemple, à deux centimètres. Nous ferons connaître plus loin la cause physique de ce phénomène. Pour le moment, il nous suffira de dire que c'est la même qui fait que l'eau s'élève au-dessus de son niveau, et que le mercure s'abaisse au-dessous, dans les tubes extrêmement étroits, que l'on appelle *capillaires*, parce que leur diamètre intérieur approche de la finesse d'un cheveu. On conçoit, sans autre explication, qu'un effet analogue doit avoir lieu dans nos tubes barométriques ; mais la connaissance de la cause qui le produit permet de calculer les corrections qu'il exige, et on les trouvera dans le *Traité général*.

On évite complètement l'effet que nous venons d'expliquer, en opposant à elle-même la cause qui le produit, comme on le voit dans l'appareil représenté *fig. 19*, et que l'on nomme le *baromètre à siphon*. Ce baromètre n'a pas de cuvette, ou plutôt le tube lui-même en sert. Il est recourbé par le bas, comme le montre la figure, et forme par conséquent deux branches parallèles CS et CN. Pour obtenir cette disposition, on commence par prendre un tube rectiligne dont la longueur totale est égale à SCN, et tournant en bas le bout fermé S, on remplit la portion SC de mercure, que l'on y fait bouillir avec toutes les précautions indiquées plus haut. Cela fait, on recourbe à la lampe la portion CN ; puis on renverse tout le système, de manière que le bout fermé S redevient le supérieur. La colonne de mercure, qui remplissait cette branche, étant plus longue que la colonne baromé-

trique ordinaire, et par conséquent plus pesante que la pression atmosphérique, tombe par l'excès de son poids, et passe en partie dans la branche ouverte CN. Cela posé, si le point N est le sommet de la convexité du mercure dans la branche ouverte, et que le point S soit le sommet de sa convexité dans la branche fermée, il est évident que la différence de niveau de ces deux points est précisément la longueur de la colonne de mercure, qui est soutenue par la pression que l'atmosphère exerce sur la surface N de la branche ouverte; et, pour que cette différence de niveau soit indépendante de l'effet de la capillarité que nous avons reconnue dans les tubes simples, il suffit que les deux branches du tube, vers les deux extrémités N et S de la colonne, aient des diamètres intérieurs à-peu-près égaux; car alors les tendances à la dépression étant égales de part et d'autre, se contre-balanceront mutuellement.

Il ne reste donc plus qu'à mesurer la différence de niveau des deux points N et S : pour cela on trace une division AH, verticale et parallèle aux branches du tube. Un curseur horizontal HS, pareil à celui des baromètres simples, se meut parallèlement à lui-même le long de cette division. On rend d'abord le plan de mire tangent à une des extrémités de la colonne, par exemple, au sommet de la convexité supérieure S, et l'on note le point correspondant de la division, qui sera par exemple H. Puis on descend le curseur sur l'autre extrémité de la colonne en N, et l'on y répète la même observation. Supposons que le point correspondant de la division soit h , la distance Hh , que la division indique, sera la différence de niveau des deux points NS, et par conséquent la longueur de la colonne barométrique.

On rend l'observation plus exacte encore, en adaptant au curseur une petite lunette dans l'intérieur de laquelle on a tendu horizontalement un fil très-fin. On observe alors, avec la plus grande précision, l'instant où ce fil vient affleurer la surface du mercure dans chacune des deux extrémités de la colonne.

M. Gay-Lussac a fait au baromètre à siphon une modification qui le rend portatif et d'un usage infiniment commode

pour les voyageurs. Lorsque le baromètre est fait, on ferme à la lampe d'émailleur l'extrémité de la branche la plus courte, désignée par Y, *fig.* 20. Dans cet état, le baromètre, complètement fermé, serait inaccessible à l'air extérieur, et conséquemment ne pourrait pas indiquer les changemens de pression que cet air éprouve; mais, pour rétablir la communication, on pratique intérieurement, vers le milieu de la branche Y, une petite saillie, terminée par un trou extrêmement fin et capillaire T. Ce trou permet bien à l'air d'entrer dans la branche CY; mais il ne permet pas au mercure d'en sortir, à cause de la force avec laquelle il le repousse, en vertu de sa capillarité. Ainsi, quand on a observé la différence de niveau des deux extrémités S, N, de la colonne, si l'on renverse doucement le tube, une partie du mercure rentre dans sa longue branche CX, comme le montre la *fig.* 21, et achève de la remplir; le reste tombe dans la branche la plus courte CY, mais ne peut s'échapper à cause de la petitesse du trou latéral T. On peut donc transporter l'appareil dans cette position; il sera toujours ouvert pour l'air et fermé pour le mercure. Seulement il faut que le tube soit rétréci en C, à son coude, afin que l'effort de la capillarité maintienne ce coude toujours rempli, même après le renversement.

Pour rendre l'appareil transportable, on entoure le tube d'une enveloppe solide dans laquelle on le lute. On peut même, et ceci est un très-grand avantage, envelopper entièrement la plus longue branche, et se borner à observer les variations du mercure dans la plus courte. Il suffit pour cela que les diamètres de ces deux branches soient exactement les mêmes dans les parties N et S, que les extrémités des deux colonnes pourront parcourir; car alors, si la pression atmosphérique vient à varier, le mercure baissera autant dans une des branches qu'il s'élèvera dans l'autre; ainsi, pour connaître la variation totale que la longueur de la colonne barométrique éprouve, il suffira de mesurer son changement dans une des branches, par exemple, dans la plus courte, et d'en prendre le double. Afin d'obtenir cette égalité, on

choisit un tube de verre qui soit , à peu de chose près, cylindrique ; on le coupe en deux parties environ au milieu de sa longueur , et l'on se sert de ces deux moitiés pour former les deux extrémités de la colonne , en les soudant à d'autres tubes de verre d'un diamètre quelconque. On peut encore atteindre le même but avec un tube qui ne serait pas d'un égal diamètre dans toute sa longueur. Il faudrait alors le diviser en parties de capacités égales , par le procédé que nous avons indiqué , en parlant de la construction des thermomètres. Connaissant ainsi le rapport de capacité des deux branches , on pourrait calculer l'élévation du mercure dans l'une , d'après son abaissement observé dans l'autre ; mais cela serait moins commode que l'égalité de capacité des deux branches , à laquelle il est facile d'arriver.

Le baromètre portatif que nous venons de décrire , d'après M. Gay-Lussac , peut être enfermé dans une canne , et transporté par-tout avec la plus grande facilité. On y adapte , comme aux autres , un petit thermomètre enchâssé dans la monture même , et qui sert à mesurer la température du mercure. Enfin , pour que les mouvemens brusques que la colonne de mercure peut recevoir en voyage ne la portent pas avec trop de force contre les extrémités du tube de verre , ce qui pourrait le briser , on gêne ces mouvemens par un rétrécissement local , pratiqué dans le tube tout près de ses extrémités X , Y , de manière que son diamètre intérieur dans ces points soit beaucoup moindre qu'il ne l'est au-dessus et au-dessous. Par ce moyen , lorsque la colonne de mercure est chassée avec force vers un des sommets du tube , son mouvement se ralentit nécessairement en passant par cet orifice étroit , et elle arrive à l'extrémité même , avec une trop petite vitesse pour pouvoir la briser. Il faut prendre le tube assez long et faire le rétrécissement assez près de ses bouts , pour que le sommet S de la colonne ne s'élève jamais jusque-là dans les observations ; car si cela arrivait , le tube devenant très-étroit dans ces points , la dépression produite par la capillarité deviendrait très-considérable , et pourrait occasionner de grandes erreurs dans les hauteurs observées. Ce rétrécissement

du tube, près de son extrémité, est une précaution que l'on a soin d'employer dans tous les baromètres destinés à être portés en voyage.

En employant des instrumens tels que ceux que je viens de décrire, et s'en servant avec toutes les précautions que j'ai recommandées, on fera des observations barométriques qui ne laisseront rien à désirer du côté de l'exactitude. J'ai dû entrer dans tous ces détails, en parlant d'un instrument qui est d'un usage continuel dans la physique, la chimie, l'astronomie et la géographie. On verra la preuve de cette grande utilité dans les expériences délicates pour lesquelles il va bientôt nous servir; mais auparavant, je crois devoir faire connaître quelques-unes de ses applications générales.

En observant pendant long-temps dans un même lieu la longueur de la colonne barométrique, ou ce qu'on appelle ordinairement la *hauteur du baromètre*, on s'aperçoit qu'elle ne reste pas constamment la même. Dans les premiers temps qui suivirent l'invention du baromètre, on croyait que le mercure se tient plus haut quand le temps est à la pluie, et qu'au contraire il baisse par le beau temps (1), et l'on trouvait même des raisonnemens pour appuyer cette prétendue observation. Car, disait-on, lorsqu'il doit pleuvoir, l'air est chargé d'eau; par conséquent le poids de l'atmosphère est plus considérable, et, au contraire, ce poids doit être moindre dans les beaux temps, parce qu'alors l'atmosphère s'est déchargée de l'humidité qu'elle contenait. Malheureusement pour ce système, on a trouvé, depuis, que la quantité d'eau que l'air peut contenir augmente à mesure qu'on l'échauffe, de sorte qu'en été, par exemple, il contient généralement beaucoup plus d'eau qu'en hiver, quoique cependant il fasse moins beau en hiver qu'en été : on a trouvé aussi que la vapeur d'eau est plus légère que l'air à volume égal, lorsqu'elle devient capable d'exercer la même force élastique; c'est-à-dire, par exemple, que, si l'on remplaçait un centimètre cube d'air pris à une

(1) C'était l'opinion de Pascal. Voyez son *Traité de l'équilibre des liqueurs*.

certaine hauteur dans l'atmosphère par un centimètre cube de vapeur d'eau à la même température et ayant la même élasticité, cette vapeur peserait moins que le volume d'air qu'elle remplacerait, et par conséquent elle produirait sur le baromètre une moindre pression : de là on a conclu le contraire de ce qu'on avait pensé d'abord, c'est-à-dire que, lorsque le baromètre s'élève, il doit faire beau temps, et qu'au contraire lorsqu'il s'abaisse, il doit pleuvoir. C'est en effet ce que l'expérience indique dans les cas les plus ordinaires; mais, à dire vrai, la raison que l'on en donne ne vaut guère mieux que celle que l'on a abandonnée : j'indiquerai une cause qui me paraît plus vraisemblable, lorsque nous aurons étudié le mode suivant lequel les vapeurs aqueuses existent dans l'air; en attendant, bornons-nous à considérer ces variations accidentelles comme liées d'une manière quelconque à l'état de l'atmosphère, et observons-en les détails.

Leur étendue n'est pas partout égale; elles sont presque nulles sur les hautes montagnes, et entre les tropiques; dans les zones tempérées même, elles ne sont jamais très-considérables par les temps calmes; mais presque toujours le baromètre descend rapidement avant les tempêtes, et il éprouve de grandes oscillations en quelques heures, quand elles ont lieu; ce qui en fait un instrument très-utile, à la mer, pour les navigateurs instruits. La hauteur moyenne du mercure dans le baromètre, au niveau des mers, est partout, à fort peu près, la même : cependant on croit avoir reconnu qu'elle est un peu moindre dans l'hémisphère austral. Au niveau de l'Océan, cette hauteur moyenne est de $0^m,7629$ (28 pouces 2 l. $\frac{2}{10}$), la température étant à $12^{\circ},8$ du thermomètre centigrade; à Paris, au niveau de la Seine, elle est de $0^m,76$ (28 p. 0 l. $\frac{9}{10}$), et suivant les observations de Robault, continuées pendant quinze années consécutives, elle varie accidentellement, dans cette ville, entre $0^m,766981$ (28 p. 4 l.) et $0^m,749610$ (26 p. 7 l.), la température moyenne y est de 12° .

Le tracé graphique est la manière la plus commode pour rassembler comparativement de longues suites d'observations barométriques, On se sert pour cela d'une longue bande de

papier, au milieu de laquelle on trace une ligne droite qui la traverse d'un bout à l'autre; cette ligne est destinée à représenter la hauteur moyenne du baromètre dans le lieu de l'observation. On la divise en un certain nombre de parties égales, qui sont destinées à représenter des jours; puis, parallèlement à cette ligne, et tant au-dessus d'elle qu'au-dessous, on en trace plusieurs autres à des distances égales, comme, par exemple, d'un millimètre : cela fait, lorsqu'on a observé le baromètre un tel jour, si la hauteur est la moyenne, on marque d'un trait le point de la ligne principale qui correspond à ce jour-là; s'il est plus haut d'un millimètre, on porte l'observation sur la première parallèle, au-dessus de la ligne moyenne; s'il est plus bas, on porte l'observation au-dessous de la ligne, sur la parallèle qui lui correspond : on porte ainsi successivement les observations de tous les jours, chacune au rang et à la hauteur qui lui convient; on peut même, et cela est plus exact, répéter les observations plusieurs fois par jour, et les porter de même chacune à leur place, en divisant en parties égales l'intervalle qui correspond à un jour; et si, par tous les points ainsi déterminés, on fait passer une ligne qui les unisse, et qui en suive toutes les irrégularités, cette ligne, par ses ondulations, représentera fidèlement l'état du baromètre dans les époques successives où l'on aura observé. Or, à l'inspection d'un pareil tableau, on voit que, dans le plus grand nombre de cas, lorsque le baromètre a baissé, il est tombé de la pluie; et au contraire, lorsqu'il s'est élevé, le temps est devenu serein. On aperçoit, par intervalles, des exceptions à cette règle, mais elles sont beaucoup moins nombreuses que les cas dans lesquels elle se vérifie.

En comparant ainsi la série des hauteurs du baromètre observées dans deux lieux différens, même aussi éloignés l'un de l'autre que Paris et Clermont, ou Londres et Genève, on découvre dans les variations de la colonne de mercure une correspondance remarquable, qui suppose, dans le mouvement des couches atmosphériques, une sorte de simultanéité qu'on aurait eu peine à soupçonner. Cependant cette corres-

pondance est loin d'être toujours parfaite, sur-tout quant aux quantités absolues dont le mercure monte ou descend.

En comparant aussi entre elles une longue suite d'observations faites dans un même lieu, on s'aperçoit qu'à travers toutes les irrégularités accidentelles de leur marche, elles ont cependant une tendance générale qui les fait périodiquement monter ou descendre à différentes heures du jour. Par une longue suite d'observations de ce genre, M. Ramond a reconnu qu'en France le baromètre atteint son maximum de hauteur vers neuf heures du matin ; après quoi il descend jusque vers quatre heures du soir, où il atteint son minimum ; de là il monte de nouveau jusqu'à onze heures du soir, où il atteint de nouveau son maximum ; après quoi il redescend jusque vers quatre heures du matin, pour revenir à son maximum vers neuf heures. Cette marche est souvent dérangée dans nos climats d'Europe, où l'état de l'atmosphère est si variable ; mais sous les tropiques, où les causes qui agissent sur l'atmosphère sont plus constantes, la période l'est aussi, et à un tel degré que, suivant M. de Humboldt, on parviendrait presque à prédire l'heure à chaque instant du jour et de la nuit, d'après la seule observation de la hauteur du baromètre ; et, ce qui est extrêmement remarquable, comme l'a également constaté le même voyageur, c'est qu'aucune circonstance atmosphérique, ni la pluie, ni le beau temps, ni le vent, ni les tempêtes, n'altèrent la parfaite régularité de cette oscillation, qui se maintient la même en tout temps et dans toutes les saisons.

En transportant un même baromètre à diverses hauteurs au-dessus du niveau des mers, on voit le mercure s'abaisser dans le tube à mesure qu'on s'élève. Ainsi, la longueur moyenne de la colonne barométrique, que nous avons vue être de 76 centimètres, ou de 28 pouces au niveau de la mer, n'est plus guère que de 57 centimètres, ou 21 pouces, au sommet du Grand-Saint-Bernard : elle est plus petite au sommet du Mont-Blanc, parce qu'il est plus élevé, et on l'observe moindre encore quand on s'élève à des hauteurs plus grandes dans les voyages aériens. Cela vient de ce que, à

mesure qu'on s'élève, le baromètre se trouve déchargé du poids des couches d'air inférieures. La surface libre du mercure de la cuvette, ne supportant plus que le poids des couches d'air qui sont au-dessus d'elle, se trouve moins pressée qu'auparavant; par conséquent le mercure qui contre-balance cette pression dans le tube vide du baromètre, doit s'y élever à une moindre hauteur. Si la densité de l'air était la même à toutes les élévations, c'est-à-dire, si l'air contenait toujours, sous le même volume, la même quantité de matière pesante, il serait facile de calculer la loi suivant laquelle la colonne de mercure devrait diminuer à mesure qu'on s'élève; car lorsque le baromètre est à $0^m,760$, et la température de l'air à 0° , on trouve par expérience qu'il faut s'élever de $10^m,5$ pour faire baisser le mercure de 1 millimètre; de sorte que, dans ces circonstances, un cylindre de mercure d'un millimètre de hauteur pèse autant qu'un cylindre d'air de même base, et dont la hauteur serait de $10^m,5$ ou 10500 millimètres; c'est en effet ce que l'on confirme en pesant comparativement des volumes égaux d'air et de mercure, comme nous le verrons plus loin. Par conséquent, si les mêmes circonstances régnaient dans l'atmosphère à toutes les élévations, chaque millimètre, contenu dans la colonne barométrique $0^m,760$, répondrait à une hauteur d'air de $10^m,5$; et la hauteur totale de l'atmosphère serait égale à 760 fois $10^m,5$ ou 7980^m , environ 4000 toises; mais cette élévation est fort au-dessous de la réalité; car il y a sur la terre des montagnes presque aussi hautes que cette limite, par exemple, le Chimborazo en Amérique, et il s'en faut bien qu'elles atteignent les confins de l'atmosphère, puisque l'on voit souvent des nuages et même des oiseaux s'élever fort au-dessus de leurs sommets. L'erreur de notre calcul vient de ce que nous n'avons pas eu égard à une des propriétés physiques de l'air, qui est sa compressibilité. L'air est compressible, c'est-à-dire, qu'en pressant une masse d'air, on lui fait occuper des espaces successivement moindres; de plus, il est élastique, c'est-à-dire, qu'il tend à reprendre son volume primitif lorsqu'il a été comprimé. La constitution de l'atmosphère est un résultat

nécessaire de ces propriétés physiques, et il est aisé de l'en conclure. Puisque l'air est pesant, les couches inférieures sont plus comprimées que les supérieures dont elles supportent le poids. Mais, en vertu de leur élasticité, elles doivent résister à cette pression, et faire effort pour s'étendre. De là il résulte que la densité des couches inférieures de l'atmosphère doit surpasser de beaucoup celle des couches supérieures. Cela devient sensible sur les hautes montagnes, et lorsqu'on s'élève en aérostat à de grandes hauteurs, l'air devient si rare, que l'on a beaucoup de peine à respirer. Aussi, pour faire baisser le mercure d'un millimètre, il ne suffit plus alors de s'élever de 10^m,5; il faut une différence de niveau bien plus considérable, parce qu'un cylindre d'air de cette hauteur a réellement alors beaucoup moins de masse qu'il n'en aurait près de la surface de la terre. On a d'abord employé l'observation directe pour reconnaître la loi suivant laquelle s'opérait cette variation de poids. En portant successivement un même baromètre à des élévations connues, on a pu en tirer une règle assez sûre pour conclure, d'après les seules observations du baromètre et du thermomètre, la différence de niveau de deux stations. Mais ce résultat, très-utile à la géographie et à l'histoire naturelle, n'a pu être établi avec certitude que lorsqu'on a connu par l'expérience les causes physiques qui peuvent influencer sur la pression de l'air à diverses hauteurs, et qu'on a pu les soumettre au calcul. C'est ce que M. Laplace a fait; et l'on peut voir, dans le *Traité général*, la formule à laquelle il est parvenu. Je dois toutefois prévenir que ses résultats ne sont d'une entière certitude que lorsqu'on l'applique à des lieux assez voisins pour qu'on puisse les supposer soumis aux mêmes circonstances atmosphériques. A de plus grandes distances, par exemple de Paris au Havre, la comparaison des hauteurs barométriques donne des différences de niveau différentes selon la direction des vents régnans; mais, ce qui est fort remarquable, il paraît que l'on a une valeur exacte en prenant la moyenne des résultats qui répondent à des vents diamétralement opposés.

CHAPITRE VI.

Rapports du Baromètre et du Thermomètre.

JE viens de faire connaître les deux instrumens les plus utiles de la physique et de la chimie. J'ai expliqué leur construction, leur usage et leurs applications immédiates, c'est-à-dire les indications qu'ils nous donnent sur la température et sur la pression de l'air, soit dans un même lieu à des hauteurs diverses, soit à une même hauteur dans les différens climats. Nous allons maintenant les faire servir à l'examen rigoureux, et à la mesure précise de plusieurs phénomènes remarquables que nous n'avons fait qu'entrevoir.

J'ai dit qu'en plongeant un thermomètre dans un vase rempli d'eau pure, et faisant bouillir cette eau par le moyen du feu, le mercure du thermomètre se tenait toujours au même degré pendant tout le temps de l'ébullition. Il est facile d'en faire l'épreuve, et ce phénomène nous a donné un terme fixe de notre échelle thermométrique. Mais, si l'on répète l'expérience à différens jours, lorsque le baromètre indique des pressions de l'air sensiblement différentes, on trouve que ce terme n'est pas tout-à-fait le même; il est plus haut quand la pression atmosphérique est plus forte, et plus bas quand elle est plus faible. D'après cela, on doit s'attendre que, si la pression diminuait davantage, le degré de l'ébullition baisserait aussi de plus en plus. On peut vérifier cette induction en s'élevant sur des montagnes, et y faisant bouillir de l'eau à diverses hauteurs; car nous avons vu que le baromètre baisse à mesure que l'on s'élève ainsi: or, en faisant cette expérience, on trouve que la chose se passe réellement comme nous l'avions prévu. Si nous avons marqué par le nombre 100, le terme de l'eau bouillante à la surface de la terre, dans un moment où le baromètre marquait $0^m,76$, ce qui est la pression moyenne de l'atmosphère au niveau des mers, lorsqu'ensuite nous nous serons assez élevés pour que le baromètre ne marque plus que

75 centimètres, l'eau commencera à bouillir quand le thermomètre marquera moins de 100 degrés, et généralement il y aura une correspondance constante entre l'abaissement de ce degré et l'indication du baromètre. On peut déterminer le rapport de ces deux phénomènes, par des expériences faites ainsi à diverses hauteurs; et alors on prédit le degré de l'eau bouillante d'après l'élévation du baromètre, ou réciproquement l'élévation du baromètre d'après le degré où se fait l'ébullition de l'eau. On arrive à des résultats plus précis encore, et beaucoup plus généraux, par un autre procédé que j'indiquerai bientôt, et qui n'exige aucun déplacement. Pour le moment, je me bornerai à donner un résultat, que l'on peut regarder comme fondé uniquement sur l'expérience, et que l'on peut vérifier par elle, mais qui suffit pour régler complètement tous les thermomètres dans les lieux qui ne sont pas élevés de plus de quatre cents mètres (200 toises) au-dessus du niveau de la mer. Ce résultat consiste en ce que, quand la pression barométrique ne diffère pas beaucoup de 28 pouces de l'ancienne division, ou de 0^m,76 de la division métrique, une augmentation ou une diminution d'un pouce ou 27^{mm},07, dans cette pression, répond exactement à 1° de la division centésimale dans la température de l'ébullition de l'eau; c'est-à-dire, par exemple, que si la pression, au lieu d'être de 28 pouces, est de 27, le terme de l'ébullition, au lieu d'être à 100°, répondra à 99°; de manière que si l'on veut régler un thermomètre dans cette circonstance, et qu'on y ait marqué le point de l'ébullition, ainsi que celui de la glace fondante, il faudra diviser l'intervalle en 99 parties pour avoir des degrés centésimaux, ou pour que le thermomètre marque 100° dans l'eau bouillante, quand le baromètre sera à 28 pouces. Le contraire arriverait si le baromètre était à 29 pouces; alors le terme de l'ébullition serait à 101°; il faudrait donc diviser en 101 parties l'intervalle compris entre ce point et le terme de la glace fondante.

On ne peut trop rappeler que, pour faire ces expériences avec exactitude, il faut se servir d'eau distillée ou d'eau de pluie, ou d'eau de neige, parfaitement pures; car presque

toutes les eaux de rivière ou de fontaine contiennent en dissolution des sels qui, par leur combinaison avec elles, retardent leur ébullition.

Quand on fait bouillir de l'eau sur les montagnes, il se passe encore un autre phénomène dont il est bon d'être prévenu ; c'est que, à mesure que l'on s'élève, il devient plus difficile de faire bouillir l'eau, quoiqu'elle bouille cependant à des degrés du thermomètre plus bas qu'à la surface de la terre : cela tient à la difficulté qu'il y a d'entretenir le feu qui sert à la faire bouillir. L'air, à mesure qu'on s'élève, devient *plus rare*, c'est-à-dire, qu'il a moins de masse sous le même volume. Or, un des principes constituans de l'air que l'on nomme l'*oxygène*, est l'aliment unique et essentiel de la combustion, ou plutôt le phénomène que nous appelons *combustion*, n'est autre chose que la combinaison qui se fait de ce principe avec les corps combustibles ; c'est ce que les chimistes prouvent d'une manière non douteuse. Lorsque nous soufflons le feu, nous ne faisons autre chose que diriger, sur les corps combustibles, une plus grande masse de cet oxygène contenu dans l'air. Venons maintenant à l'application : puisqu'en s'élevant dans l'atmosphère, l'air devient de plus en plus rare, il faut en souffler, en amener un plus grand volume sur le même point, pour qu'il y ait réellement la même masse d'oxygène ; par conséquent, à volume égal, il doit fournir au feu un aliment moins actif, et la difficulté de l'entretenir doit augmenter avec la hauteur.

D'après ce que nous venons de dire sur la variabilité de la température nécessaire à l'ébullition de l'eau, on pourrait, par analogie, penser que le terme de la glace fondante, qui forme l'autre extrémité de l'échelle, doit pareillement changer avec la pression barométrique ; mais les expériences les plus précises n'y font pas apercevoir la plus légère variation, même sur les plus hautes montagnes, même dans un espace entièrement vide d'air. Il faut seulement distinguer, comme nous l'avons dit, le terme de la glace fondante qui est fixe, d'avec celui de la congélation qui ne l'est pas constamment.

CHAPITRE VII.

Lois de la condensation et de la dilatation de l'Air et des Gaz, sous des pressions diverses, à une même température.

LES expériences que nous venons de faire nous ont appris que les couches d'air situées à la surface de la terre sont pressées par tout le poids des couches supérieures. Ce poids, sur chaque unité de surface, peut être regardé comme équivalent à celui d'une colonne de mercure qui aurait cette surface pour base, et dont la hauteur moyenne au niveau des mers serait $0^m,76$. Maintenant qu'arriverait-il à une masse d'air, si elle était pressée par un poids plus considérable? D'après ce que nous avons reconnu de la compressibilité de l'air, nous devons nous attendre qu'elle se condenserait et se retirerait sur elle-même, de manière qu'elle occuperait un espace moindre qu'auparavant; mais quelle serait la loi de ces condensations, et quel rapport existe-t-il entre le volume d'une masse d'air, et la pression qui pèse sur elle? C'est une question bien importante et dont les applications reviennent sans cesse, comme nous le verrons dans tout le cours de cet ouvrage; il nous faut donc recourir à l'expérience pour la décider.

On y parvient aisément de la manière suivante, qui est due à Mariotte : prenez un tuyau de verre cylindrique et recourbé ABC, *fig.* 22, fermé par le bout C, et ouvert par l'autre; versez-y un peu de mercure, jusqu'à la ligne horizontale DE, afin que l'air, enfermé dans la branche la plus courte CE, ne soit ni plus ni moins pressé que celui qui est dans la longue branche AD, qui communique avec l'atmosphère. Il faut d'ailleurs que celle-ci soit beaucoup plus longue que l'autre. Le mercure étant donc ainsi, de part et d'autre, à la même hauteur DE, et la communication entre les deux branches étant interrompue, versez par le bout A, avec un petit entonnoir de verre, une nouvelle quantité de mercure,

en prenant garde de ne point faire entrer de nouvel air dans l'espace CE. Vous remarquerez alors que le mercure montera peu-à-peu vers C, et condensera ainsi l'air qui était en CE; mais il montera beaucoup moins dans cette branche que dans la branche ouverte. Si la longueur de EC est, par exemple, de 32 centimètres, et que l'air s'y trouve réduit à n'occuper plus que la moitié de cet espace, c'est-à-dire, 16 centimètres, ce qui élèvera la surface du mercure jusqu'en F, menez une ligne horizontale FG : vous trouverez que le mercure, dans l'autre branche, est monté au-dessus de cette ligne d'une quantité GH, précisément égale à la hauteur du mercure dans le baromètre au moment de l'observation; en sorte que l'air contenu dans l'espace CF est pressé par le poids de l'atmosphère qui pèse sur H, et par le poids d'une autre atmosphère représentée par la colonne de mercure HG; car il ne faut compter pour rien les deux colonnes égales GD, FE, qui, par cela même qu'elles sont égales, se font mutuellement équilibre. Cette double pression, qui s'exerce en G, réduit donc l'air CE à la moitié de son volume. Si l'on ajoute de nouveau du mercure dans la longue branche, l'air contenu dans la plus petite se condensera encore davantage; et, quand il sera réduit au tiers de son volume, ce qui amènera la surface du mercure dans cette branche à la hauteur F', si l'on mène la ligne horizontale F'G', on trouvera que le mercure, dans la longue branche, est élevé au-dessus de cette ligne d'une quantité G'H', double de GH, c'est-à-dire, égale au poids de deux atmosphères; ce qui joint avec le poids de l'atmosphère extérieure qui pèse sur H', forme en tout un poids égal à celui de trois atmosphères qui pèsent sur l'air CF'; et cette triple pression réduit, comme on voit, l'air CE au tiers du volume qu'il occupait d'abord. En général, quelque loin que l'on pousse l'expérience, on trouvera toujours que le volume auquel se réduit l'air contenu dans la plus petite branche est inversement proportionnel au poids dont il est chargé. Ainsi en partant de son volume initial, quand il ne supporte que le poids de l'atmosphère marqué par la hauteur actuelle du mercure dans le baromètre, on pourra prévoir d'avance à

quoi ce volume devra se réduire pour toute autre pression donnée, qui serait mesurée de même par la somme totale des colonnes de mercure comprimantes.

On doit maintenant sentir pourquoi nous avons recommandé que la branche CE fût cylindrique. C'était afin que des longueurs égales, comptées sur cette branche, répondissent à des volumes d'air égaux entre eux, ce qui rend la loi plus évidente et l'expérience plus facile à exposer. Mais comme il est difficile de trouver des tubes qui satisfassent exactement à cette condition, il faut savoir y suppléer. On y parvient en divisant d'abord la branche CE, en parties de capacités égales, selon la méthode qui a été expliquée page 173. Alors on trace, sur le tube même, des divisions correspondantes à ces capacités, et l'on évalue le volume de l'air dans toutes les périodes de l'expérience, d'après le nombre qu'il occupe de ces divisions. Il est inutile de faire la même chose pour la longue branche, et il n'est pas même nécessaire de chercher à ce qu'elle soit cylindrique, parce que la pression verticale d'un fluide pesant ne dépend pas de la largeur du vase qui le renferme, mais seulement de la hauteur verticale de la colonne fluide. Ainsi, après avoir divisé CE en parties de capacités égales, on n'a plus besoin que d'appliquer à l'appareil une division verticale, qui permette de mesurer exactement la différence de niveau du mercure dans ses deux branches. Pour cela, rien n'est plus simple que d'attacher le tube recourbé ABC sur une planche divisée en millimètres, et munie d'un curseur vertical.

Afin que l'expérience soit tout-à-fait rigoureuse, et que la réciprocité des volumes aux pressions soit exactement telle que nous l'avons annoncée, il faut encore observer une condition essentielle; c'est que l'air renfermé dans CE soit parfaitement sec, et que le tube CE lui-même soit exactement desséché; car la vapeur aqueuse, qui pourrait se trouver mêlée à cet air, ou qui s'exhalerait des parois du tube, ne se comprime pas par la pression suivant les mêmes lois que l'air, comme nous le verrons par la suite; et par conséquent son

mélange altérerait l'exactitude des effets qui conviennent à l'air seul. Afin d'exclure cette cause d'erreur, il faut d'abord chauffer fortement le tube pour le dessécher ; puis on le fera communiquer, pendant plusieurs jours, comme le représente la *fig.* 23, avec l'intérieur d'un récipient RR, que l'on posera sur du mercure bien sec, et sous lequel on mettra du muriate de chaux ou d'autres sels susceptibles d'attirer l'humidité. Quand on pensera que l'air contenu dans le récipient et le tube est suffisamment desséché, on retirera ces sels ; on fermera l'orifice inférieur du récipient avec une plaque de verre plane et dépolie, que l'on glissera sous le mercure ; puis en retournant l'appareil, le peu de mercure qui sera resté sous la cloche tombera dans le tube, et empêchera toute communication entre les deux branches AD, CE, de sorte que l'air sec contenu dans la plus courte ne pourra plus s'humecter. Cela fait, on séparera le tube de la cloche. On mesurera la différence primitive du mercure dans les deux branches, et on continuera l'expérience comme précédemment. Avec ces précautions, la loi énoncée par Mariotte se vérifie dans toutes les limites de pression que l'on a pu jusqu'ici atteindre.

En introduisant ainsi le mercure, il pourra se trouver quelquefois un peu plus haut dans la longue branche que dans la plus courte, par exemple, en D' dans la première, et en E' dans la seconde, *fig.* 24. Alors on mènera la ligne horizontale E' d', et on mesurera la différence de niveau D' d', ou ce qui revient au même, on la lira sur la division de l'instrument. Ajoutez cette différence à la hauteur actuelle du mercure dans le baromètre, la somme exprimera la pression totale que supporte l'air enfermé en C' E'. Ainsi, on pourra conclure le volume que ce même air aurait dû occuper sous la pression atmosphérique seule, en augmentant C' E' proportionnellement au rapport des deux pressions. Ce volume initial une fois connu, l'expérience pour tous les autres cas s'achèvera comme précédemment.

Le même appareil servirait également pour éprouver tous les autres gaz ; il suffirait de remplir le récipient RR avec ces

gaz, au lieu de le remplir d'air (1). A la vérité, l'air atmosphérique, qui resterait encore dans le tube, se mêlerait avec le gaz; mais on en affaiblira l'influence en employant un récipient dont le volume soit considérable relativement à celui du tube; et même, sans cette précaution, il n'en résultera absolument aucune erreur; car, en faisant l'expérience, on trouve que le mélange d'air et d'un gaz sec se condense, par la pression, absolument comme l'air seul; ce qui prouve incontestablement que la loi observée n'est pas particulière à l'air, mais qu'elle est la même pour tous les gaz secs.

L'expérience précédente ne nous fait connaître cette loi que pour des pressions plus fortes que celle de l'atmosphère; mais subsisterait-elle encore pour des pressions moindres? Afin de l'éprouver, prenez un tube de verre dont le diamètre n'excede pas deux millimètres; et, après l'avoir divisé en parties de capacités égales, introduisez-y une petite colonne de mercure. Cette colonne, à cause du peu de largeur du tube, ne se séparera pas pour laisser échapper l'air renfermé; et si vous relevez verticalement le tube, de manière qu'elle se trouve au-dessus de cet air, elle le comprimera par son poids. Au contraire, si vous renversez le tube, en tenant en bas la partie ouverte, la colonne de mercure descendra; mais, si vous l'avez bien proportionnée, elle ne sortira pas du tube, et elle s'arrêtera

(1) Le procédé que l'on emploie pour remplir un récipient de gaz, est connu de tous ceux qui ont vu un laboratoire de chimie. L'on remplit d'abord le récipient d'eau ou de mercure. Il faut que ce soit de mercure quand on veut que le gaz soit sec. Cela fait, on bouche son orifice, on le renverse comme un tube de baromètre; et on le plonge, par cet orifice, dans une cuve remplie du même liquide. La pression de l'air extérieur soutient le liquide introduit dans le récipient, comme elle soutient le mercure dans le baromètre; et il ne s'y fait pas de vide, tant que la hauteur du liquide ne contre-balance pas complètement cette pression. On prend alors un flacon rempli de gaz, on le plonge dans le mercure avant de l'ouvrir; on l'ouvre en tenant son orifice en bas. On approche cet orifice sous celui du récipient où l'on veut introduire le gaz; on incline le flacon, et le gaz s'élevant à travers le liquide, va remplacer celui dont le récipient était rempli. C'est, comme on voit, une application de l'expérience de Torricelli.

à un certain terme. Par-là, vous verrez que l'air intérieur a perdu de son ressort en se dilatant ; car puisque la colonne de mercure s'arrête dans sa chute, c'est que son poids, plus le ressort de l'air intérieur, font alors équilibre au poids de l'atmosphère. Vous pourrez donc ainsi évaluer ce ressort, en observant les divisions auxquelles la colonne de mercure s'arrête dans les deux positions opposées du tube, lorsqu'elle pèse sur l'atmosphère ou sur l'air intérieur ; et vous verrez ainsi que le volume de l'air contenu dans le petit tube, est toujours réciproquement proportionnel aux poids dont il est chargé ; de même que nous l'avions trouvé pour les pressions plus fortes que le poids de l'atmosphère.

Si l'on voulait comparer ces volumes à celui que la même masse d'air occuperait, en la supposant pressée par le seul poids de l'atmosphère, la chose serait bien facile ; il suffirait pour cela de mettre le tube dans une situation horizontale. Alors la colonne de mercure qu'on y aurait introduite serait uniquement supportée par les parois du tube ; elle ne peserait plus ni sur l'air intérieur ni sur l'atmosphère ; ainsi la pression atmosphérique seule déterminerait le volume de l'air intérieur. En réduisant ce volume proportionnellement aux pressions, pour les deux premiers cas dans lesquels la petite colonne de mercure pèse en dedans ou en dehors, on retrouverait les espaces occupés par l'air intérieur dans ces deux suppositions. Cette manière simple de faire l'expérience sur l'air dilaté est de M. Dalton. Pour que la loi à laquelle elle conduit s'observe avec rigueur, il faut ici, comme dans les premières expériences, que le tube et l'air intérieur soient l'un et l'autre parfaitement desséchés. On peut imaginer pour cela divers moyens analogues à celui que nous venons d'indiquer tout-à-l'heure, et nous en exposerons bientôt un très-simple en traitant de la dilatation des gaz. J'insiste sur cette précaution, parce qu'il faut se faire une loi de ne négliger jamais aucune des circonstances qui peuvent rendre les expériences plus précises ; car si l'on répétait celles que nous venons de décrire, avec de l'air ordinaire, sans aucune préparation, on n'y trouverait que des erreurs qui paraîtraient sans doute peu consi-

dérables, et que l'on serait tenté d'attribuer aux incertitudes mêmes des observations ; c'est ce qui est arrivé à Boyle et à Mariotte, qui firent les premiers ces expériences ; et les différences occasionnées par l'humidité de l'air, qui dûrent nécessairement se présenter à eux, ne les empêchèrent pas de reconnaître la loi générale qui unissait les résultats. Cependant ils se seraient aperçus de quelques écarts dans cette loi, s'ils eussent opéré d'une manière plus exacte ; et ces écarts disparaissent pour nous qui les connaissons, parce que nous en connaissons aussi la cause, et que nous savons les corriger.

Pour ne rien omettre, je dois dire encore que les expériences sur la compression et la dilatation de l'air ne seraient pas tout-à-fait exactes si on les faisait succéder les unes aux autres avec une grande rapidité ; car, en comprimant l'air, il se développe de la chaleur : en le dilatant il se produit du froid ; et cette chaleur ou ce froid augmente ou diminue son volume sous la même pression. Ces causes accidentelles influeraient donc sur le volume de l'air d'une manière étrangère aux phénomènes que l'on considère, si on ne leur laissait pas le temps de se dissiper ; et il suffit pour cela de quelques instans.

On peut encore rendre sensible la loi de Mariotte sur l'air dilaté, au moyen de l'expérience suivante, qui est due à ce physicien, et dont les résultats sont d'une application très-fréquente. Prenez un tube de baromètre, divisé en parties de capacités égales ; remplissez-le, dans une certaine portion de sa longueur, de mercure que vous y ferez bouillir comme si vous vouliez faire un baromètre ; puis redressez-le verticalement, le bout fermé en bas, et observez combien l'air qui reste au-dessus du mercure occupe de divisions. Observez en même temps la hauteur du baromètre, qui indique la pression de l'atmosphère. Alors bouchez votre tube avec le doigt ou avec un verre dépoli ; renversez-le et plongez-le par le bout ouvert dans un vase rempli de mercure. Dans ce mouvement, l'air montera au sommet du tube, et lorsque vous ôterez le doigt qui s'opposait à son ressort, il se dilatera et abaissera la colonne de mercure intérieure, au-dessous de ce qu'elle serait

dans un tube barométrique dont le sommet serait vide d'air. Enfin, après plusieurs oscillations, la colonne intérieure s'arrêtera, et s'arrêtera en un point tel que le ressort de l'air intérieur, affaibli par sa dilatation, plus le poids de la colonne de mercure qui reste encore dans le tube, fassent équilibre au poids de l'atmosphère. D'après cette condition et la loi de Mariotte, il est facile de calculer la hauteur à laquelle la colonne de mercure doit s'arrêter, et l'observation y est tout-à-fait conforme.

Aujourd'hui que la loi de Mariotte est bien prouvée par l'expérience, on n'a plus besoin de la vérifier ainsi, et on l'emploie comme un fait, soit pour calculer les volumes que doit prendre une même masse d'air, successivement exposée à des pressions diversés, soit pour réduire à une pression constante des volumes d'air observés sous diverses pressions. Ces réductions sont nécessaires dans une infinité d'expériences. Si l'on a, par exemple, recueilli sous un tube barométrique un certain volume CH d'un gaz, *fig.* 25, on ne peut pas se borner à dire que ce gaz occupait le volume CH; il faut encore dire à quelle pression il était alors soumis. Cela se peut faire d'abord assez souvent par l'expérience; il suffit pour cela d'enfoncer le tube dans le mercure, jusqu'à ce que le niveau intérieur H égale le niveau extérieur AB. Alors l'air intérieur ne se trouve plus comprimé que par la pression extérieure de l'atmosphère; le volume qu'il occupe dans le tube sera donc exactement défini, pourvu que l'on indique en même temps sa température, et la hauteur BP du mercure dans le baromètre au même instant; ou bien encore on pourra le réduire, par le calcul, à une pression constante, par exemple, à celle de $0^m,76$, en le multipliant par le rapport de la pression atmosphérique actuelle à $0^m,76$. Cette réduction servira pour ramener à des circonstances pareilles tous les volumes observés.

Mais il peut se présenter des cas où il est impossible de ramener ainsi, par expérience, le volume intérieur jusqu'au cas de l'égalité de niveau. Cela aura lieu, par exemple, si la cuve dans laquelle le tube plonge n'est pas suffisamment profonde.

Dans ce cas, le calcul vient à notre aide ; car alors on peut observer l'espace CH occupé par le gaz, la hauteur AH du mercure intérieur au-dessus du niveau de la cuvette, et enfin la pression atmosphérique actuelle, mesurée par la hauteur BP du mercure dans le baromètre. Retranchant AH de cette hauteur, la différence BP — AH exprime la pression véritable, à laquelle l'air intérieur fait réellement équilibre. Ainsi, ayant mesuré son volume actuel CH, on pourra le ramener, par le calcul, à toute autre pression, par exemple, à la pression constante de $0^m, 76$, ce qui rendra toutes les observations de ce genre comparables. Remarquons bien que, dans ces expériences, il n'est nullement nécessaire que le tube CH soit cylindrique ; il suffit qu'il soit divisé sur sa longueur en parties de capacités égales et que l'on mesure la hauteur AH, avec une règle divisée, ou mieux encore par une échelle de parties égales tracée sur ses parois extérieures.

Ce que nous venons de dire, pour le mercure, s'applique également à l'eau ; seulement, comme l'eau est environ treize fois et demie moins pesante que le mercure, il faut diviser la hauteur AH par 13,5, pour la comparer à la colonne barométrique. Mais ordinairement quand on opère sur une cuve pleine d'eau, on peut établir le niveau par expérience, et cela évite toute réduction.

Dans tous les calculs que nous venons de faire sur les divers volumes que peut prendre une même masse d'air ou de gaz, nous avons supposé qu'elle restait toujours à la même température. Cette condition était nécessaire ; car la seule variation de température d'un gaz fait varier son volume, la pression restant constante. Nous examinerons plus tard, par l'expérience, les lois de la dilatation dues aux seules variations de la température ; et, en les combinant avec les résultats que nous venons d'obtenir, nous en concluons ce qui doit arriver quand la pression et la température varient à-la-fois ; mais il nous manque encore beaucoup de données avant de pouvoir tenter la solution de ce problème. Ici nous nous bornerons à dire que, *quelle que soit la température, pourvu qu'elle soit constante, si l'on soumet une même masse d'air ou de gaz secs*

à des pressions diverses et successives, les volumes qu'elle occupe sont toujours réciproques à ces pressions. Ce résultat est d'un continuel usage en physique et en chimie.

CHAPITRE VIII.

Des Pompes à liquides et à gaz.

QUOIQUE le calcul des pompes appartienne à la mécanique, cependant comme leurs propriétés dépendent du ressort de l'air, et sont d'un fréquent usage, je vais en donner ici une idée succincte.

L'espèce de pompe, que l'on appelle aspirante, est composée d'un petit canal *AH*, *fig. 26*, joint à un autre canal plus gros, appelé corps de pompe, et représenté par *AB*. Au-dedans de celui-ci, par le moyen de la verge *MV*, on fait monter et descendre un piston *P*, qui est ordinairement un cylindre de bois ou de métal, arrondi au tour, revêtu d'étoupes, et qui remplit exactement la capacité intérieure du corps de pompe *AB*. Il y a une soupape *S* à la jonction des deux tuyaux *AB*, *AH*, et une autre *S'* dans le piston *P*. La disposition de ces soupapes est telle que celle qui est marquée de la lettre *S* s'ouvre naturellement et facilement pour donner passage à tout ce qui tend à entrer dans le corps de pompe *AB*; mais du moment où elle cesse d'être ainsi soulevée, elle retombe par son propre poids et se ferme exactement; de sorte que si quelque chose tend à sortir du corps de pompe, elle lui bouche absolument le passage. L'autre soupape qui est marquée de la lettre *S'* s'ouvre dans le même sens et de la même manière que la précédente, pour donner passage à tout ce qu'il y a dans le corps de pompe sous le piston *P*, et qui tend à passer au-dessus; mais cette même soupape se referme si exactement d'elle-même par son poids, qu'elle bouche absolument le passage à tout ce qu'il y a dans le corps de pompe au-dessus du piston *P*, et qui tendrait à revenir au-dessous.

Concevons maintenant qu'ayant abaissé le piston *P* jusqu'au

fond du corps de pompe AB, on enfonce dans l'eau la partie inférieure du tuyau AH. Alors, si l'on élève le piston dans le corps de pompe, par exemple, jusqu'en B, il se fera un vide sous ce piston. L'air intérieur au tuyau AH se dilatera pour le remplir, et sa force élastique diminuée par cette dilatation, se trouvant moindre que la pression extérieure de l'atmosphère, celle-ci fera monter dans le tuyau AH, et peut-être même dans le corps de pompe, une colonne d'eau dont le poids compensera cet affaiblissement. Supposons que ce dernier cas ait lieu, et qu'il entre réellement une certaine quantité d'eau dans le tuyau AB. Cette eau, une fois entrée, n'en pourra plus sortir; car la soupape S lui interdira le retour, en se fermant par son propre poids. Donc, si l'on redescend le piston P jusque dans cette eau, elle souleva la soupape S', et passera au-dessus du piston; mais une fois arrivée là, elle ne pourra plus redescendre, parce que la soupape S', en se fermant, lui interdira le passage. Si donc on élève le piston de nouveau, on souleva cette eau qui a passé au-dessus de lui; mais en même temps il se fera de nouveau un vide au-dessous. Une nouvelle quantité d'eau montera donc dans le corps de pompe AB, et s'y trouvera de même renfermée par le jeu de la soupape S. Cette quantité d'eau s'élèvera ensuite au-dessus du piston P quand celui-ci sera abaissé; et, par l'effet de ce jeu alternatif, la quantité d'eau ainsi élevée au-dessus du piston augmentant toujours, finira par arriver jusqu'à l'orifice O, percé latéralement dans le corps de pompe, par lequel elle s'écoulera.

On conçoit que, dans ces sortes de pompes, il ne faut pas que la hauteur de la soupape S au-dessus du niveau de l'eau qui entoure le tuyau AH, surpasse $10^m,4$, environ 32 pieds; car, au-delà de cette limite, on aurait beau faire le vide en S dans le corps de pompe, en élevant le piston, l'eau ne pourrait jamais arriver jusque-là, puisque la pression ordinaire de l'atmosphère ne peut l'élever que jusqu'à $10^m,4$, environ 32 pieds de hauteur. Mais, ce cas excepté, si une fois l'eau arrive au-dessus de la soupape S, et passe par-dessus le piston P, en quelque petite quantité que ce puisse être, on pourra

ensuite la faire monter à telle hauteur que l'on voudra en élevant le piston qui la porte.

La pompe que l'on appelle foulante, est composée d'un tuyau ou corps de pompe AB , *fig.* 27, percé, dans sa partie inférieure, de plusieurs petits trous *ttt*. Ce tuyau communique avec le canal ACS' , au dedans duquel se trouve une soupape S' , qui s'ouvre pour donner passage à tout ce qui tend à sortir du corps de pompe AB , mais qui, lorsqu'elle cesse d'être soulevée, se ferme très-exactement par son poids, et ferme le passage à tout ce qui tend à sortir du tuyau OS' , pour rentrer dans le corps de pompe. La base AA de ce dernier est toujours plongée dans l'eau, à une certaine profondeur. C'est pourquoi, quand on tire le piston P qui remplit exactement la capacité intérieure de cette base, l'eau s'y introduit par les petits trous *t*; mais, en abaissant le piston, et pressant cette eau, plus vite qu'elle ne peut fuir, elle est contrainte de monter en partie dans le canal ACS' , en soulevant la soupape S' , laquelle, se refermant aussitôt, l'empêche ensuite de redescendre dans le corps de pompe AB ; ainsi, à force d'élever et d'abaisser le piston, il entre toujours de nouvelle eau dans le corps de pompe, et il en monte toujours de nouvelle dans le canal ACS' ; de sorte qu'enfin l'eau se trouve assez élevée pour s'écouler par l'orifice O pratiqué dans ce canal, à telle hauteur que l'on voudra.

La troisième espèce de pompe est composée d'un petit tuyau AH , *fig.* 28, joint au corps de pompe AB . Celui-ci communique avec le canal $DS'O$, au dedans duquel il y a une soupape S' , qui s'ouvre pour donner passage à tout ce qui tend à sortir du tuyau AB , et se ferme pour boucher le passage à tout ce qui tend à y rentrer. Il y a encore une autre soupape S , à la jonction du petit tuyau AH avec le corps de pompe; celle-ci s'ouvre pour donner passage à tout ce qui tend à entrer dans le corps de pompe, et se ferme pour boucher le passage à tout ce qui tend à en sortir.

Cette troisième espèce de pompe est appelée composée, parce qu'elle réunit les effets des deux précédentes. Lorsqu'on élève le piston P , il se fait un vide au-dessous de lui,

comme dans la pompe aspirante ; et l'eau et l'air du tuyau AH entrent dans le corps de pompe AB, en soulevant la soupape S; mais dès que l'on cesse d'élever le piston, cette soupape se ferme et empêche l'eau de redescendre dans le tuyau AH. Alors, si l'on abaisse le piston, et qu'on le presse sur cette eau, comme dans la pompe foulante, il la contraint de monter, toute entière, dans le canal DS'O, en soulevant la soupape S'; celle-ci, bientôt après, se fermant par son propre poids, quand la force qui pressait le piston s'arrête, empêche l'eau élevée au-dessus de S' de rentrer dans le corps de pompe AB. Alors, en élevant de nouveau le piston, une nouvelle quantité d'eau entre dans le corps de pompe, puis passe dans le canal DS'O, et s'élève au-dessus de S' quand on abaisse le piston; de sorte qu'en continuant ce jeu alternatif, on peut enfin élever l'eau, dans ce canal, jusqu'à la hauteur de l'orifice O, par lequel elle doit s'écouler.

Les idées que nous venons d'exposer feront aisément concevoir ce que nous avons à dire sur le mécanisme des pompes à air, que l'on nomme *machines pneumatiques*. Pour faire monter l'eau dans les corps de pompe, nous avons employé une force extérieure, qui était la pression de l'atmosphère; pour faire sortir l'air d'un récipient fermé de toutes parts, nous nous servons de la force intérieure par laquelle cet air lui-même tend à se dilater, lorsqu'on lui ouvre une communication avec un espace vide.

Supposons que le récipient B, *fig.* 29, dont nous voulons épuiser l'air ou tout autre gaz, soit muni d'un robinet très-juste R, qui puisse s'ouvrir et se fermer à volonté, de manière à permettre ou à empêcher la communication de l'air extérieur avec l'intérieur du récipient. Vissons celui-ci à un cylindre AB, qui sera un véritable corps de pompe, dans lequel un piston très-juste P pourra monter et descendre au moyen de la tige T. A l'extrémité de ce corps de pompe, qui communique au récipient, ajustons un second robinet R', pareil au premier, travaillé avec le même soin, et qui puisse également, selon qu'il s'ouvre ou se ferme, permettre ou empêcher la communication de l'intérieur du corps de pompe

avec l'air extérieur. Les choses étant ainsi disposées, et le robinet R étant fermé, ouvrons le robinet R', et abaissons le piston P jusqu'en AB. L'air contenu dans la capacité de ce cylindre sortira par le robinet R'; fermons alors ce robinet et ouvrons au contraire celui du récipient. Maintenant, si nous élevons de nouveau le piston P, il se formera un vide au-dessous de lui, puisque tout accès est interdit à l'air extérieur. Par conséquent le gaz contenu dans le ballon B, se dilatera pour remplir ce vide, et passera en partie dans le corps de pompe : alors fermons le robinet R. Cette portion de gaz ne pourra plus rentrer dans le ballon. Pour la chasser aussi du corps de pompe, nous n'avons qu'à ouvrir de nouveau le robinet R', et abaisser le piston jusqu'en AB. Cela fait, nous fermerons R' de nouveau, et nous nous trouverons précisément dans les mêmes conditions qu'au commencement de l'expérience, avec cette différence unique, mais importante, que le récipient B aura déjà été vidé d'une partie du gaz qu'il contenait. En opérant donc une seconde fois de la même manière, on extraira une nouvelle portion de ce gaz; et en répétant de nouveau la même manœuvre un grand nombre de fois, on devra l'épuiser presque entièrement.

La nécessité de fermer et d'ouvrir successivement les deux robinets R, R', rendrait cette opération assez pénible; mais le principe étant ainsi trouvé, il est bien facile de le perfectionner. D'abord, nous pouvons remplacer le robinet R' par une soupape S, placée dans l'intérieur du piston P lui-même, et tellement ajustée qu'elle s'ouvre lorsque l'air intérieur la soulève pour sortir du corps de pompe, et qu'elle se ferme par son propre poids, ou par l'action d'un petit ressort dès que cet air cesse de la soulever, *fig* 30. Cela fait, quand on voudra commencer l'expérience, le robinet R étant fermé, on commencera par abaisser le piston dans le corps de pompe; l'air intérieur, comprimé par lui, soulèvera la soupape S, et il sera exclu entièrement quand le piston sera descendu jusqu'en AB. Alors, si l'on ouvre le robinet R, et qu'on soulève le piston, il se fera un vide au-dessous de lui, comme dans l'expérience précédente; et le gaz contenu

dans le récipient B se dilatera pour le remplir. Mais ce gaz ne pourra soulever la soupape S, parce que, étant dilaté, sa force élastique est moindre que la pression extérieure de l'atmosphère qui pèse sur cette même soupape de dehors en dedans. Ainsi, en fermant le robinet R, et abaissant de nouveau le piston jusqu'en AB, on chassera tout le gaz qui s'était répandu dans le corps de pompe; et par une suite d'opérations semblables, on finira par épuiser presque entièrement le gaz que le récipient renfermait.

Il faut maintenant nous exempter du robinet R : on emploie pour cela divers moyens; mais en voici un imaginé par Fortin, et qui est aujourd'hui le plus généralement adopté. Il est représenté *fig.* 31 : le piston est traversé par une tige de cuivre *tt'*, le long de laquelle il monte et descend, avec un frottement assez ferme pour ne pas laisser de passage à l'air. Lorsque le piston descend vers AB, cette tige descend d'abord avec lui, et elle porte à son extrémité inférieure un bouchon *b*, qu'elle va justement appliquer à l'orifice *o*, par lequel le corps de pompe communique avec le récipient. Arrivée à ce point, elle s'arrête par la résistance du plan AB, et le piston surmontant le frottement qu'elle lui oppose, continue à descendre comme à l'ordinaire. Maintenant, quand on relève le piston, il enlève aussi la tige *tt'* et le bouchon *b*, et il l'élèverait ainsi avec lui indéfiniment; mais, après qu'il l'a déplacé seulement de la quantité nécessaire pour déboucher l'orifice *o*, l'autre bout de la tige *t'* rencontre la partie supérieure A'B' du corps de pompe, et par conséquent s'arrête : alors le piston continue à monter à frottement le long de la tige, et le bouchon *b* reste toujours très-près de l'orifice *o*, comme nous l'avions supposé d'abord. Au moyen de cette disposition, on peut laisser le robinet R du récipient constamment ouvert, aussi long-temps que l'on fait jouer la pompe; l'orifice *o* sera toujours ouvert quand on élèvera le piston dans le corps de pompe, ce qui y fera le vide, et il se trouvera constamment fermé quand le piston s'abaissera. C'est précisément l'effet alternatif que nous obtenions en fermant et ouvrant successivement le robinet R du récipient qui con-

tient le gaz. L'opération terminée, on fermera ce robinet ; et on enlèvera le récipient. Je profite de cette occasion pour faire remarquer que, dans toutes les machines, de quelque nature qu'elles puissent être, il faut toujours faire en sorte que tous les mouvemens secondaires, qui se répètent souvent, soient ainsi conduits et dirigés par le moteur principal.

Nous avons supposé jusqu'ici que le récipient où nous voulions faire le vide avait un col très-étroit ; mais il arrive souvent que l'on a besoin d'effectuer le vide dans un espace assez large, pour que l'on puisse y introduire commodément différens corps. A cet effet, on adapte au corps de pompe un tuyau recourbé C, *fig.* 32, terminé par un plan de glace horizontal GG, dressé avec beaucoup de soin ; on pose sur cette glace une cloche R, dont les bords ont été usés à l'émeri. Si la glace a été bien dressée, et si elle est dépolie, un peu d'huile, ou quelque autre corps gras, inséré entre elle et les bords de la cloche, suffira pour maintenir le contact, de manière qu'en faisant jouer le piston P, on fera le vide dans la capacité R. Toutefois il est bon de tenir la cloche pressée contre la glace pendant les premiers instans de l'opération : mais après quelques coups de piston cette pression devient inutile, parce que celle de l'atmosphère y supplée, n'étant plus contre-balancée comme auparavant par le ressort de l'air intérieur. Lorsqu'on veut éprouver l'effet du vide sur certaines substances, on commence par les placer sur le plateau de glace GG, on les recouvre avec la cloche R, et on fait le vide. Cependant, comme on peut aussi avoir besoin de faire le vide dans des récipients à col étroit, on termine le tuyau C par une vis V, qui s'élève un peu au-dessus du plateau de glace, et l'on y visse les ballons dans lesquels on veut faire le vide, au lieu de les appliquer immédiatement à l'orifice o, comme nous l'avions d'abord supposé.

On peut remarquer qu'à mesure que l'air intérieur au récipient se raréfie, on doit avoir plus de peine à soulever le piston P, puisque cet air raréfié le presse par-dessous beaucoup moins fortement que l'air extérieur ne le presse par-dessus : c'est en effet ce qui a lieu. Mais, par la même raison, lors-

qu'on fait descendre ce piston , pour chasser l'air dilaté qui a passé dans le corps de pompe, il n'y faut employer aucune force ; et le poids de l'atmosphère, qui pèse sur lui, suffit pour cela. On a heureusement imaginé d'employer cette seconde puissance pour aider l'autre, et l'on y est parvenu en faisant mouvoir à-la-fois, par une même roue dentée, les tiges parallèles de deux pistons, dont l'un monte, tandis que l'autre descend, *fig.* 33. Ces deux pistons appartiennent chacun à un corps de pompe particulier, qui communique au récipient où l'on fait le vide. Ainsi, lorsqu'on tourne la manivelle MM pour faire monter l'un d'eux, le poids de l'atmosphère, qui tend à faire descendre l'autre, vous aide, et vous aide avec une puissance justement égale à celle qu'elle vous oppose sur le premier piston ; de sorte que, par cette disposition, quelque loin que vous poussiez le vide, vous n'avez jamais d'effort à faire que ce qu'il en faut pour surmonter les frottemens des pistons dans les corps de pompe où ils sont en mouvement.

Ce n'est pas tout que d'avoir ainsi un moyen de diminuer considérablement la densité de l'air dans un récipient, il faut encore savoir jusqu'à quel point va cette raréfaction. Pour le connaître, on adapte à la machine un tube barométrique vide HH, *fig.* 34, qui, par sa partie supérieure, communique au récipient où l'on fait le vide, et, par sa partie inférieure, plonge dans un vase rempli de mercure. A mesure que l'on fait le vide dans le récipient, le mercure s'élève dans le tube HH. Une division verticale permet de juger à chaque instant de combien il s'est ainsi élevé au-dessus de son niveau, et, par conséquent, permet d'évaluer le degré de dilatation de l'air que le récipient contient encore. En effet, la force élastique actuelle de cet air a pour mesure l'excès de la pression barométrique totale sur celle qu'indique le baromètre de la machine ; ainsi la pression totale, divisée par cet excès, donnera le rapport des forces élastiques, et par conséquent celui des dilatations. Par exemple, si le baromètre extérieur marque 0^m,760 et celui de la machine 0^m,758, la différence sera 2^{mm} ; et la dilatation de l'air intérieur sera exprimée par le rapport de 760 à 2, ou par 380 ; c'est-à-dire que la quantité d'air qui

remplit maintenant tout le récipient, si elle était soumise à la pression totale $0^m,760$, occuperait un volume 580 fois moindre; et, par conséquent, ne remplirait que $\frac{1}{580}$ du récipient entier.

Quelquefois, au lieu de l'appareil que nous venons de décrire, on se contente de celui qui est représenté *fig.* 35, et que l'on nomme *épreuve*. C'est un tube recourbé ABCD, rempli en partie de mercure que l'on y a fait bouillir; une de ses branches BA est fermée; l'autre CD est ouverte, et tout l'appareil se place dans l'intérieur du récipient où l'on fait le vide. Tant que la force de ressort de l'air restant est plus que suffisante pour soutenir une colonne de mercure égale à la différence de niveau AH, la branche AB reste pleine. Mais, si cet air devient plus rare, le mercure de cette branche s'abaisse; et l'excès de son niveau sur celui de l'autre branche, indiqué par une double division tracée sur l'appareil, donne la mesure de la pression que l'air intérieur soutient encore. Un pareil instrument est donc un véritable baromètre, mais qui ne peut servir que pour une atmosphère très-dilatée. Quand on a ainsi observé la différence de niveau du mercure dans les deux branches de l'épreuve, on peut facilement en conclure le degré de dilatation de l'air intérieur. Car cette différence exprime immédiatement la valeur de sa force élastique. Ainsi, en cherchant combien de fois elle est contenue dans la pression barométrique totale, on aura le rapport des dilatations. Par exemple, si la pression barométrique est $0^m,760$ et que la différence de niveau dans l'épreuve soit seulement de 2mm, la dilatation de l'air sous le récipient sera $\frac{760}{2}$ ou 380, comme dans l'exemple précédent.

La pompe à air, perfectionnée comme nous venons de le dire, est généralement désignée sous le nom de *machine pneumatique*. On a cherché à calculer suivant quelle proportion elle épuise l'air. A considérer la chose d'une manière abstraite, ce calcul est très-facile: car, si au premier coup de piston elle enlève $\frac{1}{10}$ de l'air contenu dans le récipient, elle y laissera par conséquent $\frac{9}{10}$; au second coup, elle enlèvera encore $\frac{1}{10}$ de ces $\frac{9}{10}$ ou $\frac{9}{100}$, et elle y laissera $\frac{9}{10} - \frac{9}{100}$ ou $\frac{81}{100}$; au troisième coup elle enlèvera encore $\frac{1}{10}$ de ces $\frac{81}{100}$ ou $\frac{81}{1000}$;

et elle y laissera $\frac{81}{100} - \frac{81}{10000}$ ou $\frac{729}{10000}$; d'où l'on voit qu'en général les restes seront exprimés par les puissances successives de la fraction primitive $\frac{9}{10}$. Ces restes diminuant ainsi continuellement, il semble que l'on devrait enfin parvenir à faire un vide tel que la pression indiquée par l'éprouvette fût tout-à-fait insensible ; et c'est cependant ce qui n'arrive jamais, même avec les machines les mieux exécutées. Cela tient à plusieurs causes physiques dont nous n'avons pas tenu compte dans notre calcul. En premier lieu, il faut mettre les vapeurs aqueuses qui se développent dans l'appareil même, et qui émanent des parois du récipient et des corps de pompe à mesure que l'on y raréfie l'air. Il faut y ajouter la résistance des soupapes, que l'air doit soulever en se dilatant ; car, quelque mobilité qu'on leur suppose, il faut, pour les ouvrir, vaincre la tendance qu'elles ont à se fermer. Cette dernière cause seule suffit pour limiter l'effet de la machine, lorsque l'élasticité de l'air intérieur n'est plus suffisante pour la surmonter. Heureusement un vide parfait n'est jamais nécessaire. Il suffit que la machine raréfie l'air à un haut degré ; le baromètre qu'elle porte vous indique la quantité d'air qu'elle ne peut extraire, et vous achevez de la rendre parfaite, en corrigeant par le calcul l'erreur qui pourrait en résulter.

On peut, d'une manière fort simple, prouver par l'expérience ce que nous venons de dire sur le développement des vapeurs aqueuses qui s'exhalent des parois du récipient et des corps de pompe, à mesure que l'on en extrait l'air. Il faut pour cela employer, comme récipient, un ballon à col étroit, susceptible d'être vissé sur la platine de la machine pneumatique, et muni d'un robinet bien travaillé, qui puisse à volonté se fermer et s'ouvrir. On extrait l'air de ce ballon aussi exactement qu'il est possible ; et, pour rendre cette extraction plus parfaite, vers la fin de l'opération, l'on multiplie les coups de piston avec rapidité. On observe alors la tension intérieure. Si la pompe est en bon état, elle doit être fort petite, par exemple, de un ou deux millimètres. Fermez alors le robinet de votre ballon, de manière à intercepter toute communication entre sa capacité intérieure et celle des corps de pompe.

Laissez l'appareil dans cet état pendant quelque temps, par exemple, pendant une heure ; puis, faites le vide de nouveau dans le corps de pompe, ce qui n'exigera que quelques coups de piston ; et lorsque vous verrez, par le tube barométrique, que la pression intérieure est redevenue presque nulle, ouvrez le robinet de votre ballon, pour rétablir la communication entre sa capacité intérieure et celle des corps de pompe. Vous verrez aussitôt le mercure du tube barométrique baisser d'une quantité très-notable, qui pourra aller, par exemple, à douze ou quinze millimètres, si la température est de 16 ou 17 degrés. Cependant votre ballon, étant resté vissé sur la machine pneumatique, ne peut pas avoir repris d'air. Il faut donc qu'il se soit développé dans son intérieur une nouvelle quantité de fluide élastique qui n'y existait point dans le premier moment où l'on venait d'y faire le vide ; ce fluide n'est autre chose que la vapeur aqueuse qui s'est exhalée des parois du ballon pendant le temps qu'il est resté fermé ; et si l'effet n'en était pas sensible pendant que l'on faisait le vide, c'est qu'on la pompait plus vite qu'elle ne se développait. La preuve la plus sûre que ce fluide élastique est réellement de la vapeur aqueuse, c'est qu'il ne se formera point, si vous mettez dans le ballon quelque sec dessiccatif, comme du muriate de chaux, de l'alkali caustique, etc. ; ou, pour parler plus exactement, il se formera encore, jusqu'à ce que l'intérieur du ballon soit tout-à-fait sec ; mais ces sels l'absorberont ; et de cette manière, votre récipient, ouvert sur la machine pneumatique au bout d'un temps quelconque, par exemple, après une année entière, vous donnera précisément la même tension que vous aviez observée au premier instant, comme je l'ai moi-même éprouvé par expérience. Mais, pour que le récipient garde si long-temps le vide, il faut que les robinets soient parfaitement travaillés ; et comme cette perfection est d'une nécessité indispensable dans une infinité d'expériences, je vais entrer dans quelques détails sur leur construction.

Je ne puis pas donner une idée plus juste de ces pièces et de leur usage, qu'en disant que ce sont des cônes solides qui pénètrent à angles droits un autre cône creux d'égal diamètre.

Soit, *fig.* 36, TT un cylindre métallique solide, luté hermétiquement au col du récipient R. Ce cylindre est percé dans toute sa longueur par un canal étroit qui permet d'introduire, dans le récipient, de l'air, des gaz ou des liquides. Il s'agit d'intercepter à volonté cette communication : pour cela on perce dans la masse du cylindre TT, perpendiculairement à sa longueur, un cône creux $ABA'B'$, et l'on remplit cet espace par un cône solide semblable $R'R'$, fait d'une autre pièce de même métal. On conçoit que ces deux cônes ne peuvent d'abord être taillés qu'approximativement l'un sur l'autre, et qu'ainsi ils ne joignent pas parfaitement dans tous leurs points. Mais, pour rendre cette jonction parfaite, on use le cône solide $R'R'$ dans le cône creux, en l'y faisant tourner rapidement un grand nombre de fois, au moyen de la machine que les ouvriers appellent *un tour*; et pour rendre cette opération plus facile, on met entre les deux pièces que l'on frotte ainsi l'une sur l'autre, une poussière très-dure, que l'on nomme *du tripoli*, et que l'on choisit de plus en plus fine à mesure que le travail avance. On y met aussi de l'huile pour faciliter le mouvement de rotation; et, en même temps, on presse la partie épaisse du cône $R'R'$ vers la partie la plus étroite du cône creux, comme si on voulait l'y faire entrer. Par cette opération, qui s'appelle dans les arts *un rodage*, on finit par user et mouler les deux pièces l'une dans l'autre, avec une telle justesse, qu'elles adhèrent ensemble comme si elles ne formaient qu'un seul corps continu; et l'on peut ensuite faire tourner le cône solide $R'R'$ sur lui-même autour de son axe, sans que, ni liquides, ni gaz, quelque subtils qu'ils soient, puissent s'échapper du récipient R, ou y rentrer. Alors on retire le cône $R'R'$, on perce un petit canal *oo* dans son milieu, et perpendiculairement à sa longueur, puis on le remet en place. Quand on tourne ensuite ce cône sur lui-même, tantôt le petit canal *oo* coïncide avec le canal intérieur du grand cylindre TT, et alors la communication de l'intérieur du récipient à l'extérieur est libre; tantôt le petit canal *oo* se trouve perpendiculaire à celui du grand cylindre, et alors cette communication est fermée par les parties solides du cône $R'R'$.

Tel est le jeu de cet appareil qui est, dans les expériences de physique, d'un usage continu. On fait de pareils robinets, même en verre; et cela est nécessaire quand on veut renfermer dans les appareils des substances qui, par elles-mêmes ou par les vapeurs qu'elles exhalent, pourraient corroder les métaux ou se combiner avec les luts.

J'ai expliqué plus haut, *fig. 31*, comment on parvient à ouvrir et à fermer tour-à-tour la communication du récipient avec les corps de pompe, au moyen du bouchon *b*, que le piston lui-même pose et enlève dans son mouvement. Mais cette méthode, quoique très-bonne, n'est pas encore la plus sûre que l'on puisse employer; car le peu de largeur du bouchon est un obstacle à ce qu'il ferme l'orifice *o* avec la dernière justesse; et le plus léger défaut, à cet égard, deviendra sur-tout sensible quand le vide étant presque fait sous le récipient, l'air comprimé dans les corps de pompe fera effort pour s'y introduire. C'est pourquoi, dans les machines où l'on recherche une perfection extrême, M. Fortin substitue à ce mode de communication une espèce de robinet à surfaces planes que la machine elle-même fait mouvoir. J'en ai donné la description dans le *Traité général*.

Après avoir expliqué en détail la construction et l'usage de la machine pneumatique, on comprendra facilement le mécanisme d'une autre espèce de pompe, qui sert pour condenser l'air. Soit *R*, *fig. 37*, le récipient dans lequel il s'agit d'opérer cette condensation. Pour cela, on le visse à un corps de pompe *AB A' B'*, dans lequel marche le piston *P* qui est entièrement solide, et qui doit être construit avec beaucoup de justesse; la communication du récipient au corps de pompe se fait par le canal *SO*, terminé en *S* par une soupape tellement ajustée qu'elle se lève dans le sens *SO*, pour laisser passer ce qui tend à entrer dans le récipient, mais qu'elle ferme le passage à tout ce qui voudrait en sortir: au contraire, il y a en *S'* une autre soupape qui, étant soulevée, permet à l'air extérieur d'entrer dans le corps de pompe, mais qui ne lui permet pas d'en sortir. Cela posé, concevons le piston *P* abaissé sur le fond *AB* de la pompe. Si on vient à l'élever, il se formera un vide au-dessous

de lui; l'air contenu dans le récipient ne peut pas en sortir pour venir remplir ce vide, parce que la soupape S l'en empêche; mais l'air extérieur le remplira, parce que la soupape S' lui permet d'entrer dans le corps de pompe. Maintenant abaissons de nouveau le piston, cet air se trouvera comprimé. Il ne pourra pas sortir par la soupape S' qui lui ferme le passage; mais il entrera dans le récipient en forçant la soupape S qui, bientôt après, se fermant d'elle-même, quand le piston sera descendu en AB, retiendra cet air et s'opposera à son retour. Alors, en élevant de nouveau le piston, on introduira de nouveau dans le corps de pompe une quantité d'air égale à la première; de là elle passera dans le récipient, et par une suite d'alternatives semblables, on finira par introduire dans ce dernier autant de volumes d'air égaux entre eux, qu'on aura de fois répété ce mouvement.

Pour rendre cet appareil plus commode, et pouvoir soumettre différens corps à la pression de l'air, on le dispose comme dans la *fig.* 38. Alors le récipient est un cylindre de verre très-épais, fermé à ses deux bouts par deux plans de cuivre MMGG qui y sont scellés, et qui sont attachés l'un à l'autre par des tringles métalliques, serrées avec de fortes vis, pour que la compression intérieure ne les sépare pas. Le récipient communique au corps de pompe par un canal C. Il est muni en R d'un robinet qui sert à le fermer quand on y a condensé l'air; et enfin, il est enveloppé d'un grillage en fer, pour prévenir les accidens qui pourraient arriver s'il venait à éclater par l'effet de la condensation. On emploie ordinairement deux corps de pompe, mais c'est uniquement pour rendre le jeu de la machine continu; car les pressions exercées sur les deux pistons ne peuvent plus se contre-balancer ici comme dans la machine pneumatique, et il faut une force extérieure pour faire entrer l'air dans le récipient. Mais on rend l'effort moins pénible en donnant aux corps de pompes de très-petits diamètres.

Pour juger du degré de la condensation, on place dans le récipient une éprouvette représentée *fig.* 39. Elle est composée d'un tube de verre recourbé ABC, dont l'une des bran-

ches AB est fermée en A, tandis que l'autre est ouverte en C. Le sommet de la première est occupé par un certain volume d'air sec, lequel s'y trouve emprisonné par une colonne de mercure HB*h*, qui se recourbe dans l'autre branche. A mesure que l'on condense l'air dans le récipient, cet air qui presse sur la surface du mercure en *h*, tend à faire monter le liquide dans l'autre branche BA; mais l'air contenu dans cette dernière résiste à cet effort par son élasticité; et, à mesure que la condensation augmente, il résiste davantage en se contractant toujours, de manière que son volume soit, d'après la loi de Mariotte, réciproquement proportionnel au poids dont il est chargé. Ainsi, en comparant ce volume à lui-même, au commencement de l'expérience, et après qu'on a donné un certain nombre de coups de piston, on peut facilement calculer dans quel rapport on a condensé l'air dont le récipient est rempli.

Avec les appareils que nous venons de décrire, on peut faire une infinité d'expériences instructives. Par exemple, en mettant des animaux doués d'organes respiratoires sous le récipient de la machine pneumatique, et y faisant le vide, on les voit haleter et bientôt mourir; ce qui prouve que l'air qu'ils respirent est nécessaire à leur existence. Cependant j'ai trouvé que quelques insectes peuvent continuer de vivre dans le vide le plus parfait. Outre la privation de la respiration, les animaux soumis à cette expérience éprouvent une autre sorte de lésion qui est purement mécanique; les substances aériformes renfermées dans l'intérieur de leur corps, et dont le ressort était contre-balancé par la pression de l'air extérieur, se trouvant déchargées de cette pression, se dilatent et brisent les vaisseaux qui les renfermaient. Cette dilatation excessive rend même sensible aux yeux la petite couche d'air qui adhère comme une enveloppe à la surface de presque tous les corps; car si l'on met, dans un vase plein d'eau, des morceaux de verre ou de métal, du sable, des plumes ou des poussières, et qu'après avoir placé ce vase sous le récipient de la machine pneumatique, on commence à pomper l'air qui presse la sur-

face de l'eau, on voit aussitôt les surfaces de tous les corps plongés dans ce liquide se couvrir d'une infinité de petites bulles d'air qui s'en détachent à mesure que l'on fait le vide, et qui viennent crever à la surface. L'eau elle-même laisse échapper de pareilles bulles provenant d'une certaine quantité d'air qu'elle peut absorber, et qui devient invisible pour nous tant qu'il est combiné avec sa substance, mais qu'on peut lui enlever, comme nous venons de le dire, en la délivrant du poids de l'air extérieur, de même que l'on y parvient encore en augmentant sa force élastique par la chaleur. De plus, si l'eau que l'on place ainsi sous le récipient de la machine pneumatique a été préalablement chauffée jusqu'à 20 ou 30 degrés, on la voit bientôt bouillir dès que l'on a donné quelques coups de piston, quoique cette température soit bien au-dessous de celle qui détermine l'ébullition sous la pression ordinaire de l'atmosphère. Cela s'accorde avec ce que nous avons vu précédemment, que la température de l'ébullition de l'eau s'abaisse à mesure que la pression atmosphérique diminue; mais nous ne faisons que montrer ici ce phénomène dont nous expliquerons plus tard les lois. En général, lorsque les substances que l'on place dans le vide produisent ainsi des vapeurs, il faut prendre garde que ces vapeurs ne soient pas de nature à altérer les pistons de la pompe, en corrodant les matières dont ils sont formés. Si l'on veut introduire de pareilles substances dans le vide, il faut employer un instrument que l'on appelle un *manomètre*, et que nous décrirons plus loin.

On peut aussi se servir de la machine pneumatique pour prouver l'égalité de chute de tous les corps dans le vide, comme nous l'avons indiqué page 76. Enfin, on produit encore plusieurs autres phénomènes curieux, en disposant l'air dans des appareils fermés, de manière à augmenter son ressort par sa condensation, ou par la diminution de la pression extérieure. On emploie ce ressort pour élever l'eau dans des tubes, ou la lancer en jets d'eau dans l'air. Ce sont là des jeux de physique que l'on comprendra sans peine au moyen de ce qui précède, dès que l'on aura vu les appareils.

Mais une des applications les plus utiles de la machine

pneumatique, c'est la faculté qu'elle nous donne de peser l'air et les gaz. Je ne parlerai ici que de l'air atmosphérique. Supposons que l'on prenne un ballon de verre muni d'un robinet travaillé comme nous l'avons dit, pag. 227, et que l'on pèse d'abord ce ballon ouvert et dans l'air libre. Le poids P , que l'on trouvera, sera égal au poids de l'enveloppe de verre, moins le poids de l'air que cette enveloppe déplace. Faites le vide dans ce ballon, fermez-le; et, dans cet état, pesez-le de nouveau. Son poids P' sera alors égal à celui de l'enveloppe de verre, moins le poids du volume total d'air qu'il déplace, lequel volume est plus grand que la première fois d'une quantité égale à toute la capacité intérieure. Par conséquent, si la température et la pression atmosphérique sont restées exactement les mêmes dans les deux expériences, si, de plus, vous avez fait parfaitement le vide, vous n'aurez qu'à retrancher, du premier poids P , le poids plus petit P' , et la différence $P - P'$ sera le poids de l'air que votre ballon contenait, dans les circonstances où vous avez opéré. On trouve ainsi, qu'à la température de la glace fondante, et sous la pression de $0^m,76$, un litre d'air atmosphérique sec pèse $1^gr,300$; mais quoique ce résultat soit très-exact, comme on le verra par la suite, je ne le donne ici que comme une approximation telle qu'on pourrait se la procurer par le procédé que je viens de décrire; car il arrivera bien rarement que l'on puisse opérer précisément dans les circonstances que j'ai indiquées. Il arrivera plus rarement encore que la température et la pression restent tout-à-fait constantes pendant le cours des expériences; enfin, la vapeur aqueuse qui est toujours mêlée à l'air, en quantité plus ou moins considérable, fait encore varier son poids. Il faut savoir calculer l'influence de toutes ces causes, et en corriger l'effet, pour pouvoir réduire toutes les pesées à un même terme, tel que celui que je viens de donner; c'est à quoi nous parviendrons plus tard. Mais, dès à-présent, l'évaluation précédente du poids de l'air nous suffira pour donner la dernière précision à plusieurs résultats importants que nous découvrirons bientôt.

CHAPITRE IX.

Mesure de la dilatation des corps solides.

MAINTENANT que nous avons complètement réglé la marche du thermomètre, que nous avons donné à cet instrument toute la précision nécessaire pour qu'il fût parfaitement comparable à lui-même dans toutes ses indications, il faut nous en servir pour fixer avec exactitude l'étendue des mouvemens que les variations de la chaleur peuvent produire dans les corps; car, puisque nous avons reconnu que tous les corps se dilatent quand la température s'élève, et se condensent quand elle s'abaisse, il est évident que ces changemens de dimension doivent faire varier leur masse, et par suite leur poids, sous un volume donné: or, dans presque toutes les expériences physiques ou chimiques auxquelles nous soumettons les corps, la proportion de leur masse, sous un volume donné, est un des élémens qu'il nous importe le plus de connaître, et par conséquent il nous faut mesurer les variations apparentes que la chaleur y peut produire, avant de chercher à étudier l'influence des autres causes qui pourraient agir sur eux.

Nous nous occuperons d'abord de la dilatation des corps solides; il est naturel de commencer par eux, car ils forment la matière de tous les vases et de la plupart des instrumens que nous employons. Il semble au premier coup d'œil que cette détermination n'offre aucune difficulté. Former une barre d'une longueur connue, avec le corps solide que l'on veut éprouver; exposer successivement cette barre à deux températures connues et différentes l'une de l'autre; puis mesurer sa longueur dans les deux états: voilà à quoi se réduit toute la recherche de sa dilatation; mais cette opération, qui paraît si simple, est beaucoup plus difficile à exécuter avec exactitude, qu'elle ne le paraît au premier coup d'œil.

Les dilatations des corps solides sont généralement très-

petites ; il faut donc employer des moyens très-précis pour les mesurer avec exactitude. Le premier qui se présente à l'esprit, c'est d'agrandir les effets de la dilatation par des leviers et par des roues dentées qui agissent les unes sur les autres. Il est très-vrai que, mathématiquement parlant, les plus petits changemens de longueur peuvent être multipliés, par ce procédé, dans une proportion indéfinie, de manière à devenir sensibles aux observations les plus grossières. Mais, s'il est facile de prouver ainsi que les corps se dilatent par les différences de température qu'on leur fait éprouver, il est beaucoup moins facile de mesurer exactement l'étendue de cette dilatation ; et les causes d'erreur augmentent à mesure que l'on multiplie le nombre des leviers et des rouages qui réagissent les uns sur les autres ; car, avec quelque perfection que toutes ces pièces soient construites et ajustées ensemble, la machine qu'elles composent sera d'autant plus exposée à être irrégulière qu'elle sera plus compliquée. En outre, et ceci est un des plus grands obstacles que l'on ait à vaincre, il sera très-difficile que les pièces qui doivent être en communication, et même en contact, avec la barre que l'on chauffe, ne participent pas plus ou moins à ses variations de température. Voilà donc une nouvelle cause de variation dans le jeu des rouages ; la négliger, ce serait s'exposer à de grandes erreurs, et en apprécier l'effet est une chose presque impossible, pour peu que la machine soit compliquée. Aussi, tous les appareils de ce genre que l'on voit dans les cabinets de physique, et que l'on nomme des *pyromètres*, ne sont propres qu'à prouver la dilatation des corps solides par la chaleur, mais ne peuvent servir à la mesurer ; or, c'est là réellement la question importante ; car les effets de la dilatation se manifestent journellement à nos yeux par un si grand nombre de phénomènes, qu'on n'a pas besoin de construire une machine particulière pour en démontrer l'existence.

Supposons donc que l'on se borne à la forme d'appareil qui semble la plus simple. La barre métallique BB' , *fig. 40*, s'appuiera par une de ses extrémités sur un obstacle fixe FF ; par l'autre bout elle poussera l'extrémité L d'un levier

coudé LCL' , mobile autour du centre fixe C , et dont la branche CL' sera beaucoup plus longue que CL ; par exemple, dans le rapport de 100 à 1. Nous placerons, à l'extrémité du bras CL' , une division circulaire DD . Alors, si la barre se dilate d'une certaine quantité, par exemple, d'un millimètre, elle fera marcher de cette quantité le bout du levier L ; et, par suite, l'extrémité de l'aiguille L' parcourra 100 millimètres ou un décimètre sur la division; en général le mouvement de la barre transporté à l'extrémité de l'aiguille L' sera centuplé; par conséquent si l'on admet que l'on puisse apprécier, sur la division, un déplacement de l'aiguille égal à un demi-millimètre, ce qui est extrêmement facile, cette quantité transportée à l'extrémité de la plus petite branche L deviendra $\frac{1}{200}$ de millimètre, ou $\frac{1}{400}$ de ligne; on pourra donc répondre sur le mouvement de la barre de cette quantité.

Tels sont à-peu-près les pyromètres que M. Brongniart emploie à la manufacture de porcelaine de Sèvres, pour déterminer des termes fixes dans les hautes températures de ses fourneaux. En effet il est évident que, si le même pyromètre est exposé à la chaleur de la même manière, et au même degré de chaleur, l'aiguille L' reviendra toujours à la même division, pourvu toutefois que la dilatabilité de la barre métallique BB' reste la même, et que la construction de l'appareil ne s'altère pas.

Mais si cette machine, employée comme nous venons de le dire, est propre à indiquer des termes constans de température, elle ne peut pas, au moins sans être modifiée, mesurer les dilatations absolues des corps. En effet, pour que l'extrémité de l'aiguille L' indique réellement la dilatation absolue de la barre BB' , il faut que le point C et l'obstacle F soient parfaitement fixes, ou du moins que leurs distances soient rigoureusement invariables parmi tous les changemens de température que la barre doit éprouver. Or, comment satisfaire à cette condition? Si le point C et l'obstacle F font partie d'un même support, quelle que soit la matière dont ce support soit composé, s'il peut participer à la température de la barre, il se dilatera et se contractera

en même temps qu'elle, quoique dans des proportions différentes, et par conséquent la dilatation indiquée par l'aiguille L' ne sera pas celle de la barre BB' , mais seulement l'excès de la dilatation de cette barre sur celle du support.

Le moyen le plus simple, le seul même qui semble se présenter pour éviter cet inconvénient, c'est de faire en sorte que les variations de température, si elles agissent sur le point C et sur l'obstacle F , ne puissent pas les écarter l'un de l'autre dans le sens CF , d'une quantité sensible. On y parviendrait, par exemple, si l'obstacle F était un plan de verre bien dressé, perpendiculaire à la longueur de la barre BB' , et que le point C fût, de même, déterminé par un long cylindre également perpendiculaire à cette barre; en ajoutant de plus à cette condition, que le plan et le cylindre fussent soutenus par des supports assez éloignés de la barre, et en même temps assez massifs pour ne participer nullement aux changemens de température qu'elle pourrait éprouver. Telle est à-peu-près la condition fondamentale de l'appareil employé par MM. Lavoisier et Laplace. Leur barre BB' , *fig. 41*, était horizontale, et soutenue dans cette position par des rouleaux de verre sur lesquels elle pouvait librement glisser; l'obstacle FF était aussi une règle de verre verticale, fixée perpendiculairement à une autre règle horizontale TT , dont les extrémités étaient scellées dans deux énormes piliers de pierre, enfoncés dans le sol à une grande distance de la barre échauffée; le petit bras CL du levier était également vertical; et l'axe de rotation C , appuyé de même sur deux autres piliers de pierre, ne pouvait pas non plus être affecté par les changemens de température que l'on faisait subir à la barre; mais l'extrémité du long bras CL' , au lieu de décrire une division, faisait mouvoir une lunette dirigée sur une mire placée à une grande distance. On voit que cet appareil est tout-à-fait exempt des erreurs occasionnées par le déplacement des points que l'on suppose fixes dans les autres pyromètres.

Ce n'est pas tout encore : pour que ces observations soient exactes, il faut que la barre soumise à l'expérience ait une température connue et uniforme dans toute sa longueur.

Le seul moyen d'y parvenir, est de la plonger dans un fluide dont toutes les parties se trouvent à cette température. Mais pour cela, il est absolument nécessaire que la barre soit horizontale ; car, en plongeant des thermomètres à diverses profondeurs, dans un vase rempli de liquide et chauffé à un certain degré au-dessus de la température de l'air, on trouve que ses différentes couches sont inégalement chaudes ; et nous verrons bientôt que, d'après la constitution même des liquides, il n'en saurait être autrement. De là il résulte qu'une barre solide, plongée verticalement dans un fluide échauffé, a, dans ses différents points, une température inégale, ce qui rend l'évaluation de sa température moyenne très-difficile. On évite cet inconvénient en plongeant la barre horizontalement, parce que, dans un liquide qui n'est point agité, la température est constante dans toute l'étendue d'une même couche horizontale. Enfin, pour que les thermomètres placés près de la barre indiquent immédiatement sa température, il faut, comme nous l'avons vu en parlant du thermomètre, qu'ils soient environnés de liquide dans toute l'étendue occupée par la colonne de mercure ; pour cela il faut qu'ils soient aussi couchés horizontalement, ou presque horizontalement le long de la barre. Cependant on pourrait encore les tenir dans une situation verticale, en ayant égard, par le calcul, à la différence de dilatation de la partie de la colonne qui serait située hors du liquide ; mais cela serait moins commode, et peut-être moins exact. Au moyen de ces procédés, MM. Lavoisier et Laplace ont obtenu les résultats contenus dans le tableau suivant.

DÉNOMINATIONS DES SUBSTANCES par ordre alphabétique.	DILATATION Pour une Règle dont la longueur est 1, à la température de la glace fondante.	
	De 0° à 100°	Pour 1° cen.
Acier non trempé.	0,00107912	$\frac{1}{92654}$
Acier trempé jaune, recuit à 65 degrés	0,00123956	$\frac{1}{80674}$
Argent de coupelle.	0,00190974	$\frac{1}{52363}$
Argent au titre de Paris . . .	0,00190868	$\frac{1}{52392}$
Cuivre	0,00171733	$\frac{1}{58231}$
Cuivre jaune ou laiton	0,00187821	$\frac{1}{53215}$
Étain des Indes ou de Mélac.	0,00193765	$\frac{1}{51609}$
Étain de Falmouth.	0,00217298	$\frac{1}{46161}$
Fer doux forgé.	0,00122045	$\frac{1}{81937}$
Fer rond passé à la filière. . .	0,00123504	$\frac{1}{81157}$
Flint-glass anglais	0,00081166	$\frac{1}{124834}$
Mercure	0,00600601	$\frac{1}{16650}$
Or de départ.	0,00146606	$\frac{1}{68202}$
Or au titre de Paris, non recuit.	0,00155155	$\frac{1}{64452}$
Or au titre de Paris, recuit. .	0,00651361	$\frac{1}{66067}$
Platine (selon Borda).	0,00085655	$\frac{1}{116748}$
Plomb	0,00284836	$\frac{1}{35108}$
Verre de France avec plomb. .	0,00087199	$\frac{1}{114680}$
Verre sans plomb (en tube). .	0,00087572	$\frac{1}{114191}$
Verre de Saint-Gobin (glace).	0,00089089	$\frac{1}{112247}$

Ces résultats sont déduits d'observations faites entre les températures de la glace fondante et de l'eau bouillante, c'est-à-dire depuis 0° jusqu'à 100° du thermomètre à mercure. Entre ces limites, les dilatations de chaque métal ont paru sensiblement constantes pour le même nombre de degrés.

Mais le seraient-elles encore à de plus hautes températures? On conçoit que cela ne peut être décidé que par des expériences directes. MM. Dulong et Petit en ont fait sur ce sujet de très-exactes, et ils ont trouvé que les dilatations du fer, du cuivre et du platine deviennent croissantes à mesure que la température s'élève davantage au-dessus de 100° ; il devient par-là bien probable que ce résultat est commun aux autres corps solides. Toutefois, les nombres rapportés dans le tableau précédent suffiront pour les applications les plus ordinaires. Je vais en donner quelques exemples.

Examen de diverses questions dépendantes de la dilatation des corps solides.

La connaissance de la dilatation des corps solides, particulièrement des métaux, est extrêmement utile dans une infinité de circonstances qui intéressent les sciences et les arts. Nous avons indiqué déjà quelques-unes de ces dernières, parce qu'elles frappent plus aisément les yeux; mais maintenant que nous sommes arrivés à des résultats plus précis, nous pouvons entrer dans des applications plus fines et plus délicates.

Par exemple, toutes les fois que le physicien veut soumettre à ses expériences des liquides ou des gaz, il se sert, pour les contenir, de vaisseaux de verre ou de métal; mais si ces vases sont successivement exposés à des températures diverses, la matière dont ils sont formés s'allonge ou se resserre, conformément aux lois de sa dilatation; et comme ces changemens se font à-la-fois dans les trois dimensions de cette matière, il en résulte que le volume du vase augmente ou diminue; en sorte qu'il faut d'abord avoir égard à ces effets, et les corriger par le calcul, pour pouvoir juger isolément de ce qu'a éprouvé le liquide ou le gaz contenu dans l'appareil. C'est ce qui est très-facile quand on connaît la dilatation du vase, suivant une seule de ses dimensions. Car on prouve à l'aide du calcul que *la dilatation cubique, lorsqu'elle est fort petite, est triple de la dilatation linéaire, pour les mêmes variations de température*; c'est-à-dire que, si une simple règle s'allonge ou

se raccourcit, par exemple, de $\frac{1}{1000}$ de sa longueur, le volume de cette règle ou de tout autre corps composé de la même substance, variera dans les mêmes circonstances de $\frac{3}{1000}$. On peut voir la démonstration de ce théorème dans le traité général.

Dans les corps solides, tant que la température est comprise entre la glace fondante et l'eau bouillante, nous avons vu que la dilatation linéaire est sensiblement proportionnelle au nombre des degrés du thermomètre, comptés depuis zéro. Il en sera donc de même pour la dilatation du volume. D'après cela, si l'on connaît le volume d'un corps à 0° , et que l'on connaisse aussi la dilatation cubique de la substance qui le compose, on trouvera facilement le volume de ce corps à toute autre température; ou, réciproquement, étant donné le volume à une température quelconque, on en déduira celui qui convient à la température de 0° . Par exemple, la dilatation cubique du mercure pour 1° est $\frac{1}{5550}$. Donc un volume de mercure qui serait de 3 centimètres cubes à 0° , deviendrait à 1° , $3 + \frac{3}{5550}$; à 2° , $3 + \frac{6}{5550}$; à 3° , $3 + \frac{9}{5550}$; et ainsi de suite, pour un nombre de degrés quelconque, tant que la dilatation peut être censée constante.

La mesure de la dilatation des métaux devient très-utile pour évaluer, dans certains cas, les changemens de dimension qu'éprouvent les instrumens d'astronomie; on s'en sert aussi pour ramener à une même température les règles de métal qui servent à mesurer les bases des opérations géodésiques. Enfin on l'emploie pour corriger les variations de longueur, que pourraient prendre les verges des horloges à pendule; comme cette dernière application est très-importante, je l'expliquerai avec quelque détail.

Dans ces instrumens, le mouvement est imprimé et réglé par un pendule composé d'une tige métallique, terminée inférieurement par une lentille très-pesante, construite pareillement en métal. Cet appareil, suspendu par l'extrémité libre de la verge, oscille autour de la verticale, et fait marcher d'un pas l'aiguille de l'horloge; à chacune de ces oscillations. Quelles que soient sa forme et les matières dont il est composé,

On peut toujours assimiler son mouvement à celui d'un point matériel pesant, qui serait suspendu au bas d'un fil inflexible et sans masse. Cet appareil idéal se nomme un pendule simple ; chaque pendule réel et composé a ainsi son pendule simple auquel il se rapporte, qui marcherait exactement comme lui ; et les durées des oscillations de divers pendules composés, quelles que soient leurs formes, sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs de leurs pendules simples. Si donc, sur chacun d'eux, à partir de son axe de suspension, l'on prend une distance égale à cette longueur, l'extrémité de cette distance marquera la position du point pesant qui pourrait être substitué à toute la masse du pendule composé ; c'est ce que l'on nomme le *centre d'oscillation*. D'après cela, il est facile de concevoir que les variations de la température, en altérant la configuration et la longueur du pendule composé, doivent changer aussi la position de ce centre, et par conséquent les durées des oscillations. En effet, si la température s'élève, la verge métallique s'allonge, le centre commun d'oscillation de cette verge et de la lentille descend. Le pendule simple correspondant devient donc plus long, et les oscillations sont plus lentes. Au contraire, si la température s'abaisse, le centre d'oscillation se rapproche du point de suspension, et les oscillations s'accélèrent. De là naîtraient, dans la marche de l'horloge, des variations continuelles, si l'on n'avait trouvé le moyen de corriger cet inconvénient. C'est à quoi l'on réussit par divers mécanismes que l'on applique à la verge du pendule, et qui se réduisent tous, en dernière analyse, à reporter en haut une partie du poids du système, lorsque la verge s'allonge, et à la reporter en bas lorsqu'elle se raccourcit, de telle sorte et en telle proportion, que ces effets contraires se compensent exactement. Ces appareils se nomment des *compensateurs*.

Le plus usité est représenté *fig. 42*. ABCD est un châssis de fer, suspendu par une tige de fer au point S ; la verge de l'horloge, désignée par TL, est aussi en fer ; mais elle n'est pas immédiatement attachée à ce châssis ; elle est fixée au point T, à un châssis plus petit *abcd*, formé par des tringles

de cuivre qui reposent en cd sur le grand châssis, et y sont fixées en ces points. Pour concevoir le jeu de cet appareil, il faut se rappeler que le cuivre se dilate plus que le fer, par les mêmes changemens de température, et les quantités de leur dilatation, pour des longueurs égales, sont à-peu-près entre elles comme 5 à 3. Cela posé, si la température s'élève, le châssis de fer $ABCD$ et la tige de fer SF vont s'allonger, ainsi que la verge de fer TL qui porte la lentille; mais en même temps les règles $abcd$ du châssis de cuivre intérieur vont aussi se dilater, et d'une quantité proportionnellement plus grande que les tiges de fer $ACBD$. En vertu de cet excès de dilatation, elles remonteront le point de suspension T , plus que la dilatation du châssis de fer ne l'a fait descendre, et elles compenseront donc ainsi, en tout ou en partie, l'allongement total des pièces de fer de l'appareil.

En soumettant cet arrangement au calcul, on trouve qu'on ne peut obtenir la compensation avec un seul assemblage de deux châssis; et cela tient à ce qu'il n'y a pas assez de différence entre les dilatations des deux métaux employés. Mais on peut y parvenir en multipliant ces assemblages, et les combinant de manière que leurs effets s'ajoutent. Pour cela, supposons que le châssis de cuivre $abcd$ ne porte pas immédiatement la verge TL de l'horloge, mais soutienne seulement un autre châssis $A'B'C'D'$, *fig.* 43, composé comme $ABCD$, c'est-à-dire dont les deux montans $A'C'$, $B'D'$ soient en fer, et dont la traverse inférieure porte un châssis $a'b'c'd'$, dont les deux montans soient de cuivre. Attachons la verge TL à ce second châssis intérieur, et considérons de nouveau les effets opposés que les barres de fer et de cuivre exercent sur la distance GS . Il est évident que les mouvemens de compensation qui agissent sur la lentille G deviendront plus considérables. Aussi trouve-t-on que son immobilité devient possible; et il suffit pour l'obtenir que la somme de toutes les tringles de cuivre employées dans l'appareil soit triple de la distance du centre de gravité de la lentille à l'axe de suspension S . On peut donc, au moyen de cette règle très-simple, varier à volonté les longueurs des règles et leur nombre de la manière qui semble la plus commode. Ordinaire-

ment les horlogers se bornent à employer quatre châssis, comme nous l'avons supposé dans la figure.

J'ai vu un horloger, nommé Martin, employer avec succès, pour les horloges à pendule, un compensateur plus simple encore ; et je l'expliquerai d'autant plus volontiers, que c'est précisément le même appareil qui sert pour la compensation des montres qui doivent marcher avec une régularité parfaite, et que l'on nomme par cette raison *chronomètres* ou *garde-temps*. Concevez deux lames métalliques AB, CD, *fig.* 44, d'égale longueur, l'une de fer, l'autre de cuivre ; supposez qu'on les place l'une sur l'autre, et qu'on les fixe ainsi invariablement au moyen d'un grand nombre de petites vis qui les traverseront toutes deux en autant de points de leur longueur. Admettons que l'opération soit faite à la température dix degrés, et que le système des deux lames soit alors rectiligne ; si la température change, cette rectitude cessera. Si elle s'élève, les deux lames se dilateront, et se dilateront inégalement, la lame de cuivre plus que la lame de fer ; alors le système se courbera dans la forme que représente la figure 45, de manière que la lame de fer soit en dedans de la concavité, et celle de cuivre en dehors, pour compenser ainsi, par l'augmentation de son amplitude, l'excès de sa dilatation. Le contraire arrivera si la température s'abaisse au-dessous du terme de dix degrés, que nous avons pris pour point de départ ; le système se courbera encore, mais en sens opposé ; le cuivre, plus contracté, se trouvera en dedans de la concavité, le fer en dehors, *fig.* 46. Pour appliquer ceci à la compensation d'une horloge, *fig.* 47, fixons, en un point quelconque O de sa verge SL deux systèmes de lames semblables, perpendiculaires à sa direction, et terminés à leurs extrémités par des masses MM, susceptibles d'être rapprochées ou éloignées de la verge SL, en se vissant sur deux vis VV. Supposons maintenant que ces lames soient l'une et l'autre rectilignes à une certaine température, à dix degrés, par exemple ; elles feront alors partie du pendule composé qui conduit l'horloge. Mais si la température change, elles se courberont ; et, par ce mouvement, elles remonteront ou descendront les masses elles-mêmes. Par exemple,

si la température s'élève, la tige SL va s'allonger, et le point L va descendre, ainsi que le point O; mais en même temps les deux systèmes de lames vont se courber; et si l'on a mis les lames de fer en dessus, elles se courberont, comme le représente la *fig. 48*, de manière à reporter en haut les deux masses MM, ce qui combattra l'effet que la dilatation de la verge avait produit sur le système. Au contraire, si la température s'abaisse au-dessous du terme pris pour point de départ, la verge SL se contractera et remontera la lentille L ainsi que le point O; mais en même temps les lames se courbant, comme dans la *fig. 49*, reporteront en bas les masses MM, et ces effets se combattront encore. D'après la dilatation connue des métaux, on peut calculer les dimensions des diverses parties de l'appareil, de manière que la compensation soit à-peu-près exacte; puis on achève de la rendre telle en comparant la marche de la pendule à celle des étoiles, et approchant ou éloignant les masses MM de la verge SL jusqu'à ce que les variations de la température n'altèrent plus le mouvement. Pour faire cette épreuve en peu de temps, de la manière la plus sûre, on place l'horloge dans une étuve, que l'on chauffe artificiellement, et on règle les masses de manière que l'horloge marche de même à ces températures élevées et au degré de chaleur que se trouve alors avoir l'atmosphère. C'est aussi de cette manière que l'on achève de régler parfaitement les autres compensateurs. Celui que je viens de décrire a l'avantage de pouvoir s'appliquer, presque sans frais, à toutes les horloges à pendule, et je puis assurer, par expérience, qu'il est très-exact.

C'est, comme je l'ai dit tout-à-l'heure, un compensateur de ce genre que l'on applique aux garde-temps pour les rendre insensibles aux changemens de température. Il n'est personne qui ne sache que le régulateur du mouvement, dans les montres en général, est un balancier BAD, *fig. 50*, mu par un ressort spiral E S S', qui, en se resserrant et se débandant tour à tour, force le balancier à tourner alternativement sur lui-même, ce qui produit les battemens de la montre. Mais si la température vient à varier, les dimensions du balancier et du spiral varieront, aussi bien que la force de ressort, et par suite

la durée des vibrations. Pour détruire cet inconvénient, on fixe au balancier des lames compensatrices CM , CM , construites en cuivre et en fer, comme nous l'avons dit tout-à-l'heure, mais primitivement arquées, afin de ne pas agrandir démesurément la place que le balancier occupe dans la boîte. Les extrémités libres de ces lames sont de même terminées par de petites vis, et portent de petites masses d'or que l'on peut ainsi approcher ou éloigner du point d'attache C . Maintenant, si la température change, la courbure des lames compensatrices changera aussi, et elles porteront les petites masses MM plus loin ou plus près du centre O de rotation. Dans le premier cas, les masses agissant sur le centre O par un levier plus court, il faudra moins de force dans le spiral pour les faire tourner. Au contraire, quand elles s'éloigneront du point O , elles agiront sur lui par un levier plus long, et leur rotation, pour être la même, exigera un plus grand effort de la part du spiral. On pourra donc disposer les lames de manière que les variations de ces forces correspondent à celles que le spiral éprouve par l'effet des changemens de température; alors la marche de la montre en deviendra plus régulière; et on la rendra tout-à-fait régulière à force d'essais, en la plaçant successivement dans des températures artificielles voisines de la glace et de l'eau bouillante, et approchant ou éloignant les petites masses d'or des lames compensatrices jusqu'à ce que la marche de l'horloge, comparée aux étoiles ou à une excellente pendule, n'éprouve plus du tout de variations.

M. Breguet s'est servi des lames compensatrices pour former des thermomètres d'une sensibilité prodigieuse. Il les compose de trois couches, argent, or, platine, unies ensemble par pression, à une haute température, et réduites, par le laminage, à une épaisseur de $\frac{1}{100}$ de ligne. Ce système est ensuite roulé en spire, et fixé dans cet état par un recuit modéré. Alors on le suspend par le haut à un support fixe, et l'on attache au bas une aiguille métallique horizontale pour servir d'index, *fig.* 51. Lorsque cet appareil est placé dans un air d'une température constante, il prend le degré d'allongement et

de courbure qui convient alors aux lames superposées; mais, pour peu que la température vienne à varier, les spires se tordent davantage ou se détordent, et aussitôt l'index marche. Si l'on compare ces mouvemens aux variations de température observées avec un bon thermomètre, on en peut déduire la marche de l'instrument. Quand il est ainsi réglé, sa grande surface et son peu de masse le rendent propre à indiquer subitement les plus petites variations de température. Par exemple, si on le met sous un récipient de machine pneumatique, et qu'on fasse le vide un peu rapidement, on le voit marcher aussitôt au froid, et indiquer un abaissement de température considérable. Bientôt l'équilibre de température se rétablissant, il revient à son état primitif. Alors rendez l'air, et le mouvement de l'index indiquera une élévation de température aussi subite et aussi grande que l'avait été l'abaissement. On suppose que cette chaleur est dégagée par le gaz raréfié resté dans l'intérieur du récipient, et qui est d'abord condensé par celui du dehors qui s'y précipite.

On a proposé de suppléer aux compensateurs des pendules, en formant leur tige avec une règle de bois séché au four, bouilli dans l'huile et verni. Mais, malgré les éloges donnés à ce procédé, je puis affirmer, par ma propre expérience, qu'il expose à des variations de marche considérables, résultantes probablement des mouvemens de torsion que donne à la verge le plus ou moins de sécheresse de l'air.

CHAPITRE X.

Mesure de la dilatation des Gaz par la chaleur.

LES expériences de MM. Lavoisier et Laplace, sur la dilatation des corps solides, nous ont appris qu'entre les termes de la glace fondante et de l'eau bouillante, la dilatation des métaux solides est sensiblement proportionnelle à celle du mercure. La même proportionnalité subsiste encore, dans ces limites, entre les dilatations du mercure et celles des gaz

secs. Ce résultat important a été parfaitement établi par M. Gay-Lussac.

Pour mesurer exactement la dilatation des substances gazeuses, il faut d'abord les introduire, en quantité connue, dans des tubes exactement gradués en parties de capacités égales, et terminés par une boule dont le volume soit considérable comparativement à leur diamètre. Il faut ensuite les y contenir sous une pression connue, les exposer à des températures diverses, et observer les quantités dont ils se dilatent ou se condensent dans ces divers changemens; en un mot, il faut former un véritable thermomètre à gaz. Mais cette opération, pour être exacte, exige plusieurs précautions indispensables.

D'abord pour graduer les tubes on se sert d'un procédé imaginé par M. Gay-Lussac, et que j'ai décrit dans le *Traité général*, en parlant des thermomètres. Pour connaître la capacité de la boule et celle du tube, on les remplit successivement de mercure, et on détermine par la balance l'excès de poids qu'ils acquièrent; car on sait qu'un millimètre cube de mercure à 0° pèse, en milligrammes, 13,59719, comme nous le verrons plus loin. Il faut ensuite que les tubes, avant d'y renfermer les gaz, soient parfaitement desséchés; car nous avons déjà dit que les tubes de verre qui sont restés ouverts et exposés à l'atmosphère, se couvrent intérieurement d'une petite couche d'eau imperceptible, que la chaleur en détache en la réduisant en vapeur. Si l'on ne commence pas par enlever cette petite couche d'eau, la vapeur qui s'en exhale, dans les températures diverses, se mêlera au gaz introduit dans le tube, et augmentera son volume; et comme la quantité de vapeurs ainsi formée croîtra avec la température, jusqu'à ce que la petite couche d'eau soit complètement épuisée, on voit que cette cause étrangère augmentera continuellement la dilatation propre du gaz à mesure que la température sera plus élevée: telle est l'erreur dans laquelle sont tombés plusieurs physiciens.

Le seul moyen d'éviter cet inconvénient, c'est de chasser d'abord cette petite couche d'eau, en chauffant le tube jusqu'à

la réduire en vapeurs ; mais, afin que l'air ne l'y réintroduise plus, par son contact, il faut remplir le tube avec du mercure, que l'on y fera bouillir comme dans un thermomètre ; et, ce qu'il est important de remarquer, soit que cette ébullition enlève ou non toute la couche d'eau adhérente au verre, du moins il ne pourra plus s'en rien exhiler quand le tube sera exposé à des températures moindres que celles où le mercure peut bouillir : telle est la première précaution que M. Gay-Lussac a prise.

Ensuite, pour n'introduire dans ses tubes que de l'air ou des gaz secs, il lute à leur extrémité ouverte, un autre tube plus large TT, *fig. 52*, que l'on peut regarder comme une sorte de récipient destiné à contenir le gaz. Ce tube est rempli en partie de fragmens de muriate de chaux, ou de quelque autre sel susceptible d'absorber l'humidité. On peut même supposer que l'on y fait le vide, afin d'y introduire le gaz sans qu'il se mêle avec l'air. Maintenant, pour en faire entrer une certaine quantité dans le tube TG, M. Gay-Lussac emploie un petit fil de fer très-fin préalablement introduit dans ce tube ; il incline celui-ci ou le renverse verticalement, et il fait sortir ainsi une grande partie du mercure qu'il contient, lequel est remplacé par un certain volume de gaz représenté par GG, *fig. 53*. Avec quelques précautions, on parvient à n'avoir plus dans le tube qu'une petite colonne de mercure M, qui sert de piston ; et tout l'espace GG, depuis ce point jusqu'à la boule du tube, est occupé par le gaz sec qu'on y a introduit. S'il s'agit d'air atmosphérique, on n'a pas besoin de faire le vide dans le récipient TT, il ne faut que laisser l'air y séjourner quelque temps sur les sels, après quoi on l'introduit dans le tube TG, comme nous l'avons dit.

Le gaz étant introduit, il ne reste plus qu'à lui faire éprouver successivement diverses températures connues ; pour cela, M. Gay-Lussac emploie un vase métallique AB, *fig. 55*, en forme de parallépipède, dont le fond est placé sur un fourneau de même grandeur. On verse de l'eau dans ce vase, et on l'échauffe à divers degrés. Un thermomètre V, plongé verticalement dans cette eau, et dont la tige sort au-dessus du

couvercle du vase, sert pour indiquer à-peu-près sa température, et pour montrer s'il est nécessaire d'augmenter ou de diminuer le feu.

Mais il ne faut pas que le tube TG, qui contient le gaz, soit plongé dans l'eau de cette manière; car nous avons déjà fait remarquer, par l'expérience, que les diverses couches horizontales d'un liquide qu'on échauffe par son fond, n'ont pas les mêmes degrés de température. Ainsi, pour pouvoir connaître exactement celle qui agit sur le gaz, il faut placer le tube qui le contient, dans une situation horizontale, comme le représente la figure; alors sa température pourra être parfaitement indiquée par un excellent thermomètre *bts* placé vis-à-vis de lui dans la même couche, et disposé aussi horizontalement.

Mais nous avons dit que le vase était métallique; comment donc observer à travers ses parois les degrés du thermomètre *bts*, et le point variable G du tube gradué auquel s'arrête à chaque instant le volume du gaz? On ne peut pas tenir ce point G et la tige *ts* du thermomètre continuellement hors du bain d'eau chaude; car alors ces diverses parties n'étant plus à la température du bain, jetteraient de l'erreur sur les observations. Mais on peut, sans inconvénient, sortir ainsi les tubes de temps en temps, pendant le court intervalle nécessaire pour les observer; c'est ce que fait M. Gay-Lussac d'une manière fort simple. Les orifices *oo'*, par lesquels les tubes entrent dans le vase, sont fermés avec des bouchons de liège percés à leurs centres d'un trou, dans lequel chaque tube peut glisser à frottement. Veut-on observer l'état du gaz GG? On fait sortir le tube TG jusqu'à ce que l'extrémité M de la petite colonne de mercure vienne se montrer à l'orifice *o*. On voit alors à quelle division du tube elle répond, et l'on connaît ainsi le volume du gaz à cet instant. Veut-on observer de même le thermomètre? On fait également sortir sa tige en dehors jusqu'à ce que l'extrémité *t* de la colonne de mercure vienne se montrer à l'orifice *o'*; et la division du thermomètre à laquelle elle répond, indique, au même instant, la température de la couche horizontale où le gaz se trouve placé.

On connaît donc, à chaque instant, de la manière la plus exacte, la température de ce gaz. Ainsi, en mettant d'abord dans le vase de l'eau à zéro; puis élevant successivement la température de l'eau jusqu'à l'ébullition, ou réciproquement la ramenant depuis l'ébullition jusqu'au terme de la glace fondante, on pourra comparer avec précision la marche du gaz et celle du thermomètre; c'est-à-dire, que l'on connaîtra, à chaque instant, par les divisions tracées sur les deux tubes, le volume apparent du mercure et le volume apparent du gaz. En retranchant de ces résultats les effets dus à la dilatation du verre dont sont faits les tubes, on aura les volumes absolus; enfin si la pression atmosphérique a varié dans le cours des expériences, ce qui est le cas le plus ordinaire, on corrigera l'effet de ces variations d'après la loi de Mariotte. On connaîtra donc ainsi très-exactement les volumes que la même masse de gaz aurait occupés à des températures diverses, en la supposant toujours exposée à une même pression barométrique, par exemple, à $0^m,76$. Cela fait, il ne restera plus qu'à comparer ces volumes entre eux, pour savoir si la dilatation est uniforme ou variable; car, si elle est uniforme, les accroissemens successifs du même volume seront proportionnels aux accroissemens des températures auxquelles le gaz aura été soumis; mais si la dilatation est croissante ou décroissante, cette proportionnalité n'aura plus lieu. En faisant l'expérience de cette manière, avec toutes les précautions que nous avons décrites, en la répétant un grand nombre de fois, soit pour l'air atmosphérique, soit pour les différens gaz à l'état de dessiccation parfaite, M. Gay-Lussac est parvenu aux résultats suivans.

Tous les gaz permanens, exposés à des températures égales, sous la même pression, se dilatent exactement de la même quantité. L'étendue de leur dilatation commune, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de 100 degrés du thermomètre centésimal, est égale à $0,375$ de leur volume primitif à 0° , la pression étant supposée constante. Entre ces deux limites, la dilatation des gaz est exactement proportionnelle à la dilatation du mercure; d'où il résulte que, pour

chaque degré du thermomètre centésimal, et sous une même pression, tous les gaz se dilatent d'une quantité égale à 0,00375 du volume qu'ils occupaient à la température de la glace fondante.

Ces résultats avaient été obtenus presque en même temps par M. Dalton, habile physicien de Manchester; ils ont encore été récemment confirmés par de nouvelles expériences que MM. Dulong et Petit ont faites avec un appareil semblable à celui de M. Gay-Lussac. Seulement ces physiciens, ayant employé un bain d'huile fixe au lieu d'eau, pour élever les températures, ils ont pu étendre plus loin les comparaisons des dilatations; ils ont trouvé ainsi qu'au-dessus de 100°, le mercure se dilate plus rapidement que les gaz, et d'autant plus, qu'il s'approche davantage du terme de son ébullition; résultat qui lui est commun avec tous les autres liquides, comme on le verra plus loin. Ils ont reconnu également que le verre, le cuivre, le platine et le fer suivent, à ces degrés élevés, une marche de dilatation croissante, relativement aux gaz, et même, relativement au *thermomètre à mercure*; parce que, dans cet instrument, la dilatation de l'enveloppe de verre, qui est pareillement croissante, dissimule en partie l'accélération de celle du mercure, et produit ainsi *une dilatation apparente* plus rapprochée de l'uniformité.

M. Gay-Lussac s'est également assuré que les substances aériformes, produites par la vaporisation des liquides, se dilatent absolument comme les gaz, tant qu'elles ne reprennent point la liquidité. Pour s'en assurer, il a ôté les sels dessiccatifs du récipient TT; il a introduit dans le tube TG des gaz non desséchés, et par conséquent chargés de l'humidité qui peut s'y vaporiser naturellement; humidité que les sels caustiques enlèvent en augmentant de poids. Par ce moyen, l'espace GG s'est trouvé rempli d'un mélange de gaz et de vapeurs aqueuses; et ce mélange, porté successivement à diverses températures plus élevées, s'est dilaté absolument comme aurait fait un égal volume de gaz sec. Mais il ne faudrait pas chercher la même loi en abaissant la température au-dessous du degré où elle se trouvait quand le gaz a été introduit; car nous

prouverons plus loin, par l'expérience, qu'un même volume de gaz, à une température donnée, ne peut contenir qu'une certaine quantité limitée d'eau en vapeurs; d'où il suit que, s'il est ainsi saturé de vapeurs aqueuses à un certain degré du thermomètre, et que la température vienne à s'abaisser, une partie de cette vapeur se précipitera à l'état liquide. Cette portion, qui se liquéfie, occupant un volume beaucoup moindre, diminuera le volume absolu du gaz, changera sa force élastique, et, par l'effet de cette double cause, fera varier les lois de sa dilatation apparente.

M. Gay-Lussac a également essayé la dilatation de la vapeur de l'éther; il l'a trouvée la même que celle des gaz, ce qui porte à croire que le résultat est général pour toutes les espèces de vapeurs, tant qu'elles restent dans l'état aériforme.

Au moyen des résultats que nous venons d'exposer, on peut résoudre exactement toutes les questions physiques que l'on peut se proposer sur les volumes d'une même masse de gaz, exposée successivement à diverses pressions et à diverses températures.

Supposons, par exemple, qu'à la température de la glace fondante et sous la pression de $0^m,76$, le volume de cette masse soit exactement d'un litre. On demande ce qu'il deviendra à la température de 10^0 , la pression restant la même. Pour cela, il n'y a qu'à l'augmenter de dix fois $0,00575$, qui représente la dilatation pour un degré relativement à un volume primitif exprimé par 1 : cela lui ajoutera $0^l,0375$; ainsi le volume dilaté sera $1^l,0375$, à la nouvelle température.

Voulons-nous maintenant faire varier aussi la pression, et la rendre, par exemple, égale à $0^m,38$ au lieu de $0^m,76$; il faudra, d'après la loi de Mariotte, diviser notre volume $1^l,0375$ par la nouvelle pression $0^m,38$, à laquelle on veut le soumettre, et le multiplier par la même pression $0^m,76$ qu'il était censé supporter d'abord; car, à température égale, les volumes d'une même masse de gaz sont réciproques aux pressions. L'opération revient à multiplier notre volume par le rapport $\frac{0^m,76}{0^m,38}$ lequel est égal à 2. Le volume cherché sera donc

2^l,0750, double de ce qu'il était avant qu'on eût fait changer la pression.

Réciproquement si ce volume 2^l,0750 était donné, avec la pression 0^m,38 et la température 10°, on le ramènerait aisément au volume primitif qu'il doit occuper à 0° de température, et sous la pression 0^m,76. L'opération serait précisément inverse de la précédente. Car d'abord, en le multipliant par $\frac{0^m,38}{0^m,76}$, ce qui donnerait 1^l,0375, on le ramènerait à la nouvelle pression 0^m,76; et ensuite, en le divisant par 1,0375 expression d'un volume dilaté, de 0 à 10°, on aurait pour quotient 1^l, qui exprimerait son volume primitif à 0° et sous la pression de 0^m,76. Ce mode de réduction s'appliquerait de même à tout autre exemple, et il sert à chaque instant pour ramener les expériences à des circonstances comparables.

CHAPITRE XI.

De la dilatation des Liquides par la chaleur.

EN étudiant les dilatations des gaz et des corps solides, et les comparant, soit entre elles, soit à celles du mercure, depuis le terme de la glace fondante jusqu'à celui de l'ébullition de l'eau, nous avons vu que toutes ces dilatations suivaient une marche sensiblement uniforme, c'est-à-dire, que les volumes de ces divers corps, mesurés à divers degrés du thermomètre compris dans cet intervalle, étaient toujours proportionnels entre eux. Cette uniformité n'a plus lieu dans les dilatations des liquides, sur-tout lorsqu'ils approchent du point de l'ébullition ou de la congélation; et l'analogie porte à penser que des inégalités semblables se montreraient aussi dans les dilatations des corps solides, si on les échauffait jusqu'à les fondre, et dans celles des gaz, si on pouvait les refroidir jusqu'à les liquéfier. Ces curieuses propriétés, qui semblent tenir à la constitution même des corps et à la disposition des particules

qui les composent, méritent d'être étudiées avec le plus grand soin.

Pour les liquides on peut y parvenir de diverses manières. La plus simple est celle que nous avons employée pour les gaz. Elle consiste à se servir d'un tube de verre exactement calibré, et terminé par une boule dont la capacité soit considérable par rapport à celle du tube. On mesure cette capacité, en la remplissant de mercure, comme nous l'avons expliqué page 247, et l'on divise aussi le tube en parties de la même mesure, par le même procédé; enfin on remplit la boule et une partie du tube avec le liquide que l'on veut étudier; on l'y fait bouillir pour le purger d'air, et lorsqu'il s'est dilaté jusqu'à remplir le tube, on scelle celui-ci à la lampe, en un mot on en fait un véritable thermomètre. Ensuite on place cet appareil dans un bain liquide, que l'on porte successivement à diverses températures, avec toutes les précautions que nous avons expliquées pour les gaz. En observant, à chaque fois, les divisions du tube auxquelles la colonne s'arrête, on connaît exactement le volume qu'elle occupe, et l'on peut mesurer sa dilatation. Quand on la connaît, on recommence ou on continue l'expérience pour un intervalle double, triple; et en comparant les diverses valeurs de la dilatation entre elles, on sait si sa marche, comparée à celle du mercure, est uniforme ou variable. Si elle est uniforme, les accroissemens successifs seront proportionnels aux différences de température; mais si la dilatation est croissante ou décroissante, cette proportionnalité n'aura plus lieu.

Deluc a construit ainsi un grand nombre de thermomètres avec lesquels il a fait des expériences très-exactes sur les dilatations des liquides. On en peut voir le tableau dans le *Traité général*. Il employait toujours des liquides purgés d'air, et cette préparation leur donnait la faculté de supporter, sans bouillir, des températures bien supérieures à celles de leur ébullition à l'air libre. C'est ainsi, par exemple, que l'alcool très-rectifié, qui bout à l'air libre à une température d'environ 81° cent. ou 65° R, étant purgé d'air et enfermé dans le vide, soutient, sans bouillir, la température de 100°, tout en con-

tinuant de s'échauffer et de se dilater par la chaleur. Nous connaissons la cause de ce phénomène quand nous aurons établi la théorie de la formation des vapeurs dans le vide et dans les gaz.

On peut encore déterminer la dilatation des liquides en y pesant, à diverses températures, un même corps métallique dont on connaît la dilatation. Cette méthode a été employée dans la détermination du gramme, comme nous le verrons plus loin.

Les deux procédés que nous venons d'indiquer, ne donnent que la dilatation apparente des liquides sur lesquels on opère : pour en déduire leur dilatation absolue, il faut connaître celle des corps solides dans lesquels on les renferme, ou que l'on pèse en les plongeant dans leur masse. Comme cet élément ne peut jamais être tout-à-fait exempt d'incertitude, on peut vouloir se dispenser de l'employer. On y parvient de la manière suivante : on forme un large siphon, dont la partie inférieure est horizontale, et dont les deux branches se relèvent verticalement. On y verse le liquide que l'on veut observer, et on le met de niveau dans ses deux branches. Cela fait, on échauffe l'une d'elles, en maintenant l'autre à une température constante, et l'on observe de combien le sommet de la colonne échauffée s'élève au-dessus de la colonne froide. En effet, les pressions des deux colonnes sur le liquide contenu dans la branche horizontale, devant toujours être égales entre elles, puisqu'elles communiquent librement par le moyen de cette branche, la quantité dont la plus chaude s'allonge n'est que l'expression de la dilatation que la chaleur cause dans sa hauteur; de sorte qu'on connaîtra ainsi immédiatement cette dilatation d'après la différence du niveau du liquide dans les deux branches. Mais ce genre d'observation, qui paraît si simple, exige une infinité de précautions; car il faut constater avec un soin extrême l'exacte verticalité des branches; il faut mesurer exactement la température de chacune d'elles, et l'entretenir constante pendant un temps assez long pour pouvoir mesurer la différence de niveau; enfin, cette mesure même doit se prendre avec un appareil divisé très-

précis, armé d'une lunette à fils, qui permette d'observer les plus petites fractions de la hauteur. Avec toutes ces précautions, le procédé doit donner des résultats d'une sûreté parfaite. C'est ainsi qu'il a été employé par MM. Dulong et Petit pour déterminer la dilatation absolue du mercure, qu'ils ont trouvée de $\frac{1}{5550}$ par chaque degré centésimal entre les températures de 0° et de 100° , comme je l'ai déjà dit plus haut.

De tous les liquides connus, l'eau est celui dont on a le plus étudié les dilatations. En lui appliquant successivement les diverses méthodes que nous venons d'exposer, on arrive également à ce résultat remarquable, savoir que l'eau, en se refroidissant, ne se contracte pas d'une manière constante. Sa contraction diminue, pour chaque degré, à mesure que la température descend vers le 4^e. degré du thermomètre centésimal. Au-delà de cette limite, si la température baisse davantage, le volume de l'eau reste quelque temps constant, après quoi il se dilate au lieu de se contracter. Il y a donc un point auquel le volume de l'eau est plus petit qu'à toute autre température; c'est alors que sa *densité* est la plus grande, c'est-à-dire qu'elle a le plus de masse sous le même volume. L'ensemble des expériences que l'on a faites sur la détermination de ce maximum le place entre $+ 3^{\circ},43$ et $+ 4^{\circ},44$; l'accroissement du volume de l'eau pour des températures inférieures à ce terme, s'étend même au-delà du 0° . Car, suivant une remarque de M. Blagden, l'eau maintenue tranquille et abritée du contact de l'air, peut se refroidir considérablement au-dessous de la température de la glace fondante sans prendre l'état solide, quoiqu'elle se gèle tout-à-coup si on l'agite, ou si on y jette un petit cristal de glace. Ce phénomène paraît tenir à ce que les molécules de l'eau ainsi refroidies avec lenteur, se tournent graduellement les unes vers les autres, dans les positions où leur attraction mutuelle est la plus énergique, et par conséquent la plus favorable à l'état de solidité. Lorsqu'on y plonge un cristal déjà ainsi disposé, les molécules qui le composent ne font, pour ainsi dire, qu'appeler à cette position les molécules liquides. L'agitation produit le même effet, lorsqu'elle amène un

nombre suffisant de particules dans les circonstances analogues. Selon cette manière de voir, l'expansion éprouvée alors par le système serait un phénomène secondaire, dépendant de la constitution individuelle des particules de l'eau.

Le point du maximum de condensation de l'eau est celui que les savans français ont adopté pour établir l'unité de poids dans le système des mesures métriques; cette unité de poids, que l'on nomme *gramme*, est égale au poids d'un centimètre cube d'eau distillée amenée à la température du maximum de condensation.

Il suit de là que, si l'on connaît le nombre de centimètres cubes que contient le volume d'un vase, on saura, par cela même, le nombre de grammes d'eau qu'il contiendrait à la température du maximum de condensation; ou, réciproquement, si l'on détermine, par la balance, le poids de l'eau contenue dans le vase à cette même température, on aura tout de suite son volume en comptant chaque gramme pour un centimètre cube. Il n'est pas même nécessaire que la pesée soit faite précisément à la température du maximum de condensation, pourvu qu'on l'y ramène d'après les lois de la dilatation de ce liquide que j'ai exposées dans le *Traité général*.

En étudiant les dilatations des autres liquides près des points de leur congélation et de leur ébullition, l'on y découvre des singularités analogues à celle que l'eau vient de nous offrir. Il y a des substances qui se dilatent en se gelant comme l'eau; tels sont le fer fondu, le bismuth, l'antimoine et le soufre. D'autres, au contraire, se contractent subitement lorsqu'elles se gèlent, et le mercure est dans ce cas; sa contraction est même très-considérable. Il se gèle vers 39° au-dessous de 0. Ces phénomènes peuvent nous donner quelques indications sur l'arrangement que les particules des corps prennent en passant de l'état liquide à l'état solide ou à l'état aériforme, et par suite, sur les conditions physiques qui constituent ces états divers. Mais, pour pouvoir nous livrer à ces considérations, il faut d'abord réduire les phénomènes de l'expansion des liquides à des formules générales qui permettent de les embrasser dans leur ensemble. C'est ce que j'ai fait dans

le *Traité général*. Ici je me bornerai à dire que la dilatation absolue de l'eau, déterminée de cette manière depuis 0° jusqu'à 100°, est 0,04660, c'est-à-dire environ 466 dix millièmes de son volume primitif à 0°. Celle de l'alcool bien rectifié est, entre les mêmes limites, 0,12548; elle varie avec son degré de rectification. Enfin, on a vu que celle du mercure est $\frac{100}{5550}$, ou $\frac{9}{111}$, d'après les expériences de MM. Dulong et Petit, dont j'ai parlé plus haut.

La manière dont les corps propagent la chaleur, selon qu'ils sont gazeux ou solides, ou liquides, est encore une conséquence de leur constitution dans ces trois états. Si le corps est solide, les particules, qui sont les premières échauffées, ne pouvant se déplacer, communiquent leur excès de température à celles qui les environnent; et c'est seulement de cette manière, et de proche en proche, que l'excès de leur température se transmet aux molécules plus éloignées. On peut en avoir la preuve en plongeant l'extrémité d'une barre métallique dans une source de chaleur constante; par exemple, dans du plomb fondant, que l'on entretient constamment au degré de fusion. Car si l'on applique à cette barre, en plusieurs points, des thermomètres dont les boules soient logées dans sa substance, et environnées de mercure pour rendre le contact plus intime, on voit ces thermomètres monter successivement, et d'autant plus tôt qu'ils sont plus près de l'extrémité échauffée de la barre. Dans les gaz, au contraire, dont les particules sont si éloignées les unes des autres, que leur action réciproque n'est pas sensible, celles qui sont les premières échauffées se dilatent tout-à-coup; et, devenues ainsi plus légères que le reste du fluide dans lequel elles nagent, elles s'envolent par l'excès de leur légèreté. On a une preuve sensible de cet effet dans les chambres très-échauffées; car des thermomètres, placés à diverses hauteurs, y montrent des températures successivement croissantes, et quelquefois tellement différentes, que des animaux peuvent vivre dans la partie inférieure, qui mourraient dans la partie supérieure de cette atmosphère. On en peut encore avoir un exemple frappant, pendant l'hiver, dans nos appartemens échauffés; car si l'on ouvre une porte don-

nant sur le dehors, l'air plus froid qui entre par le bas de l'ouverture, et l'air plus échauffé qui sort par le haut, forment deux courans contraires, dont la direction devient sensible, lorsqu'on y expose la flamme d'une bougie. Le courant ascendant, qui se produit le long des tuyaux des poêles, et en général des surfaces échauffées et verticales, est encore un effet du même genre, et sa force ascensionnelle est telle qu'on s'en sert quelquefois pour faire tourner des roues à volans.

Les molécules des liquides étant indépendantes entre elles, comme celles des gaz, on conçoit que la chaleur doit y produire des mouvemens du même genre. Mais aussi, comme elles sont beaucoup plus rapprochées les unes des autres, une partie de la chaleur pourrait s'y propager immédiatement de molécule à molécule, ainsi que dans les corps solides. Si, même, ce dernier effet était beaucoup plus rapide que l'autre, il pourrait le détruire en partie ou en totalité. Comme nous ne pouvons pas prévoir *a priori* lequel de ces deux cas a lieu, c'est à l'expérience à en décider. Or, elle prouve que, dans tous les liquides jusqu'à présent connus, la propagation de la chaleur, par communication immédiate, est extrêmement faible et comme insensible, comparativement à la communication par les courans ascendants.

Pour mettre ce résultat en évidence, il faut faire en sorte d'isoler ces deux modes de communication. C'est à quoi l'on parvient en échauffant une masse liquide par sa partie supérieure, ou en la refroidissant par sa partie inférieure. Dans le premier cas, les particules que l'on échauffe, devenant plus légères, ne peuvent pas descendre; dans l'autre, les particules refroidies devenant plus lourdes, ne peuvent pas monter. Pour mettre ces phénomènes en évidence, il faut prendre un vase de verre, ou de toute autre matière, qui propage lentement la chaleur. Assujettissez un thermomètre de manière que sa boule réponde au fond du vase, et disposez de même un autre thermomètre qui réponde à la partie supérieure; ou mieux encore, que le vase soit percé latéralement de deux trous, pour laisser passer les deux instrumens, *fig.* 54. Versez alors un liquide froid, de l'eau, par exemple, dans la partie inférieure du vase,

de manière que la boule du thermomètre, qui s'y trouve, soit entièrement recouverte; puis, faisant flotter sur cette eau quelques corps légers d'une large surface, par exemple, une petite plaque de bois très-mince, versez-y doucement de l'eau bouillante, que vous y ferez descendre sans mouvement brusque, par le moyen d'un siphon : vous aurez ainsi deux couches fluides superposées, et de températures très-inégales. Cependant le thermomètre inférieur ne s'échauffera pas sensiblement, au moins dans les premiers instans de l'expérience; réciproquement, si vous assujettissez au fond du vase un plateau de glace, recouvert d'une petite couche d'eau froide, et que vous versiez de l'eau chaude par-dessus, avec les mêmes précautions, cette glace ne refroidira pas l'eau, ni l'eau ne fondra la glace, si ce n'est très-lentement. En variant les applications de ce procédé, on produit une foule de phénomènes curieux, qui confirment les lois de la dilatation des liquides, et que l'on a particulièrement employés à la détermination du maximum de densité de l'eau. On peut les voir dans le *Traité général*.

CHAPITRE XII.

Des Vapeurs en général, et d'abord de leur formation et de leur force élastique dans le vide.

Nous avons déjà eu plusieurs fois l'occasion de voir que les liquides, lorsqu'ils sont échauffés jusqu'au point de l'ébullition, dans un vase ouvert et exposé à l'air libre, se convertissent en vapeurs qui se dissipent dans l'atmosphère. Nous avons remarqué que cet effet n'a pas seulement lieu à la température de l'ébullition, puisqu'il s'exhale aussi des vapeurs aqueuses des parois humides d'un ballon de verre dans lequel on fait le vide; et nous avons pu observer que ces vapeurs ont une force de ressort comme les gaz, puisqu'elles dépriment le mercure dans le tube barométrique adapté à la machine pneumatique. Ce n'est pas uniquement dans le vide que ces vapeurs se développent ainsi à toutes les températures; il est seulement

plus aisé de les y remarquer. Mais, pour en voir l'effet dans l'air même, prenez un ballon de verre, dans lequel vous mettez une éprouvette AR, *fig.* 55, pareille à celle de la pompe à condenser; puis, après avoir mouillé les parois intérieures de ce ballon, en le laissant communiquer librement avec l'atmosphère, fermez-le et observez la tension intérieure que l'éprouvette indique. Cela fait, plongez ce ballon dans de l'eau chaude, à une température connue; l'air intérieur se dilatera et fera monter l'éprouvette. Or, la pression qu'il exercera ainsi, sera plus forte qu'elle ne devrait l'être, d'après la loi de la dilatation des gaz secs. Il se forme donc, dans ce cas, des vapeurs aqueuses élastiques qui se mêlent à l'air, et augmentent sa force de ressort.

Ces phénomènes ont également lieu dans tous les autres gaz; par conséquent il nous devient nécessaire de les étudier spécialement pour pouvoir connaître avec exactitude ce qui tient à l'élasticité du gaz, ce qui tient à l'élasticité de la vapeur; et, comme nous avons déjà complètement déterminé ce qui concerne les gaz secs, on voit qu'il nous faut maintenant examiner par l'expérience les propriétés de la vapeur prise isolément. Pour cela, il nous suffira presque de suivre pas à pas un travail excellent donné sur cette matière par M. Dalton, dans les Mémoires de Manchester, pour l'année 1805.

Cet habile physicien commence par étudier les effets des vapeurs dans le vide. Le procédé qu'il emploie pour cela est extrêmement simple. On prend un tube de baromètre, divisé sur sa longueur en parties égales, gradué, par exemple, en centimètres et millimètres: ensuite on y verse du mercure récemment bouilli, de manière à le remplir presque entièrement, et on achève de le remplir tout-à-fait, en recouvrant le mercure avec une très-petite couche d'eau, ou du liquide, quel qu'il soit, dont on veut essayer les vapeurs. Alors, bouchant ce tube avec le doigt, on le renverse, et l'on promène à plusieurs reprises le liquide dans toute sa longueur, afin de détacher les petites bulles d'air adhérentes à ses parois. On redresse de nouveau le tube, en tenant son ouverture en haut. On ôte le doigt; l'excédant du liquide, qui n'est point resté attaché aux parois du tube, monte vers l'ouverture, entraînant avec lui

quelques bulles d'air. On laisse dégager cet air et on achève de remplir le tube avec du mercure, puis on le bouche de nouveau avec le doigt, et on le renverse dans une cuvette remplie de ce même métal, comme on ferait pour avoir un baromètre ordinaire. C'est même réellement un baromètre, dont les parois intérieures sont mouillées avec le liquide dont on a fait usage; mais le mercure s'abaisse dans ce baromètre à liquide, plus qu'il ne le fait au même instant dans un baromètre où l'on a fait bouillir le mercure, parce que les vapeurs qui s'exhalent des parois humectées du tube exercent intérieurement une force élastique qui déprime la colonne de mercure. Pour observer complètement ces effets, il faut attendre quelques instans, afin que la couche humide qui mouille les parois du tube ait eu le temps de s'en détacher peu-à-peu, et de monter, au moins en partie, à la surface du mercure, où elle forme une petite couche de un ou deux millimètres d'épaisseur. Alors, en comparant la hauteur de la colonne de mercure élevée dans le tube et augmentée du poids de la petite couche liquide, à celle que la pression de l'atmosphère élève au même instant dans un baromètre purgé d'air, l'excès de la seconde sur la première fait connaître la *force élastique de la vapeur*, ou ce que l'on nomme sa tension. Par exemple, si la température est de $18^{\circ},75$, et que le liquide employé soit de l'eau bien pure, le mercure dans le baromètre à liquide se tiendra plus bas d'environ 14 millimètres que dans le baromètre purgé d'air. Si le liquide est de l'éther, et que les circonstances soient les mêmes, la force élastique de la vapeur, ou sa tension, sera beaucoup plus grande.

Avant d'aller plus loin, il faut examiner diverses propriétés qui distinguent essentiellement les vapeurs d'avec les gaz. L'élasticité d'un gaz, ou sa force de ressort, augmente quand on diminue l'espace où il est renfermé; le gaz alors se comprime sur lui-même, en résistant toujours davantage, et sa force de ressort est inversement proportionnelle à l'espace qu'on lui fait occuper. Rien de tout cela n'arrive avec les vapeurs, du moins quand l'espace où elles se trouvent en contient toute la quantité qui s'y élève naturellement à la température où l'on opère. Alors, si l'on plonge le tube qui les renferme dans un

vase cylindrique, profond et rempli de mercure, *fig.* 56, à mesure que l'on y descend le tube, on voit l'espace CH occupé par la vapeur, diminuer de plus en plus, sans que la longueur AH de la colonne de mercure intérieure éprouve la plus légère variation. Donc, à mesure que vous resserrez l'espace où la vapeur existe, une portion de cette vapeur perd son élasticité et repasse à l'état liquide. En enfonçant ainsi le tube dans le mercure, on peut liquéfier toute la vapeur, et cela arrive quand la portion CA du tube, élevée au-dessus du niveau extérieur du mercure, égale la hauteur AH de la colonne intérieure, plus l'épaisseur que la petite couche liquide, et la vapeur réduite aussi en liquide, peuvent occuper.

Une autre différence entre les vapeurs et les gaz, qui peut être regardée comme une conséquence de la précédente, c'est que si vous augmentez, dans un espace donné, la quantité de matière gazeuse, ou la quantité de matière susceptible d'y développer un gaz, vous augmentez en même temps la force élastique que ce gaz exerce; mais en augmentant, dans un espace donné, la quantité de liquide non vaporisée, vous n'y changerez nullement la tension de la vapeur. Ainsi cette tension sera la même dans le tube barométrique de l'expérience précédente, quelle que soit l'épaisseur de la couche liquide amassée au-dessus de la colonne de mercure, pourvu toutefois que, dans le calcul, on ait égard au poids de cette petite couche, qui fait partie de la colonne élevée intérieurement.

Le caractère essentiel des vapeurs est donc que, pour chaque température, il n'en peut exister qu'une quantité limitée dans un espace donné, de sorte qu'en diminuant graduellement l'espace, tout ce qui excède cette quantité se réduit aussitôt en liquide par la pression, sans que la force élastique augmente; tandis que les gaz, résistant à la pression, peuvent être condensés indéfiniment, sans se réduire à l'état liquide par aucune pression connue. C'est pourquoi on donne souvent à ces derniers le nom de *gaz permanens*, afin de les distinguer des *vapeurs*.

L'accroissement de la force élastique par la chaleur est aussi très-différent dans ces deux espèces de fluides aériformes, du moins lorsque l'on fournit à l'espace toute la quantité de va-

peurs qu'il peut contenir. Les forces élastiques des gaz secs à la température de l'eau bouillante et à celle de la glace fondante, sont entre elles comme 1,375 à 1 : celles de la vapeur aqueuse entre les mêmes termes, dans un espace saturé, sont entre elles comme 150 à 1.

Après avoir ainsi constaté les propriétés caractéristiques des vapeurs, le premier objet de nos recherches doit être de mesurer leurs forces élastiques à diverses températures. L'appareil que nous avons indiqué, d'après M. Dalton, est encore extrêmement propre pour cet objet ; il ne faut qu'entourer notre tube par un autre plus large, fermé à sa base avec un long bouchon de liège que le premier tube traverse, *fig. 57*. En remplissant l'intervalle des deux tubes avec de l'eau portée successivement à diverses températures, on communique cette température à la vapeur ; ensuite, pour connaître exactement sa force élastique, on mesure la hauteur de la colonne de mercure AH qui se trouve soutenue dans le tube au-dessus du niveau ; et, après l'avoir réduite à la température extérieure de l'atmosphère, on la retranche de celle que l'on observe au même instant dans un baromètre purgé d'air par l'ébullition. Seulement, pour que l'expérience soit exacte, il faut mesurer la température de l'enveloppe d'eau chaude avec un thermomètre dont le réservoir RR soit cylindrique, et s'étende dans toute la longueur de cette eau, afin d'avoir la température moyenne de toutes ses couches.

Le plus que l'on puisse faire descendre le mercure dans le tube, par le procédé que nous venons de décrire, c'est de l'amener jusqu'au niveau ; car on ne pourrait plus observer le point où la vapeur s'arrête, si elle faisait descendre le mercure au-dessous de ce terme, et par conséquent la plus grande force élastique que l'on puisse observer avec cet appareil, est égale à la pression de l'atmosphère. Pour aller plus loin, M. Dalton s'est servi d'un tube recourbé en forme de siphon, *fig. 58*. Il le remplissait en partie de mercure avec les précautions que nous avons d'abord décrites, et il faisait passer ensuite dans la branche la plus courte le liquide qu'il voulait vaporiser. La longueur de cette branche était telle que l'espace occupé par la vapeur y fut nul ou peu considérable, à la température ordi-

naire de l'atmosphère. En redressant l'appareil, on observait si la vaporisation avait lieu; et, dans tous les cas, on marquait sur la longue branche la hauteur du mercure dans la petite, ce qui fixait la différence de niveau. Alors, pour élever la température du liquide, M. Dalton employait deux enveloppes de métal, cylindriques et concentriques l'une à l'autre, *fig. 59*, dont l'intérieure s'ajustait avec des bouchons autour de la branche du liquide. Ensuite on versait, entre les deux enveloppes, de l'eau à une température déterminée, aussi chaude qu'on le désirait. La force élastique de la vapeur, augmentant par la chaleur, abaissait le mercure dans la branche la plus courte, et l'élevait dans la branche la plus longue : en mesurant cette élévation, la doublant, et ajoutant la différence primitive de niveau, l'on avait la hauteur totale de la colonne de mercure élevée dans la longue branche au-dessus du niveau de ce liquide dans la plus petite, niveau que l'enveloppe métallique empêchait d'apercevoir. Ajoutant donc cette hauteur à celle que la pression atmosphérique soutenait au même instant, dans un baromètre purgé d'air, la somme exprimait la pression totale que la vapeur soutenait à cette température : c'était par conséquent la mesure de sa force élastique.

Le docteur Ure, de Glasgow, a fait à cette disposition de l'expérience plusieurs modifications très-heureuses, qui lui ont permis d'observer avec la plus grande facilité les forces élastiques correspondantes à de très-hautes températures. Son appareil est représenté *fig. 60*. A la double enveloppe métallique de M. Dalton, il substitue un ballon de verre rempli d'eau ou d'huile, et dans lequel pénètre un tube barométrique recourbé OTS, dont le bout extérieur O est ouvert, et l'intérieur S est fermé. Le liquide qu'il faut vaporiser est placé en S, et une ligne horizontale LL, marquée soit au diamant, soit par un petit fil de platine serré autour du tube, indique la limite de l'espace qu'on veut laisser occuper à la vapeur. Le reste du tube est rempli par du mercure, et la branche extérieure OT est réglée sur un fil à-plomb dans une situation parfaitement verticale. On la remplit de mercure à-peu-près jusqu'à la pression que l'on veut obtenir; puis, ayant marqué cette limite sur le

tube O T, par exemple en H, on mesure avec soin la hauteur verticale du point H, au-dessus de la ligne LL qui sert de repère dans l'autre branche. On peut prendre cette mesure avec une lunette à fils, susceptible de monter et de descendre sur un axe vertical divisé. Tout étant ainsi préparé, on chauffe le liquide contenu dans le ballon, en plaçant dessous une ou deux lampes à courant d'air. La température commune de ce liquide et de celui que l'on veut vaporiser est indiquée par un thermomètre très-sensible *tt*, dont la boule est placée dans le ballon tout près du tube même. Alors, quand cette température commence à être suffisamment élevée pour que le liquide contenu dans le tube se vaporise sous la pression qu'il supporte, on s'en aperçoit parce que le mercure commence à monter dans l'autre branche, au-dessus de H. On attend que l'élasticité de la vapeur ainsi formée abaisse le mercure contenu dans SL jusqu'au trait LL, ou même un peu au-dessous; alors, modérant l'action des lampes, de manière à maintenir la température au même degré pendant quelques instans, ce que la constance du thermomètre indique, on verse du mercure dans la branche ouverte jusqu'à ce que l'accroissement de pression réduise la vapeur à la limite précise LL; quand cela a lieu, on marque sur la branche verticale le point H' où la colonne de mercure se termine; et la hauteur HH' de ce trait au-dessus de celui qu'on avait marqué d'abord étant ajoutée à la différence primitive de niveau TH, donne la longueur totale TH' de la colonne de mercure que la vapeur a soutenue réellement, ce qui mesure conséquemment sa force élastique.

Conjointement avec les méthodes que nous avons déjà décrites, M. Dalton en a employé une autre pour connaître ou plutôt pour vérifier la tension de la vapeur aqueuse entre les températures de 0 et de 100 degrés. Il y emploie ce principe simple : lorsqu'un liquide bout sous une certaine pression de l'atmosphère, sa force élastique est égale à la pression que cette atmosphère exerce sur sa surface. Or, pour exposer ainsi un liquide à des pressions atmosphériques différentes et moindres que la pression ordinaire de l'atmosphère, il n'y a qu'à le mettre sous le récipient d'une machine pneumatique, à l'aide de laquelle on raréfiera l'air lentement et par degrés.

Cette opération détermine l'ascension du mercure dans le baromètre adapté à l'intérieur de la machine; et la hauteur à laquelle il s'arrête étant retranchée de celle qui s'observe au même instant dans le baromètre extérieur, donne la mesure de la pression qu'exerce encore l'air contenu dans le récipient. Si donc l'eau que vous y placez se trouve échauffée à un degré tel qu'elle commence à bouillir sous cette pression, vous connaîtrez par cela même que sa force élastique est égale à celle de l'air renfermé, et par conséquent vous pourrez l'exprimer par la longueur de la colonne de mercure que cet air soutient. Ainsi tout se réduit à mettre d'avance un thermomètre dans cette eau pour connaître sa température au moment où elle commence à bouillir. Cette seconde méthode employée par M. Dalton lui a donné des résultats qui s'accordaient très-bien avec les observations faites dans des tubes vides d'air.

On verra plus loin que la vapeur, en se mêlant à l'air dans un espace fermé, ajoute sa force élastique à celle que cet air avait déjà. D'après cela, on pourrait penser que, dans les expériences précédentes, la force élastique de l'eau qui entre en ébullition devrait s'ajouter à celle de l'air contenu dans les récipients, et par conséquent la doubler, ce qui est tout-à-fait contraire à l'expérience; car lorsque l'ébullition a lieu, l'éprouvette n'en est nullement affectée. Mais il faut faire attention que la masse d'eau liquide possède seule cette température élevée qui la fait bouillir. L'air renfermé dans le récipient se trouve à une température toute différente, et il la conserve par le contact des parois du récipient même et du plateau de glace de la machine, qui sont à la même température que lui. Or, tant que la température reste la même dans cet espace, il ne peut admettre qu'une certaine quantité déterminée de vapeur. Cette quantité se forme dès que le vase qui contient le liquide est placé sous le récipient; ainsi, quand l'eau vient à bouillir, les vapeurs qui s'en exhalent avec plus de rapidité ne font que compenser celles qui se condensent au même instant sur les parois du récipient, et dans l'air lui-même, sans qu'il en résulte le moindre accroissement dans la force élastique commune du mélange d'eau et de vapeurs, comme le prouve en effet l'observation. L'exacte vérité de ces

considérations sera parfaitement sentie quand nous aurons examiné les phénomènes qui résultent du mélange des vapeurs et des gaz ; nous nous bornons ici à les indiquer.

M. Dulong a employé le même procédé avec plusieurs modifications très-utiles. Au lieu de placer immédiatement le vase rempli de liquide sous le récipient de la machine pneumatique, il l'en sépare, comme le représente la *fig.* 61. Ce vase, représenté par V, est un matras à long col dans lequel est fixé un thermomètre très-sensible, dont la boule plonge dans le liquide L. Le haut de ce col communique avec un gros tube TT, formant avec lui un angle obtus, et autour duquel on adapte un manchon de verre qui lui sert d'enveloppe. L'intervalle est destiné à être rempli d'eau que l'on entretient à une basse température : le tube TT à son tour communique avec un grand ballon B qui contient environ trente litres d'air ; et enfin ce ballon communique avec une machine pneumatique qui peut y raréfier l'air à volonté. Lorsque cette raréfaction a été opérée au degré que l'on a jugé à propos d'adopter, et qui est marqué par le baromètre intérieur de la machine, on chauffe le vase V avec une petite lampe. Le liquide qu'il contient arrive bientôt à l'ébullition ; et, quand il a atteint ce terme, il suffit de continuer à le chauffer pour l'y maintenir, parce que la vapeur qui se forme redevient liquide dès qu'elle arrive dans le tube TT, qui est entretenu à une température basse ; et à cause de l'inclinaison de ce tube, le liquide ainsi formé retombe dans le matras V, de sorte que la quantité totale du liquide en ébullition reste toujours sensiblement la même, ce qui permet de continuer indéfiniment l'expérience. Veut-on, au lieu d'une atmosphère raréfiée, obtenir une atmosphère condensée, on substitue à la machine pneumatique une machine de compression, et l'on opère comme précédemment.

M. Dulong a fait, avec cet appareil, des expériences qui seront sans doute très-précieuses par leur exactitude ; mais, comme il ne les a pas encore publiées, je me suis borné à réunir les résultats de M. Dalton ; et, en les interpolant, j'en ai déduit la table suivante, qui exprime la force élastique de la vapeur en millimètres, depuis 20° au-dessous de zéro

jusqu'à 130° au-dessus. Toutefois on ne doit considérer ses indications comme certaines que dans l'intervalle où l'interpolation a été guidée par des résultats d'expériences, c'est-à-dire entre 20° et 100°. Il paraît, d'après les observations du docteur Ure, qu'au-dessus de 100° elle donne des tensions graduellement trop faibles.

DEGRÉS.	TENSION.	DEGRÉS	TENSION.	DEGRÉS.	TENSION.	DEGRÉS.	TENSION.
-20	1,333	18	15,353	56	119,39	94	611,18
-19	1,429	19	16,288	57	125,31	95	634,27
-18	1,531	20	17,314	58	131,50	96	658,05
-17	1,638	21	18,317	59	137,94	97	682,59
-16	1,755	22	19,417	60	144,66	98	707,65
-15	1,879	23	20,577	61	151,70	99	733,46
-14	2,011	24	21,805	62	158,96	100	760,00
-13	2,152	25	23,090	63	166,56	101	787,27
-12	2,302	26	24,452	64	174,47	102	815,26
-11	2,461	27	25,881	65	182,71	103	843,98
-10	2,631	28	27,390	66	191,27	104	873,44
-9	2,812	29	29,045	67	200,18	105	903,64
-8	3,005	30	30,643	68	209,44	106	934,81
-7	3,210	31	32,410	69	219,06	107	966,31
-6	3,428	32	34,261	70	229,07	108	994,79
-5	3,660	33	36,188	71	239,45	109	1032,04
-4	3,907	34	38,254	72	250,25	110	1066,06
-3	4,170	35	40,404	73	261,43	111	1100,87
-2	4,448	36	42,743	74	273,03	112	1136,43
-1	4,745	37	45,038	75	285,07	113	1172,78
0	5,059	38	47,579	76	297,57	114	1209,90
1	5,393	39	50,147	77	310,49	115	1247,81
2	5,748	40	52,998	78	323,89	116	1286,51
3	6,123	41	55,772	79	337,76	117	1325,98
4	6,523	42	58,792	80	352,08	118	1366,22
5	6,947	43	61,958	81	367,00	119	1407,24
6	7,396	44	65,627	82	382,38	120	1448,83
7	7,871	45	68,751	83	398,28	121	1491,58
8	8,375	46	72,393	84	414,73	122	1534,89
9	8,909	47	76,205	85	431,71	123	1578,96
10	9,475	48	80,195	86	449,26	124	1623,67
11	10,074	49	84,370	87	467,38	125	1669,51
12	10,707	50	88,742	88	486,09	126	1715,58
13	11,378	51	93,301	89	505,38	127	1762,56
14	12,087	52	98,075	90	525,28	128	1810,25
15	12,837	53	103,06	91	545,80	129	1858,65
16	13,630	54	108,27	92	566,95	130	1907,67
17	14,468	55	113,71	93	588,74		

Si l'on prend dans la table précédente les différences des forces élastiques de 99° à 100° , et de 100 à 101 , on trouve, pour la première, $26^{\text{mm}},54$, et pour la seconde $27^{\text{mm}},27$. La moyenne est $26^{\text{mm}},90$, ou à très-peu-près 1 pouce, ce qui vérifie la règle donnée page 205, pour la graduation des thermomètres, quand la pression diffère peu de $0^{\text{m}},76$.

La force élastique de la vapeur étant ainsi connue pour toutes les températures où l'on peut avoir le plus souvent occasion de l'observer, M. Dalton a cherché à déterminer de la même manière celle des vapeurs des autres liquides; et, par des expériences sur l'éther sulfurique, l'alcool, l'ammoniac liquide, une dissolution de muriate de chaux, l'acide sulfurique et le mercure, il crut y découvrir cette loi générale : que la variation de la force élastique de la vapeur, pour un même nombre n de degrés du thermomètre, est exactement la même pour tous les liquides, en partant de la température où les forces élastiques sont égales. Ainsi, en supposant, par exemple, de l'eau et de l'éther liquides, soumis l'un et l'autre à une même pression de $0^{\text{m}},76$, on trouve, par expérience que l'eau bout à 100 degrés du thermomètre, tandis que l'éther bout à 39° . A ces températures, les forces élastiques des deux vapeurs sont par conséquent égales entre elles, et soutiennent également une pression de $0^{\text{m}},76$. Maintenant, si l'on diminue chaque température de 10 degrés, ce qui amènera celle de l'eau à 90 , et celle de l'éther à 29 , on trouve que les forces élastiques des deux vapeurs sont encore égales, et qu'elles sont l'une et l'autre diminuées de $0^{\text{m}},23472$; c'est-à-dire, qu'elles ne soutiennent plus que $0^{\text{m}},52528$, ainsi que notre table l'indique pour la vapeur d'eau, 10° au-dessous de son ébullition.

Autre exemple. L'éther, dont se servait M. Dalton, bouillait à $38^{\circ},888$ sous une pression barométrique égale à $0^{\text{m}},75565$. Il mouilla, avec cet éther, un tube barométrique rempli de mercure, en prenant toutes les précautions décrites plus haut. L'ayant ensuite renversé, et placé dans la cuvette, une petite couche d'éther s'éleva en peu de minutes sur le sommet de la colonne de mercure, et la hauteur de cette colonne devint

enfin stationnaire à $0^m,4318$. La température de l'air de la chambre était alors à $16^{\circ},666$, et le baromètre, au même instant marquait, $0^m,75565$. On avait donc pour cet éther :

Température.	Force élastique.
1 ^{re} . Expérience. . $38^{\circ},888$ $0^m,75565$.
2 ^e . Expérience. . $16,666$	$0^m,75565 - 0^m,4318 = 0,52385$.
<hr/>	
Diff. des températ. $22,222$.	

Pour comparer ces résultats à ceux que donne la vapeur aqueuse, il faut d'abord chercher la température à laquelle celle-ci soutient $0,75565$; et, d'après notre table, on trouve que cela a lieu à la température de $99^{\circ},836$. Ainsi, à cette température, la force élastique de la vapeur aqueuse égalait celle de l'éther dans la première expérience. La seconde expérience est faite à une température plus basse de $22^{\circ},222$; abaissons donc aussi de cette quantité la température $99^{\circ},836$, nous aurons $77^{\circ},614$. Si la loi est vraie, la force élastique des deux vapeurs, à cette dernière température, est encore égale. En effet, d'après notre table, celle de la vapeur aqueuse est alors exactement de $0^m,31871$ au lieu de $0^m,32385$ que l'observation de l'éther a donnée. L'erreur est de $0^m,00514$.

M. Dalton essaya de même cette loi pour diverses autres températures, soit au-dessous de l'ébullition, soit au-dessus, et elle lui parut toujours se soutenir. Mais, comme la force élastique de l'éther devient très-considérable à de hautes températures, parce qu'elle est déjà très-forte à des températures basses, on conçoit qu'il fut obligé d'employer un baromètre à siphon, *fig. 59*. Cela lui donna même l'avantage de pouvoir vérifier la loi des forces élastiques de la vapeur aqueuse à des températures plus élevées qu'il n'avait pu le faire par l'expérience directe. Par exemple, en essayant ainsi la vapeur de l'éther à la température de $63^{\circ},888$, il trouva qu'elle soutenait une colonne de mercure égale à $0^m,889$, outre la pression atmosphérique qui était alors de $0^m,75565$; la force élastique de cette vapeur était donc alors $1644^m,65$. Pour la comparer à celle de la vapeur aqueuse, il faut partir

de la température où cette dernière égale $0^m,75565$; c'est $99^{\circ},836$, comme nous l'avons vu tout-à-l'heure. Il faut y ajouter l'augmentation de température éprouvée par la vapeur de l'éther depuis l'ébullition, c'est-à-dire $63^{\circ},888-38^{\circ},888$ ou 25° ; ce qui donne $124^{\circ},836$; cherchant donc, dans notre table, la force élastique de la vapeur de l'eau pour cette température, on la trouve égale à $1661^{mm},82$; au lieu de $1644^{mm},65$ que donne l'observation de l'éther. La différence est de $17^{mm},17$; et elle paraîtra peu considérable, comparative-ment à la grande intensité de la force absolue, si l'on songe à toutes les sources d'erreurs que comportent nécessairement de pareilles observations. Les expériences que fit M. Dalton sur l'alcool, l'ammoniac et la dissolution de muriate de chaux, lui parurent confirmer également la loi précédente. Toutefois, je dois prévenir que des observations postérieures, faites par divers physiciens, ont détruit l'idée de généralité et de rigueur qu'il lui avait attribuée. Le docteur Ure, de Glasgow, a publié à ce sujet des recherches dont la précision paraît ne guère laisser de doute, et un jeune et habile chimiste français, M. Despretz, a été conduit par une autre voie aux mêmes conséquences. Néanmoins, tout imparfaite qu'elle paraît être, cette loi mérite d'être mentionnée, tant afin de détruire la trop grande confiance qui avait été accordée assez généralement à son exactitude, que parce qu'elle offre une règle facile, pour prévoir l'accroissement relatif des forces élastiques, avec un degré d'approximation qui suffit dans un grand nombre de cas.

Elle indique, par exemple, ce fait général que l'expérience confirme; c'est que les liquides, qui bouillent à de très-hautes températures, doivent donner des vapeurs dont la force élastique est excessivement petite dans les températures ordinaires. Prenons pour exemple de l'acide sulfurique, qui soit tel, que sous une pression de $0^m,76$ il bouille à la température de 300 degrés. Si l'on élève sa température jusqu'à 200 degrés, c'est-à-dire à 100 degrés au-dessous de son ébullition, sa vapeur aura la même tension que celle de l'eau à zéro, c'est-à-dire qu'elle sera de 5 millimètres. Mais si l'on

ne porte cet acide qu'à la température de 100 degrés, la tension de sa vapeur sera la même que celle de la vapeur aqueuse à 100 degrés au-dessous de 0, c'est-à-dire qu'elle sera absolument inappréciable. Les mêmes considérations s'appliquent également aux vapeurs du mercure qui ne bout qu'à la température de 360 degrés, et il en résulte que la tension de ces vapeurs, dans les températures ordinaires, doit aussi être excessivement petite. Elles ne peuvent donc produire dans le vide des tubes barométriques aucune pression sensible, ni par conséquent aucun abaissement dont il faille tenir compte. Il en sera de même, à plus forte raison, si l'on place dans le vide des corps solides, qui ne se fondent et qui ne bouillent qu'à des températures excessivement élevées; aussi n'y exercent-ils aucune dépression. Cependant quelques-uns de ces corps, par exemple, l'étain, le plomb et le cuivre, exhalent des odeurs qui sont sensibles pour nos organes. Le camphre exhale aussi une odeur excessivement pénétrante; cependant il ne produit qu'une tension inappréciable dans le vide, à la température ordinaire. Mais si on le chauffe en approchant du tube un charbon ardent, ou l'environnant d'une enveloppe de tôle échauffée, sa vaporisation devient sensible, et la colonne de mercure s'abaisse d'une quantité très-notable. Dès que l'on retire la cause échauffante, on voit presque aussitôt le mercure remonter dans le tube; et la vapeur du camphre, reprenant l'état solide, se dépose sur les parois intérieures du tube sous la forme d'une fine poussière blanche.

Les affinités que les solides exercent sur certains liquides, se manifestent dans le vide en diminuant la tension de leurs vapeurs. Par exemple, l'eau dans laquelle on a fait dissoudre de la soude ou de la potasse, bout à une température plus élevée que l'eau pure. Ainsi, la vapeur de cette dissolution doit avoir dans le vide une tension moindre que celle de l'eau commune, à température égale; c'est aussi ce qui a lieu. Mais cette diminution de tension se fait même sentir sur la vapeur déjà formée. Lorsque l'on a introduit de l'eau pure sous un tube barométrique, et que l'on a bien exactement observé la tension de la vapeur qui en émane, si l'on y fait passer un

petit morceau de soude , qui s'élève dans le mercure par sa seule légèreté , et va gagner la petite couche liquide dans laquelle il reste plongé entièrement, on voit presque aussitôt la tension de la vapeur décroître ; et, au bout de quelques instans, elle se trouve réduite au degré qui convient à une eau chargée de soude. Cependant, il n'y a pas un atome de cette soude qui entre dans la vapeur ; et les molécules de vapeurs élevées dans le haut du tube ne sont pas en contact avec elle directement. Quelle espèce de modification peuvent-elles donc éprouver , qui puisse diminuer ainsi leur force élastique ?

On peut faire une réflexion semblable sur toutes les dissolutions salines. Presque toutes ces dissolutions bouillent à des températures plus élevées que l'eau pure ; aussi , à température égale , la force élastique de leurs vapeurs est-elle moindre que celle de l'eau. Néanmoins , dans un cas comme dans l'autre , la vapeur qui s'élève n'est réellement que de la vapeur aqueuse , sans aucun atome de sels ; car si l'on poussait la vaporisation de ces dissolutions jusqu'à faire entièrement évaporer le liquide, les vapeurs se condenseraient toutes en eau distillée , et tout le poids du sel se retrouverait dans le résidu solide. Comment donc cette vapeur aqueuse , étant toujours la même , peut-elle , à la même température , avoir des forces élastiques inégales ?

Il faut nécessairement que cette inégalité tienne à la différence même des liquides sur lesquels elle repose , et à l'affinité inégale qu'ils exercent sur elle ; car ces circonstances sont les seules qui ne soient pas les mêmes dans les différens cas que nous examinons. Ceci nous conduit donc à regarder les différentes couches qui composent la vapeur , comme s'appuyant mutuellement les unes sur les autres , en vertu de leur élasticité , jusqu'à la dernière , qui repose immédiatement sur le liquide. Celle-ci a nécessairement pour force élastique celle avec laquelle le liquide tend à émettre des vapeurs , quelle que soit d'ailleurs la cause qui lui donne cette tendance et cette faculté. Si donc ce liquide est d'abord de l'eau pure , et qu'il vienne à changer dans sa constitution , de manière que sa tension s'affaiblisse , alors les couches de vapeur qui reposent im-

médiatement sur sa surface, ou tout près de cette surface, seront plus comprimées par l'élasticité des couches supérieures, qu'elles ne seront soutenues par la tension du liquide. Elles devront donc se précipiter dans celui-ci, qui les réduira aussi en liquide par son affinité. Il en sera de même ensuite des couches qui seront au-dessus des premières, lorsqu'elles viendront à leur tour se mettre en contact avec le liquide, jusqu'à ce qu'enfin l'élasticité de la vapeur raréfiée soit devenue précisément égale à la tension du liquide, c'est-à-dire à la force avec laquelle il tend à émettre des vapeurs.

Ces considérations expliquent l'effet d'un appareil très-ingénieux, imaginé par M. Gay-Lussac, pour mesurer la tension de la vapeur aqueuse à des températures très-basses, et même fort inférieures au degré de la congélation. Il est composé d'un tube barométrique, dont l'extrémité supérieure est recourbée un peu au-dessous de l'horizontale, comme on le voit *fig. 62*. On remplit d'abord ce tube de mercure, que l'on y fait bouillir pour en exclure l'air; puis on y ajoute une petite quantité d'eau qui, lorsqu'on le renverse, gagne son sommet, s'y vaporise en partie, et abaisse le mercure d'une quantité déterminée par sa tension à la température actuelle de l'atmosphère environnante. Il faut maintenant amener cette vapeur aux températures assignées. Pour cela, M. Gay-Lussac introduit l'extrémité supérieure C du tube dans une allonge remplie d'un mélange réfrigérant, au centre duquel est un thermomètre; et il abaisse ainsi la température de cette partie. La vapeur qui s'y trouve perd de sa force élastique, se précipite, est aussitôt remplacée par une autre portion de vapeur qui se précipite de même, et ainsi de suite jusqu'à ce que toute l'eau, qui était restée liquide en H, se soit vaporisée complètement, et soit venue se déposer en C. Alors la portion qui conserve l'état de vapeur n'a plus que le degré de tension qui convient à la température de C; et en appliquant ici le raisonnement dont nous faisons tout-à-l'heure usage, on voit qu'en général, dans un tube ainsi chauffé inégalement, le degré de tension auquel la vapeur peut se soutenir est déterminé par la température la plus

faible. Il ne reste donc plus qu'à observer cette tension, en comparant la hauteur du mercure, dans le tube qui contient la vapeur, avec sa hauteur au même instant dans un baromètre parfaitement purgé d'air. Pour que ces mesures soient plus exactes, M. Gay-Lussac emploie une petite lunette horizontale, mobile verticalement, comme un curseur, sur une échelle graduée, et munie intérieurement d'un micromètre, dont il rend les fils tangens successivement à la surface du mercure dans les deux tubes, *fig. 63*. Il a trouvé ainsi qu'à — 19°,59 du thermomètre centésimal la tension de la vapeur aqueuse est encore 1^{mm},353. Or, en la calculant par notre table, on la trouve égale à 1^{mm},5725, c'est-à-dire, presque exactement la même; d'où l'on voit que la loi d'affaiblissement de la force élastique, conclue des expériences de M. Dalton sur l'eau à l'état liquide, s'applique encore, même à des températures beaucoup plus basses que celles de la congélation; et ainsi la solidification de l'eau n'a absolument aucune influence sur la tension de sa vapeur; phénomène remarquable, et qui n'est pas une des moindres découvertes de l'ingénieur physicien que j'ai tout-à-l'heure cité. π π

J'indiquerai encore une autre disposition d'appareil très-élégante et très-commode, que M. Gay-Lussac a pareillement imaginée, pour observer comparativement les tensions de différens liquides, à des températures parfaitement égales. Cet appareil est représenté *fig. 64*; il est composé d'un certain nombre de tubes barométriques, élevés sur la même cuvette, et rangés circulairement autour d'un même axe vertical. Une colonne divisée en millimètres, et munie d'un curseur C, s'élève parallèlement à leur direction. Un de ces tubes est un baromètre purgé d'air. Dans chacun des autres on introduit une petite quantité de liquides de nature différente, dont les vapeurs, par leurs forces élastiques diverses, abaissent les colonnes de mercure à d'inégales hauteurs. En faisant tourner ces tubes autour de la colonne verticale, on les amène successivement devant la division; et, au moyen du curseur, on fixe la hauteur de la colonne de mercure qui s'y trouve renfermée. En faisant la même opération pour le tube vide d'air, on connaît

la pression de l'atmosphère au même instant; et l'excès de cette mesure sur chacune des précédentes exprime la force de dépression qu'exercent les vapeurs des divers liquides observés.

La tension des vapeurs peut encore s'observer commodément à toutes les températures, au moyen de l'appareil représenté *fig. 65*. C'est un ballon de verre, dont le col est fermé par une plaque munie d'un ou plusieurs robinets à air. Un de ces robinets est surmonté d'un long tube fermé, contenant un baromètre à siphon, dont la branche ouverte se trouve ainsi exposée à la pression de l'air ou du gaz intérieur. On commence par faire le vide dans ce ballon, aussi bien qu'il est possible, en ajustant un tube de communication sur le robinet R; et l'on note la petite tension d'un ou deux millimètres, exercée sur le baromètre par l'air qu'on ne peut enlever; puis on ferme la communication avec la machine pneumatique, en tournant le robinet R; et il ne reste plus qu'à introduire le liquide dans le ballon. Pour cela, on se sert d'un double robinet désigné par RR' dans la figure. On ouvre d'abord R', R étant fermé: on verse le liquide dans l'espace RR'; puis on ferme R', et on ouvre R. Alors le liquide se précipite dans le vide, et y produit *instantanément* la quantité de vapeur qui convient à la température actuelle. La force élastique de cette vapeur se mesure par l'élevation qu'elle produit dans le baromètre intérieur, et elle peut être variée à volonté, en plongeant le ballon dans un bain liquide plus ou moins échauffé.

Cet appareil se nomme un *manomètre*. On y emploie quelquefois des ballons d'un volume assez considérable pour pouvoir y introduire des animaux, des plantes, ou en général les substances dont on veut observer les modifications et recueillir les produits. L'élevation ou la dépression du baromètre indique si les gaz qu'on a laissés, ou qu'on a introduits dans l'appareil, ont augmenté ou diminué d'élasticité. Mais si, outre cela, vous voulez connaître leur nature, vous n'avez qu'à remplacer le robinet R' par un autre R'', semblable, mais surmonté d'un tube T, que l'on remplit entièrement de mercure, et le renversant d'abord. On vise ce tube sur le

robinet R, après avoir rempli de mercure l'intervalle qui les sépare. Cela fait, on ouvre R''; le mercure tombe par son poids dans le manomètre; il est remplacé par une quantité égale du mélange gazeux intérieur; alors, si l'on ferme le robinet R'', on peut, en le dévissant de dessus la machine, enlever l'éprouvette R'' T, sans que rien s'en échappe; et l'on a aussi toute facilité pour soumettre le mélange gazeux aux expériences chimiques et physiques nécessaires pour l'éprouver.

La théorie de la formation et du ressort des vapeurs est, dans les arts, d'une application très-fréquente, et l'on peut en voir des exemples dans le *Traité général*. Elle est, pour les recherches physiques, d'un usage continu.

CHAPITRE XIII.

Mesure du poids des Vapeurs sous un volume donné à une pression et une température déterminées.

EN faisant les expériences rapportées dans le chapitre précédent, on peut aisément s'apercevoir qu'une très-petite quantité de liquide suffit pour donner un volume considérable de vapeur. Une foule de recherches de physique et de chimie demandaient que l'on connût la mesure de cette expansion; c'est-à-dire, par exemple, que l'on sût déterminer le volume de la vapeur qui pouvait être produite par un poids ou par un volume donné de chaque liquide sous des pressions et à des températures assignées. Mais cette détermination semblait assez difficile, parce que l'expansion de la vapeur étant fort considérable, il n'est guère possible de réunir exactement en une seule masse le liquide qui a servi à la former. M. Gay-Lussac a heureusement éludé cette difficulté en la renversant, c'est-à-dire en déterminant le volume de vapeur qui peut être produit par un volume donné de liquide.

Pour connaître d'abord, d'une manière parfaitement certaine, la quantité du liquide employé, ce qui constitue réellement la difficulté du problème, M. Gay-Lussac souffle à la

lampe de petites bulles de verre qui sont représentées par BB, *fig. 65*. Elles sont presque sphériques; mais, par un de leurs côtés, elles s'allongent en un bec très-fin. On commence par peser chacune de ces petites bulles lorsqu'elle n'est remplie que d'air; ensuite on y introduit le liquide, comme on ferait dans un tube de thermomètre, en la plongeant dans ce liquide après l'avoir chauffée pour en chasser en partie l'air. Quand la petite bulle est presque totalement remplie, on scelle le bec à la flamme d'une bougie, que l'on dirige dessus au moyen d'un chalumeau. Cette opération n'ôte rien au verre dont la bulle était faite: elle lui donne seulement une autre forme. Alors on pèse de nouveau la bulle ainsi remplie; et retranchant de son poids celui de l'enveloppe, trouvé par la pesée précédente, on a le poids du liquide qu'elle contient. Nous verrons bientôt comment on en peut déduire son volume. Pour réduire maintenant toute cette quantité de liquide en vapeur, M. Gay-Lussac se sert d'un appareil analogue à celui dont M. Dalton a fait usage pour observer la tension des vapeurs dans le vide. Il emploie une cloche de verre longue et étroite VV, *fig. 66*, divisée en parties de capacités égales, et dont la capacité totale est d'environ un litre et demi. Il la remplit de mercure, et la renverse dans un bain de même métal; après quoi il y introduit la petite bulle de verre B, remplie de liquide. Celle-ci gagne le haut du tube et y porte avec elle tout le liquide qu'elle contient; il ne reste plus qu'à vaporiser celui-ci. Pour cela, M. Gay-Lussac enveloppe la cloche VV avec un manchon de verre MM, plus long qu'elle, et qui plonge dans le mercure par sa partie inférieure. Il remplit d'eau ce cylindre, et la cloche s'en trouve couverte; puis il place tout l'appareil sur un fourneau FF, où l'on allume du feu. L'eau et le mercure, en s'échauffant, échauffent aussi le liquide contenu dans la petite bulle de verre. Ce liquide se dilate, brise son enveloppe, se répand au sommet de la cloche, et bientôt s'y réduit en vapeur, dont on élève la température jusqu'à ce que l'eau du cylindre soit entrée en ébullition. Alors on mesure la hauteur de la colonne de mercure qui reste dans la cloche au-dessus du niveau extérieur. Pour le faire avec certitude, voici comment

M. Gay-Lussac opère. Les bords du vase de fonte V'V', qui sert de cuvette, sont bien dressés, et placés horizontalement, au moyen d'un niveau : il pose sur ces bords une règle de cuivre CC, traversée par une tige verticale graduée TT, terminée en bas par une pointe que l'on fait descendre jusqu'à ce qu'elle affleure la surface extérieure du mercure. Un curseur H, qui monte et descend le long de cette tige verticale, est amené par un mouvement de vis jusqu'à la hauteur où le mercure reste dans la cloche, et alors la distance de ce curseur à l'extrémité inférieure de la tige, mesurée par la division que porte la tige même, indique la hauteur de la colonne de mercure qui se trouve élevée dans la cloche au-dessus du niveau extérieur. On retranche cette hauteur de celle du mercure dans le baromètre, au même instant, après les avoir réduites l'une et l'autre à la même température; et l'excès de la seconde sur la première exprime précisément la force élastique de la vapeur contenue dans la cloche, c'est-à-dire la pression qu'elle exerce. On connaît d'ailleurs le volume de cette vapeur par le nombre de divisions qu'elle occupe dans la cloche; avec ces données, on peut calculer les rapports des volumes du liquide et de la vapeur à une température et sous une pression déterminées.

Mais, avant d'entrer dans ce calcul, il faut prévenir une difficulté qui pourrait se présenter à l'esprit; on pourrait se demander si l'on est bien sûr que tout le liquide introduit sous le mercure a été réellement vaporisé. En effet, s'il ne l'était pas, on commettrait de grandes erreurs; et cela pourrait arriver si l'on introduisait dans les petites bulles de verre plus de liquide qu'il n'en faut pour être vaporisé dans la cloche à la température où on l'expose. Mais il y a toujours un moyen facile et sûr de savoir si ces circonstances ont lieu. En effet, les tensions des liquides sur lesquels on opère sont connues par les expériences du chapitre précédent; et l'on peut calculer, par la loi de M. Dalton, quelle doit être, pour chacun d'eux, la force élastique totale de sa vapeur à la température de cent degrés. S'il reste un excès de liquide sous la cloche, la pression exercée intérieurement par la vapeur devra être égale à

cette limite. Il suffit donc de la mesurer, comme nous l'avons expliqué tout-à-l'heure, d'après la hauteur de la colonne de mercure qui reste élevée dans la cloche au-dessus du niveau. Si on la trouve égale à la force élastique totale que le liquide peut avoir à la température de 100 degrés, on pourra craindre que tout le liquide introduit n'ait pas été vaporisé, et alors il faudra employer des bulles qui en contiennent des volumes moindres. Mais du moment où, à force de diminuer ce volume, on arrivera à avoir une force élastique moindre que la force élastique totale, on aura la certitude que le liquide introduit a été vaporisé complètement ; car alors ce liquide n'aura pas même suffi pour développer sous la cloche toute la vapeur qui convenait à cette température ; de sorte que celle qui s'y trouve est réellement une vapeur dilatée, dilatée à la manière des gaz, et qui, tant qu'elle n'aura pas atteint sa force élastique totale, se condenserait comme eux, sans se liquéfier, si l'on diminuait l'espace qu'elle occupe en enfonçant davantage la cloche dans le bain du mercure où elle plonge. Cette dernière réflexion nous apprend qu'il faut réduire tous les résultats à une même pression, pour qu'ils deviennent comparables entre eux ; elle nous indique ce qui nous reste à faire pour y parvenir : mais au lieu d'effectuer cette correction mécaniquement, et par l'expérience, il est incomparablement plus commode et plus simple de la faire par le calcul, d'après les lois connues de la condensation des substances aériformes sous diverses pressions : cette opération se trouve expliquée en détail dans le *Traité général*.

En opérant ainsi, M. Gay-Lussac a trouvé qu'un gramme d'eau distillée donne un volume de vapeur égal à 1¹,6964, cette vapeur étant mesurée à la température de 100° et sous la pression 0^m,76. Or, un gramme d'eau, pris à la température du maximum de condensation, occupe précisément un centimètre cube, c'est-à-dire la millième partie d'un litre. Ainsi le centimètre cube d'eau, partant de cette température, et réduit en vapeur dans les circonstances précédentes, remplit un espace égal à 1696,4 centimètres cubes. Il en résulte encore

que 1000 centimètres cubes ou un litre de cette vapeur pèse en grammes, $\frac{1^g}{1,6964}$.

On verra dans un des chapitres suivans, qu'un litre d'air atmosphérique sec, pris aussi à la température de 100°, et sous la pression 0^m,76, pèse $\frac{1^g}{1,0577}$. Ainsi, dans ces circonstances semblables, le poids de la vapeur aqueuse est à celui de l'air, à volume égal, comme 10577 est à 16964, ou comme 1000 à 1604, c'est-à-dire, à très-peu de chose près, comme 10 à 16. D'après l'égalité de dilatation des vapeurs et des gaz, ce même rapport de $\frac{10}{16}$ subsistera toujours lorsque l'air et la vapeur aqueuse seront l'un et l'autre soumis à une même température et à une même pression quelconque.

Par une expérience semblable, faite sur l'éther sulfurique, M. Gay-Lussac a trouvé qu'un gramme de cet éther, réduit en vapeurs, occupait 0^l,44313, c'est-à-dire environ le quart de l'espace qu'occupe un gramme de vapeur aqueuse; d'où l'on voit qu'à force élastique et à température égales, la vapeur d'éther sulfurique est beaucoup plus pesante que la vapeur d'eau. D'après ce résultat, on pourrait être tenté de croire que les liquides qui sont les plus évaporables sont aussi ceux qui ont les vapeurs les plus lourdes. L'alcool favoriserait cette conjecture; car son degré d'ébullition est plus élevé que celui de l'éther, et moindre que celui de l'eau; et aussi ses vapeurs sont plus pesantes que celles de l'eau, et plus légères que celles de l'éther. Mais M. Gay-Lussac s'est assuré que cette loi n'est pas générale; car le carbure de soufre bout à une plus haute température que l'éther, et pourtant ses vapeurs sont plus pesantes. M. Gay-Lussac a aussi examiné le poids des vapeurs formées par des mélanges d'eau et d'alcool à diverses proportions: il a trouvé qu'à la température de 100°, où il opérait, ce poids était exactement le même que si les vapeurs de chacun des deux liquides eussent été isolées. Or, elles le sont en effet dans ces expériences; car M. Gay-Lussac

s'est assuré que la combinaison se défait par la vaporisation. La même loi s'applique aux mélanges d'alcool et d'éther, et probablement à toutes les combinaisons assez faibles pour se désunir à la température de 100° . Serait-ce la même chose dans des températures plus basses? il serait important de s'en assurer. On saurait alors si la séparation des deux liquides, dans de telles circonstances, tient à l'élévation de température ou à l'acte même de la vaporisation.

Connaissant le volume qu'occupe un poids donné de vapeur à la température de 100° , et sous la pression de $0^{\text{m}},76$, on peut en déduire le volume que cette même masse occuperait sous une autre pression et sous une autre température quelconque. Il ne faut que condenser ou dilater par le calcul le volume primitif, selon les mêmes lois que celui d'un gaz permanent; car nous avons dit plus haut que les vapeurs, tant qu'elles persistent, se dilatent et se contractent comme les gaz. Mais, pour que le résultat abstrait, obtenu par cette réduction, puisse effectivement se réaliser, il faudra encore que la vapeur à laquelle il s'applique puisse physiquement subsister à l'état aériforme, dans les circonstances auxquelles le calcul la suppose ramenée.

CHAPITRE XIV.

Du Mélange des Vapeurs avec les Gaz.

C'EST encore M. Dalton qui va nous servir de guide dans cette matière; mais, avant de faire connaître ses expériences et les lois auxquelles elles conduisent, il est utile de rappeler ce qui se passe dans le mélange des gaz secs entre eux. En examinant la loi des condensations de l'air et des gaz secs, sous des pressions diverses, la température restant la même, nous avons vu que la force élastique d'un même gaz est réciproque au volume qu'il occupe; en sorte, par exemple, que si l'on a 2 décimètres cubes d'air qui soutiennent ensemble une pression de $0^{\text{m}},76$, et qu'on réduise ces deux décimètres

en un seul, ils soutiendraient alors une pression double, c'est-à-dire de $1^m,52$. Or, qu'avons-nous fait dans cette opération, sinon de forcer les deux gaz à se mêler dans un espace donné? Nous voyons donc qu'en se mêlant, leurs forces élastiques s'ajoutent, précisément comme cela arriverait si chacun des volumes pris à part pouvait se répandre librement, et tout entier, dans l'espace où on le force d'entrer. Cette règle est générale dans le mélange des gaz secs; car elle n'est, comme on voit, qu'un résultat de la loi de Mariotte; mais de plus elle s'étend aussi aux mélanges des vapeurs, soit entre elles, soit avec les gaz secs, comme on le verra tout-à-l'heure par l'expérience; en sorte que, de là, résulte cette loi générale, pour le mélange des fluides élastiques de nature quelconque: étant donné un nombre quelconque de fluides élastiques qui soutiennent les pressions $p, p', p'' \dots$ et qui ne sont pas de nature à se combiner les uns avec les autres à la température où l'on opère, si l'on prend un même volume V de chacun de ces fluides, et qu'on réduise tous ces volumes à un seul, qui soit aussi égal à V , la force élastique du mélange sera égale à la somme des forces élastiques partielles, c'est-à-dire à $p + p' + p'' + \dots$. Cette loi est déjà prouvée pour les gaz secs; il ne reste plus qu'à la démontrer pour leur mélange avec les vapeurs.

Pour le faire avec rigueur dans les températures ordinaires, rien n'est plus commode que l'appareil suivant, employé par M. Gay-Lussac dans ses cours de physique, *fig. 67*. C'est un tube de verre cylindrique AB , divisé en parties de capacités égales, et muni à ses deux extrémités de deux robinets en fer R, R' . Un peu au-dessus du robinet inférieur, on adapte un autre tube de verre recourbé TT' , d'un plus petit diamètre que le cylindre AB , et qui communique à son intérieur en T . On sèche bien tout cet appareil en le chauffant; après quoi, ouvrant le robinet R' , on verse du mercure bien sec et bouilli dans le cylindre, de manière à le remplir en totalité. En même temps le mercure monte dans le tube latéral TT' , et s'y met au même niveau. Cela fait, on visse en R' un ballon plein du gaz que l'on veut éprouver, et que nous supposons amené à un état complet de dessiccation. En ouvrant le robinet r du ballon et

le robinet R' , la communication se trouve établie entre l'intérieur du cylindre AB et la capacité du ballon. Mais si le gaz contenu dans ce dernier a été introduit à la pression ordinaire de l'atmosphère, comme cela arrive ordinairement, il ne déprimerait pas le mercure dans le cylindre AB , puisqu'il faudrait pour cela qu'il l'élevât au-dessus du niveau dans le tube TT' . C'est ici que le robinet inférieur R devient utile; car, en l'ouvrant, le mercure s'écoule par son poids, et fait place au gaz qui se répand du ballon dans le cylindre AB . Quand on croit en avoir introduit une quantité suffisante, on ferme le robinet R , et l'expansion du gaz s'arrête; on ferme aussi R' , et le gaz sec, introduit dans le cylindre AB , ne peut plus désormais s'en échapper.

Il faut remarquer que ce gaz est un gaz dilaté, dont la force élastique est moindre que celle de l'atmosphère; par conséquent, lorsque le mercure s'est écoulé par le robinet R , il a dû arriver que le niveau intérieur du tube AB , que je suppose en H , s'est moins abaissé que le niveau intérieur du tube latéral TT' . Admettons que celui-ci soit descendu en h . Alors on verse du mercure dans ce petit tube, jusqu'à ce que le niveau, dans les deux branches, soit remonté au même point. Quand cette égalité a lieu, on est sûr que le gaz introduit dans le cylindre se trouve précisément à la pression extérieure de l'atmosphère. On connaît cette pression, en observant la hauteur du mercure dans le baromètre; et l'on connaît aussi le volume du gaz, en observant le nombre de divisions qu'il occupe dans le cylindre gradué.

Maintenant, pour introduire dans ce gaz le liquide que l'on veut réduire en vapeur, on met sur le robinet R' un autre robinet R'' , surmonté d'un très-petit vase métallique V_1 dans lequel on place le liquide. Le robinet R'' n'est pas percé à son centre d'un canal cylindrique comme les robinets ordinaires; il y a seulement, sur la surface du cône intérieur, une très-petite échancrure hémisphérique O , qui peut contenir seulement une goutte de liquide. Quand le cône $R''O$ est tourné de manière que cette échancrure réponde au fond du vase V_1 , elle se remplit de liquide. Si ensuite on tourne le cône $R''O$

d'un demi-tour, cette goutte est amenée dans l'intérieur de l'appareil A B. On peut donc ainsi, en tournant le robinet R'' à plusieurs reprises, amener autant de gouttes que l'on veut dans l'appareil, et observer l'effet graduel de leur vaporisation sur le volume du gaz ; mais avant de commencer à introduire ainsi le liquide, il faut, après avoir vissé R'' sur R', ouvrir celui-ci, afin d'établir la communication entre le petit espace R''R' et le gaz contenu dans A B.

La première goutte de liquide introduite dans le gaz sec augmente sa force élastique et fait monter le mercure dans le tube latéral T'T'. Cet effet est prompt, mais non pas instantané, comme il le serait si le liquide était introduit dans le vide ; d'où l'on voit déjà que la pression du gaz sur le liquide oppose une résistance à la vaporisation. Si une seule goutte de liquide ne suffit pas pour former toute la quantité de vapeurs nécessaire à cet espace et à la température où l'on opère, on s'en aperçoit, parce que l'introduction d'une seconde goutte augmente encore la force élastique du gaz. Mais enfin, après l'introduction d'un certain nombre de gouttes, l'addition d'une quantité plus grande ne produit plus aucun effet ; et l'excès du liquide reste au-dessus de la surface du mercure sans se vaporiser. Je suppose que l'on en ait ainsi introduit quelques gouttes en excès. Selon ce que nous venons de dire, la tension du gaz s'est accrue par l'effet de la vapeur, et l'on pourrait calculer cette augmentation d'après la différence de niveau du mercure dans les deux branches : mais l'appareil lui-même fournit un moyen bien plus simple de la mesurer. Car, il n'y a qu'à ouvrir le robinet inférieur R, et laisser couler le mercure jusqu'à ce qu'il se retrouve au même niveau dans les deux branches (1). Fermons alors le robinet R, et mesurons le nombre de divisions du tube occupées par le mélange du gaz et de la vapeur. La force élastique du mélange se trouve maintenant égale à la pression de l'atmosphère comme au commen-

(1) Je suppose que l'on ait introduit un excès de liquide suffisant pour fournir l'excès de vapeur exigé par l'augmentation de l'espace, afin que la force élastique de cette vapeur reste constante.

gement de l'expérience ; mais alors le gaz occupait un autre nombre de divisions. Ainsi, sa force élastique propre a changé en raison inverse des espaces où il s'est étendu ; de sorte qu'on peut, d'après cette proportion connue, déterminer son intensité actuelle. On sait aussi quelle serait la force élastique de la vapeur employée, si l'on opérait dans le vide à la température de l'expérience. Si donc cette force est encore la même dans le mélange, il n'y a qu'à l'ajouter à celle du gaz que nous venons de calculer ; et la somme de ces deux forces devra se trouver égale à la pression actuelle de l'atmosphère, telle que la mesure la colonne barométrique. C'est en effet ce que l'on trouve très-exactement. Par conséquent, la vapeur, en se mêlant au gaz, conserve la tension qui lui est propre ; et ainsi se confirme la loi énoncée précédemment, savoir que, dans le simple mélange des gaz avec les vapeurs, chacune des parties du mélange conserve la force élastique qui convient à sa température actuelle et au volume qu'on lui fait occuper.

Cette loi étant connue et constatée, on peut s'en servir pour prévoir d'avance le nombre de divisions que devra occuper le mélange, sous la pression actuelle de l'atmosphère, en supposant que le gaz sec ait préalablement occupé un nombre connu de divisions sous cette même pression. Car il n'y a qu'à calculer le volume de ce gaz comme s'il était déchargé d'une portion de la pression égale à la force élastique de la vapeur. Par exemple, supposons celle-ci égale à $0^m,65427$, telle qu'elle est en effet pour la vapeur aqueuse à la température de 95° . Supposons aussi la pression atmosphérique égale à $0^m,7600$: alors, après l'introduction de la vapeur, le gaz intérieur se trouvera déchargé de $0^m,65427$, c'est-à-dire, qu'il n'aura plus à supporter que $0^m,7600 - 0^m,65427$ ou $0^m,12573$; et ainsi, d'après la loi de Mariotte, il se dilatera dans le rapport de $0^m,7600$ à $0^m,1257$, ou presque de 6 à 1 ; c'est-à-dire que, lorsqu'on aura rétabli le niveau dans les deux branches, en ouvrant le robinet R, le volume du gaz sera sextuplé. On voit, par cette manière d'opérer, que ce volume deviendrait tout-à-fait illimité si la force élastique de la vapeur était exactement égale à la pression de l'atmosphère ; et en effet, si cela

avait lieu, l'air mêlé avec la vapeur ne supporterait plus aucune pression ; il devrait donc se dilater librement comme il le ferait dans le vide, pourvu toutefois qu'à mesure qu'il se dilate, la vapeur continue à se former et à se répandre avec lui.

Dans toutes les expériences précédentes, nous avons supposé que l'on introduisait d'assez grandes quantités de liquide pour fournir toute la quantité de vapeur admissible dans l'espace occupé par le gaz ; si l'on en introduit moins, elle s'étend dans tout cet espace à la manière des gaz, et sa force élastique diminue dans la même proportion.

Ces lois s'observent encore à de hautes températures, et elles peuvent se vérifier en chauffant les appareils qui contiennent le mélange de la vapeur et du gaz. Toutefois, pour qu'elles subsistent, il faut que les gaz ne se combinent pas avec les vapeurs auxquelles on les mêle. Cette exception est nécessaire ; car, à toute température, il y a certains gaz qui ont pour l'eau une affinité telle qu'ils s'emparent des vapeurs aqueuses, et les amènent à l'état liquide ou à l'état solide. Tels sont, par exemple, le gaz ammoniac et le gaz hydrochlorique ; mais il est évident qu'on ne peut pas se proposer de déterminer le volume d'un pareil mélange, puisqu'il ne peut pas subsister à l'état aériforme. Cependant on peut encore vérifier la loi de M. Dalton, dans ces gaz mêmes, en les mêlant avec des vapeurs pour lesquelles ils n'ont pas une pareille affinité. Telles seraient, par exemple, pour le gaz ammoniac, les vapeurs d'éther ; et s'il existait un gaz qui réduisit, au contraire, les vapeurs d'éther à l'état liquide, sans produire le même effet sur les vapeurs aqueuses, il faudrait observer la loi avec les dernières, et ne pas la chercher avec les autres.

On ne trouve pas jusqu'ici de milieu entre ces deux extrêmes. Ou le gaz et la vapeur que l'on mêle perdent tout-à-fait l'état aériforme, ou ils le gardent sans aucune contraction ni dilatation particulière qui dépendent de leur nature ; et alors les lois précédentes sont observées. Dans ce dernier cas, la quantité de vapeurs qui peut subsister à l'état aériforme, dans un volume de gaz, est toujours exactement la même qu'elle serait

dans le vide à température égale. Si l'on dilate le mélange, ou si on le comprime, la température restant constante, la force du gaz élastique varie selon la loi de Mariotte, réciproquement au volume qu'on lui fait occuper; mais celle de la vapeur demeure constante quel que soit l'espace, tant qu'il reste du liquide à vaporiser; et alors elle est la même que dans le vide. Si la vaporisation n'est pas complète, la force élastique de la vapeur augmente avec la pression comme celle d'un gaz, jusqu'à ce que la vapeur soit assez condensée pour former la force élastique totale du mélange. Ces phénomènes sont les mêmes pour tous les gaz, et aussi ils se passent exactement comme s'il n'y avait aucune affinité sensible entre les gaz et les vapeurs qui constituent un mélange aériforme. L'unique effet qui résulte de l'interposition du gaz parmi les molécules de vapeur, c'est de les empêcher de céder à la pression extérieure, et de se réunir en gouttes liquides comme elles feraient si elles étaient soumises seules à la même pression.

La théorie de M. Dalton, que nous venons d'exposer, permet de résoudre d'une manière certaine, et par des lois fondées sur l'expérience, tous les problèmes que l'on peut se proposer relativement aux vapeurs enfermées dans un espace vide, ou rempli d'un gaz quelconque, qui permette à la vapeur de conserver son état aériforme. Par exemple, on peut, à l'aide de ces principes, analyser tous les phénomènes qui se passent dans un manomètre où la pression et la température viennent à changer à-la-fois. Comme cette question est d'une application fréquente dans les recherches de chimie et de physique, j'en ai donné la solution dans le *Traité général*. J'ajouterai seulement que Deluc me paraît être le premier physicien qui se soit fait une idée nette de la formation des vapeurs et de leur constitution, dans l'état d'isolement ou de mélange. De Saussure avait aussi prouvé, avant M. Dalton, que le maximum de vapeur qui peut s'élever dans un espace donné ne dépend que de la température, et est le même dans l'air que dans le vide, à température égale.

CHAPITRE XV.

De l'Évaporation.

Lorsqu'un liquide est exposé à l'air libre, il se dissipe graduellement, et cet effet se nomme *l'évaporation*.

Un assez grand nombre de physiciens ont supposé que ce phénomène était produit par une affinité chimique de l'air pour l'eau. Mais les expériences de Saussure, de Deluc et de M. Dalton, permettent de représenter tous les résultats sans recourir à cette affinité; et par conséquent, il n'y a aucune raison de l'admettre, puisqu'il n'y a rien dans les expériences qui l'annonce. Nous avons vu qu'un liquide introduit dans un espace vide, ou rempli d'air sec, y produit également des vapeurs dont la quantité, dans cet espace, ne dépend absolument que de la température. Si l'air renfermé contient déjà des vapeurs pareilles, mais en quantité moindre que le maximum qui convient à sa température, le liquide introduit ne fait que compléter la quantité de vapeur nécessaire pour que ce maximum s'établisse. Dans tout cela, il n'y a de différence entre l'air et le vide, que par la rapidité de la vaporisation, qui se fait instantanément dans le vide, et lentement dans l'air ou dans les gaz; comme si les particules de ces gaz s'opposaient mécaniquement, et par leur inertie, à la diffusion des vapeurs.

En appliquant ces lois à l'atmosphère, nous en verrons naître tous les phénomènes de l'évaporation. Dans ce cas, l'étendue de l'atmosphère elle-même peut être considérée comme la masse d'air enfermée dans le manomètre, et le liquide qu'on expose à l'air libre dans un vase, est la goutte d'eau que l'on y fait vaporiser. Supposons d'abord la température uniforme dans toute cette étendue. S'il s'y trouve déjà toute la quantité de vapeur qui convient à cette température, l'eau du vase ne se vaporisera pas. Mais, pour peu que la quantité de vapeur soit au-dessous de ce maximum, la vapo-

risation aura lieu ; et le vase n'étant qu'un point relativement à l'étendue de l'atmosphère, toute l'eau qu'il contient se dissipera entièrement, sans y accroître sensiblement la tension de la vapeur. La quantité de vapeur, préalablement existante, n'aura d'autre effet que de ralentir plus ou moins l'évaporation, qui sera d'autant plus rapide que l'air sera plus près de la sécheresse extrême.

Établissons maintenant, dans les couches de l'atmosphère, une inégalité de température quelconque. Alors, pour ces différentes couches, le maximum de vapeurs qu'elles pourront admettre répondra à des quantités très-différentes, qu'elles seront peut-être très-loin de posséder actuellement ; et l'inégalité d'humidité qui existera ainsi entre elles devra même souvent se maintenir beaucoup plus long-temps que la différence de température, à cause de la résistance que l'air oppose au mouvement et au partage des vapeurs. De là il résultera encore que l'eau se vaporisera plus ou moins vite dans ces divers espaces, selon qu'ils seront plus ou moins près de l'extrême sécheresse.

Ainsi, le problème le plus général que l'on puisse se proposer, relativement à l'évaporation, c'est de déterminer la rapidité avec laquelle elle se fait dans chaque couche d'air supposée infinie, lorsque l'on connaît la quantité de vapeur qui se trouve déjà dans cette couche, et la quantité totale qu'elle en peut admettre d'après sa température.

M. Dalton a résolu ce problème avec la même sagacité qu'il a apportée dans le reste de son travail sur les vapeurs. Il a d'abord cherché à mesurer la vitesse de l'évaporation de l'eau dans une atmosphère calme et sèche, et il a trouvé qu'elle était proportionnelle à la force élastique de la vapeur qui se forme. D'après cela, l'évaporation d'un même liquide s'accélère à mesure que sa température devient plus haute ; et, à température égale, elle est plus rapide pour les liquides dont la tension est la plus grande. Cette loi de proportionnalité se soutient même dans une atmosphère où il existe déjà des vapeurs de même nature que celles qu'on y élève ; seulement il faut calculer la vitesse de l'évaporation avec la différence des forces élastiques. Ces résultats de M. Dalton rendent raison

d'une foule de phénomènes qui auparavant étaient inexplicables. On y voit clairement, par exemple, pourquoi Deluc, en chassant tout l'air de l'intérieur de ses thermomètres à liquides, a pu en former avec l'eau et l'alcool, dont les indications se soutenaient jusqu'à 100° et au-delà. C'est que ces liquides, se trouvant ainsi dans le vide, émettaient librement et instantanément par leurs surfaces, c'est-à-dire, par l'extrémité de la colonne élevée dans le tube, toute la quantité de vapeur que pouvait admettre l'espace ouvert au-dessus d'eux; et comme la vapeur pouvait s'exhaler de cette surface sans aucun effort, puisqu'elle se répandait dans le vide ou dans la vapeur déjà existante, il n'y avait pas de raison pour qu'il se développât aussi de la vapeur dans l'intérieur même du liquide. Celui-ci pouvait donc continuer à s'échauffer et à se dilater, sans agitation.

Nous avons déjà remarqué dans les premiers chapitres de ce second livre, que lorsqu'une substance liquide passe à l'état de vapeur par l'ébullition, toute la chaleur qu'on lui communique se détruit, et reparaît de nouveau quand la vapeur repasse à l'état liquide. Maintenant les expériences viennent de nous apprendre que la vapeur se forme à toute température, et que la température, plus froide ou plus chaude, change seulement le degré de son élasticité. D'après cette analogie, nous devons prévoir qu'il se fera aussi, à toute température, une destruction de chaleur lorsque la vapeur se formera; c'est ce que confirme l'observation.

Pour s'en assurer, il faut isoler la masse liquide sur laquelle on opère, afin qu'elle soit obligée de tirer d'elle-même, sinon la totalité, du moins la plus grande partie de la chaleur que l'évaporation doit lui ôter, ce qui produira nécessairement un abaissement de sa température. Tel est précisément l'effet des vases spongieux, appelés *alcarazas*, et qui sont en usage dans l'Orient pour rafraîchir l'eau destinée aux repas. On remplit ces vases d'eau, et on les suspend dans un endroit où l'on sait qu'il se fait un courant d'air; par exemple, entre deux portes ouvertes. La nature spongieuse du vase permet à la masse d'eau qu'il renferme de se vaporiser par tous les points de sa surface.

Cet effet est encore favorisé par le courant d'air, qui enlève la vapeur à mesure qu'elle se forme. De là résulte une vaporisation abondante qui exige une destruction correspondante de chaleur; mais le vase étant isolé, cette destruction ne peut se faire qu'aux dépens de l'eau elle-même, déduction faite de ce que l'air ambiant lui communique. Aussi sa température s'abaisse-t-elle de plusieurs degrés.

On peut produire un effet pareil en plongeant la boule d'un thermomètre dans une éponge mouillée, que l'on expose ensuite au soleil; car, si l'on observe le degré que ce thermomètre, ainsi enveloppé, marque, quand il est placé à l'ombre, lorsqu'on l'expose ensuite au soleil, on le voit considérablement s'abaisser. Les liquides qui s'évaporent le plus rapidement, sont ceux dont l'évaporation produit le refroidissement le plus sensible; et l'on conçoit que cela doit être, puisque cette rapidité les force de se prendre à eux-mêmes plus de chaleur dans un temps donné. Aussi le thermomètre baisse-t-il de plusieurs degrés dans l'éther, lorsque ce liquide s'évapore; et de là vient également la vive impression de froid que l'on éprouve lorsqu'on en verse quelques gouttes sur une partie découverte du corps. L'effet devient plus rapide sous le récipient de la machine pneumatique, en pompant rapidement les vapeurs à mesure qu'elles se forment; et si l'expérience se fait sur une petite boule de thermomètre enveloppée d'une éponge mouillée de carbure de soufre, substance très-évaporable, le mercure gèle en peu d'instans. On peut suppléer à la continuité du jeu des pompes, en plaçant sous le récipient une substance capable d'absorber la vapeur à mesure qu'elle se développe; par exemple, en y mettant à côté d'un vase rempli d'eau liquide, une large capsule remplie d'acide sulfurique concentré. Alors, en effet, du moment où l'on a extrait l'air pour que l'évaporation soit libre, les vapeurs aqueuses sont absorbées aussitôt que formées; et cette absorption leur donnant lieu de se renouveler sans cesse, l'eau de laquelle elles s'exhalent, se gèle en quelques instans. Cette curieuse expérience est de M. Leslie.

CHAPITRE XVI.

De l'Hygrométrie.

IL est très-souvent nécessaire , dans les expériences de chimie et de physique , de connaître exactement la quantité d'eau qui se trouve actuellement vaporisée dans l'air atmosphérique ou dans un gaz. Si l'on était sûr que cette quantité fût portée jusqu'au point de saturation , il serait alors bien facile de l'évaluer , puisque , la température étant donnée , on calculerait sa force élastique par la théorie de M. Dalton , et son poids par les expériences de M. Gay-Lussac. Mais , quand on ignore dans quel état se trouve l'atmosphère ou le gaz que l'on emploie , on est obligé de chercher d'autres moyens pour évaluer la quantité d'eau qui s'y trouve en vapeur. Tel est le but de la partie de la physique que l'on nomme l'*hygrométrie* ; la quantité plus ou moins grande de vapeurs aqueuses que les gaz contiennent , constitue ce qu'on appelle leur *état hygrométrique* ; et les appareils propres à faire connaître cet état , s'appellent des *hygromètres* ou des *hygroscopes*.

Presque tous les hygromètres sont fondés sur les variations de volume que les substances organiques éprouvent par l'introduction ou le dégagement des vapeurs. Tout le monde connaît la différence d'élasticité qui existe entre un morceau de parchemin humide et un morceau de parchemin sec ; les cordes à boyaux employées dans les instrumens de musique changent de tension et de ton , par conséquent de longueur , suivant l'humidité qui s'y introduit. Les barbes de plusieurs plantes éprouvent cet effet d'une manière tellement marquée , que si l'on fixe une d'elles perpendiculairement à un morceau de carton par sa base , et que l'on colle à son autre extrémité une petite bande de papier perpendiculaire à sa longueur , la torsion que la petite barbe éprouve , par les variations d'humidité et de sécheresse , est assez considérable pour faire décrire à l'aiguille de papier de très-grands arcs. C'est sur ce principe , appliqué aux cordes à boyaux , que sont fondées les constructions de ces petites figures qui indiquent par leurs mouvemens la sécheresse et la pluviosité.

Parmi les substances qui jouissent de ces propriétés hygrométriques, il n'y en a point de plus sensible, de plus constante dans ses propriétés, que les cheveux lessivés dans une faible dissolution de potasse, qui leur enlève la graisse dont ils sont enduits dans l'état naturel. Le cheveu, après cette préparation, se raccourcit par la sécheresse et s'allonge par l'humidité, ce qui ne l'empêche pas de s'allonger aussi par la chaleur et de se raccourcir par le refroidissement comme tous les autres corps, mais dans une proportion beaucoup moindre. De Saussure s'est servi du cheveu ainsi préparé, pour construire l'hygromètre qui porte son nom, et qui a introduit dans les recherches de ce genre une exactitude jusqu'alors inconnue. Cet hygromètre est représenté *fig. 68* : l'extrémité supérieure du cheveu est fixée en S par une pince qui le retient; le bout inférieur est attaché de la même manière à la circonférence d'une poulie très-mobile, qui est tirée de bas en haut par le cheveu, et de haut en bas par un petit poids. Quand le cheveu se raccourcit, il fait tourner la poulie dans un sens; s'il s'allonge, le petit poids la fait tourner dans un sens opposé. La poulie, à son tour, fait marcher une longue aiguille qui, par ses mouvemens sur un arc gradué, indique les raccourcissements ou les allongemens que le cheveu subit par suite des variations d'humidité de l'air qui l'environne.

Si l'on enferme cet hygromètre dans un manomètre rempli d'air ou d'un gaz quelconque, et dont les parois sont mouillées d'eau, on voit bientôt l'aiguille marcher sur la division, de manière à annoncer un allongement du cheveu; enfin, elle s'arrête à un certain terme. Alors si l'on transporte l'instrument dans un autre manomètre, où l'air est enfermé depuis quelques jours avec des substances dessiccatives, on voit bientôt l'aiguille rétrograder, comme le suppose un raccourcissement progressif du cheveu; après quoi elle s'arrête encore. Quelle que soit la température à laquelle on opère, pourvu que le manomètre soit saturé de vapeurs aqueuses, ou qu'il en soit complètement privé par la dessiccation, les points extrêmes où s'arrête l'aiguille sont toujours les mêmes. De Saussure appelle l'un d'eux le terme de la sécheresse extrême, et il le marque par o; il nomme l'autre le terme de l'humidité ex-

trême, et il le marque par le nombre 100 : puis, divisant l'arc qu'ils comprennent sur le limbe en 100 parties égales, chacune de ces parties lui fournit autant de degrés intermédiaires d'humidité.

Jusqu'ici cet instrument n'est qu'un indicateur commode et sensible. Si l'on se rappelle ce que nous avons dit en parlant du thermomètre, on verra facilement que, pour que l'hygromètre devienne aussi un instrument comparable, il lui faut encore d'autres qualités. Il faut : 1°. qu'il soit constant dans ses indications ; 2°. qu'étant toujours construit sur les mêmes principes, mais avec des cheveux différens, il donne toujours les mêmes résultats, dans des circonstances pareilles. Enfin, avec ces qualités même, il ne ferait encore que fixer l'état hygrométrique d'une manière reconnaissable, sans mesurer la quantité absolue d'eau contenue dans l'air ; de même que le thermomètre fixe et détermine la température, mais ne fait pas connaître l'intensité absolue du calorique qui la produit. Donc, pour que l'hygromètre fournisse au physicien toutes les données qu'il a besoin de connaître, il faut encore déterminer par expérience ou par théorie, les rapports de ses degrés avec les quantités absolues de vapeur qui existent réellement dans l'air. De Saussure a parfaitement résolu les deux premières questions ; il a prouvé, par des expériences délicates, que les indications du cheveu sont promptes, sûres, et constamment comparables entre elles, lorsqu'il est convenablement préparé. Il a vu que certains cheveux étaient quelquefois irréguliers, et il a donné le moyen de les reconnaître pour les exclure. Il a cherché les préparations qu'il fallait faire subir aux autres pour qu'ils eussent des marches comparables ; enfin il a déterminé ces préparations, dont on peut voir les détails dans son ouvrage ; mais il a été moins heureux dans la recherche des rapports de l'hygromètre avec les quantités absolues d'eau vaporisées dans l'air, et la théorie des vapeurs n'était pas alors assez avancée pour qu'il pût les obtenir.

Sachant aujourd'hui comment, et sous quelles conditions, les vapeurs existent, cherchons à nous faire une idée de l'action du cheveu sur elles. Mais, pour simplifier le problème, nous pouvons imaginer que le cheveu agit dans le vide ; car ses in-

dications pour des tensions de vapeur égales, y sont les mêmes que dans l'air, avec la seule différence qu'elles s'y établissent instantanément. Cela posé, l'action du cheveu sur les vapeurs est tout-à-fait semblable à celle des substances dessiccatives que l'on introduit dans le vide. Comme elles, il absorbe ces vapeurs jusqu'à ce que son affinité cesse de pouvoir les précipiter. Mais si, dans un manomètre qui contiendrait un mètre cube d'air humide, on introduisait un milligramme de potasse ou de muriate de chaux, ce petit corps, en se saturant d'humidité, absorberait une quantité de vapeur si faible, que le poids de cette vapeur ne serait nullement sensible à la balance, et que le vide produit par sa condensation ne paraîtrait pas sensible au baromètre. Tel est précisément le cas du cheveu, à cause du peu d'eau dont il se charge; de sorte qu'on peut aussi le considérer comme ne produisant aucune altération appréciable dans l'état hygrométrique de l'air sur lequel il agit.

Étudions maintenant les différens degrés d'absorption que son affinité opère : d'abord, si l'on place l'hygromètre dans un espace complètement saturé de vapeur, quelle que soit d'ailleurs la température, on observe que l'aiguille s'arrête toujours au même point fixe. Ainsi, le cheveu s'allonge de la même quantité dans ces diverses circonstances, et par conséquent il absorbe la même quantité d'eau. Cependant la masse des vapeurs existantes dans l'espace saturé est très-différente selon la température; mais elles ont toujours cela de commun, qu'à ce point de saturation, la plus petite force suffit pour les réduire en eau. L'affinité du cheveu pour elles est une force de ce genre, qui produit par conséquent son effet accoutumé; et comme l'absorption qui en résulte est si petite qu'elle n'abaisse pas sensiblement la tension de la vapeur qui reste dans l'appareil, il s'ensuit que le cheveu doit continuer à précipiter de cette vapeur tant que son affinité pour l'eau n'est pas complètement et entièrement satisfaite; ce qui fait voir pourquoi il doit toujours en absorber la même quantité dans tout espace saturé, quelle que soit la température, en faisant toutefois abstraction des changemens que la chaleur peut produire dans son affinité pour l'eau; changemens qui, d'après l'expérience, paraissent tout-à-fait insensibles dans l'étendue

de l'échelle thermométrique, du moins, tant que la constitution même du cheveu n'est point altérée.

Maintenant plaçons l'hygromètre dans un espace qui ne soit pas complètement saturé d'eau; alors une force infiniment petite ne suffira plus pour précipiter les vapeurs élevées dans cet espace, car elles résistent à un certain degré de pression, et à un certain degré de refroidissement. Par conséquent, l'effet du cheveu sur elles s'arrêtera avant qu'il en soit complètement saturé; car c'est une loi générale dans les phénomènes chimiques, que l'affinité d'une substance pour une autre augmente à mesure qu'on l'en prive, et diminue à mesure qu'on l'en sature. Lorsque le cheveu parfaitement sec est introduit dans le manomètre, il exerce d'abord sur les vapeurs aqueuses une affinité trop puissante pour qu'elles y résistent. Une partie d'entre elles se précipite donc à l'état liquide, et est absorbée par le cheveu qu'elle allonge; mais cette absorption même diminue son avidité; et enfin il arrive un terme où l'action qu'il exerce sur les vapeurs est justement égale, pour l'effet, au degré de pression ou de froid qu'elles peuvent subir sans devenir liquides; alors elles résistent à son action, et l'allongement du cheveu s'arrête. Il indique ainsi le degré de saturation de l'espace, d'après le terme variable auquel son affinité pour les vapeurs cesse de pouvoir les précipiter. Cette limite dépend donc de la loi suivant laquelle l'affinité du cheveu pour l'eau diminue à mesure qu'il se sature de ce liquide. Voilà ce qu'il faudrait connaître pour pouvoir déterminer théoriquement le rapport de son allongement avec les quantités d'eau réellement vaporisées. Mais, comme on n'a aucune notion sur cette loi de décroissement, non plus que sur celle d'aucune autre affinité chimique, on est réduit à recourir sur ce point à l'expérience, c'est-à-dire, à multiplier les observations de l'hygromètre dans des circonstances connues, pour en déduire empiriquement la loi de ses indications. C'est à quoi M. Gay-Lussac est parvenu par un procédé aussi simple que sûr et ingénieux. S'étant procuré un hygromètre dont la marche soit bien constante, c'est-à-dire qui, placé dans les mêmes circonstances, revienne toujours au même degré de son échelle, il le suspend dans un grand vase de verre, en partie rempli

d'eau ou d'une dissolution saline connue, et dont il a préalablement mesuré la tension dans le vide, à une température donnée. La suspension de l'hygromètre s'opère en l'attachant intérieurement au couvercle même du vase, qui est un disque de verre plan. On lute hermétiquement ce disque aux bords du vase, et on laisse l'expérience se continuer pendant quelque temps. Le liquide répandu sur toutes les parois du vase, ne tarde pas à saturer l'espace intérieur de vapeurs aqueuses, jusqu'au terme que comporte sa force d'émission à la température actuelle; et l'hygromètre, après s'être mis en équilibre avec ces vapeurs, finit par s'arrêter à un certain degré de sa division. On apprend donc ainsi que ce degré correspond à la tension observée du liquide; et en répétant la même épreuve à la même température, pour diverses tensions connues, comprises entre la sécheresse extrême et la saturation complète de l'espace par les vapeurs émanées de l'eau pure, on peut obtenir autant de termes de cette correspondance aussi rapprochés que l'on voudra.

Ce procédé peut, comme on voit, s'appliquer, avec un égal succès, à toutes sortes d'hygromètres; il offre par conséquent un excellent moyen de les comparer. Mais M. Gay-Lussac ne l'a jusqu'ici appliqué qu'à l'hygromètre à cheveu, qui, en effet, étant le plus sensible, et peut-être le plus exact, du moins si l'on s'en rapporte à l'opinion de de Saussure, méritait d'être le premier objet de ses déterminations. En l'étudiant ainsi à la température de dix degrés de la division centésimale, il a obtenu une série de résultats qui, étant interpolés, m'ont donné les tables suivantes, où les tensions de la vapeur aqueuse inférieures au maximum sont exprimées en centièmes de la tension totale. On peut même, sans une grande erreur, étendre l'usage de ces tables à toute autre température, depuis 0 jusqu'à 100°, en prenant pour tension totale celle qui convient à chacune de ces températures. Cependant le résultat de cette proportionnalité indiquera une quantité de vapeurs un peu trop faible au-dessus de la température de 10°, et un peu trop forte au-dessous.

TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.
0	0,00	34	57,42	63	84,06
1	2,19	35	58,58	69	84,64
2	4,37	36	59,61	70	85,22
3	6,56	37	60,64	71	85,77
4	8,75	38	61,66	72	86,31
5	10,94	39	62,69	73	86,86
6	12,93	40	63,72	74	87,41
7	14,92	41	64,63	75	87,95
8	16,92	42	65,53	76	88,47
9	18,91	43	66,43	77	88,99
10	20,91	44	67,34	78	89,51
11	22,81	45	68,24	79	90,03
12	24,71	46	69,03	80	90,55
13	26,61	47	69,83	81	91,05
14	28,51	48	70,62	82	91,55
15	30,41	49	71,42	83	92,05
16	32,08	50	72,21	84	92,54
17	33,76	51	72,94	85	93,04
18	35,43	52	73,68	86	93,52
19	37,11	53	74,41	87	94,00
20	38,78	54	75,14	88	94,48
21	40,27	55	75,87	89	94,95
22	41,76	56	76,54	90	95,43
23	43,26	57	77,21	91	95,90
24	44,75	58	77,88	92	96,36
25	46,24	59	78,55	93	96,82
26	47,55	60	79,22	94	97,29
27	48,86	61	79,84	95	97,75
28	50,18	62	80,46	96	98,20
29	51,49	63	81,08	97	98,69
30	52,81	64	81,70	98	99,10
31	53,96	65	82,32	99	99,55
32	55,11	66	82,90	100	100,00
33	56,27	67	83,48		

Cette table est construite pour donner le degré de l'hygromètre à cheveu, quand on connaît la tension de la vapeur aqueuse actuellement existante dans l'air. La tension de la vapeur aqueuse, pour l'état de la saturation complète, y est représentée par le nombre 100, et les autres tensions plus petites sont exprimées en parties centésimales de cette unité-là. Par conséquent, si on les suppose observées sous une autre forme, par exemple en millimètres, il faudra les multiplier par 100, et les diviser par $9^{\text{mm}},475$, qui exprime la tension totale de la vapeur en millimètres à la température de 10° centésimaux.

DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS de la vapeur.
0	0,00	34	17,10	68	44,89
1	0,45	35	17,68	69	46,04
2	0,90	36	18,30	70	47,19
3	1,35	37	18,92	71	48,51
4	1,80	38	19,54	72	49,82
5	2,25	39	20,16	73	51,14
6	2,71	40	20,78	74	52,45
7	3,18	41	21,45	75	53,76
8	3,64	42	22,12	76	55,25
9	4,10	43	22,79	77	56,74
10	4,57	44	23,46	78	58,24
11	5,05	45	24,13	79	59,73
12	5,52	46	24,86	80	61,22
13	6,00	47	25,59	81	62,89
14	6,48	48	26,32	82	64,57
15	6,96	49	27,06	83	66,24
16	7,46	50	27,79	84	67,92
17	7,95	51	28,58	85	69,59
18	8,45	52	29,38	86	71,49
19	8,95	53	30,17	87	73,39
20	9,45	54	30,97	88	75,29
21	9,97	55	31,76	89	77,19
22	10,49	56	32,66	90	79,09
23	11,01	57	33,57	91	81,09
24	11,53	58	34,47	92	83,08
25	12,05	59	35,37	93	85,08
26	12,59	60	36,28	94	87,07
27	13,14	61	37,31	95	89,06
28	13,69	62	38,34	96	91,25
29	14,23	63	39,36	97	93,44
30	14,78	64	40,39	98	95,63
31	15,36	65	41,42	99	97,81
32	15,94	66	42,58	100	100,00
33	16,52	67	43,73		

Cette table est construite pour donner les tensions de la vapeur correspondantes aux degrés de l'hygromètre. Ces tensions y sont, comme dans la table précédente, exprimées en parties centésimales de la tension totale.

Lorsque l'on porte un même hygromètre successivement dans les diverses couches atmosphériques, comme on peut le faire en s'élevant en aérostat, on le voit marcher successivement au sec à mesure qu'on s'éloigne de la terre; et, si l'on va jusqu'à de très-grandes hauteurs, comme l'a fait M. Gay-Lussac, la sécheresse devient telle qu'elle tord et déforme le bois, le parchemin et tous les corps qui renferment le moindre vestige d'humidité. Ce phénomène est d'autant plus digne de remarque, que la température va aussi en diminuant à mesure qu'on s'élève, de sorte qu'elle devient très-basse dans les hautes régions de l'air, et qu'ainsi la quantité de vapeurs que l'espace y peut admettre est fort petite. On comprend assez bien le décroissement de la température quand on considère que l'air en se dilatant absorbe de la chaleur, de sorte qu'une même masse d'air transportée des couches inférieures dans les supérieures, se refroidit nécessairement, en se prenant à elle-même le calorique caché qui est nécessaire à son état croissant de dilatation; et l'on verra plus tard, en traitant de la rosée, que l'aspect même du ciel serein doit aussi contribuer puissamment à refroidir les couches élevées de l'atmosphère; mais le décroissement rapide de l'humidité hygrométrique paraît beaucoup moins facile à concevoir.

Toutefois, en admettant ce décroissement comme un fait, il me semble expliquer d'une manière assez plausible pourquoi ordinairement, dans nos climats d'Europe, le temps devient beau quand le baromètre monte. C'est qu'alors les nuages qui auraient pu se résoudre en pluie, sont portés dans des régions plus hautes, où la sécheresse est plus grande, et où par conséquent ils peuvent se dissiper avec plus de facilité. Au contraire, si le baromètre baisse, les nuages baissent aussi; et, en se rapprochant de la terre, ils arrivent à des hauteurs où l'espace est moins éloigné du degré de saturation, ce qui doit y rendre la précipitation des vapeurs plus facile. Suivant cette manière de voir, la descente du baromètre doit être un pronostic plus sûr que son mouvement de hausse; car l'ascension des nuages correspondante à l'accroissement de pression que ce mouvement indique, ne contribuera point à

les vaporiser si, par l'effet d'un vent élevé, continu et humide, l'espace est rempli de vapeur aqueuse à une grande hauteur. Il arrivera donc alors que le baromètre pourra monter sans que le temps cesse d'être à la pluie ; c'est en effet ce qui arrive quelquefois dans nos climats ; et c'est encore ainsi que sous les tropiques, quand la saison des pluies est arrivée, il peut continuellement pleuvoir sans que le baromètre indique un abaissement permanent au-dessous de son degré moyen.

CHAPITRE XVII.

De la Pesanteur spécifique des Corps.

Nous avons déjà eu plusieurs fois besoin, dans nos expériences, de connaître le poids de certains corps sous un volume donné ; par exemple, le poids d'un litre d'air ou le poids d'un centimètre cube de mercure. L'utilité de ces résultats, et leur fréquente application dans la chimie et la physique, exigent que nous nous fassions des méthodes générales et précises pour les déterminer.

Le moyen le plus simple d'y parvenir, c'est de mesurer comparativement le poids d'un volume quelconque, mais égal, d'eau et de la substance donnée. En effet, supposons d'abord ces deux pesées faites l'une et l'autre à la température du maximum de condensation de l'eau. On saura qu'alors la substance employée est deux fois ou trois fois, ou généralement n fois aussi pesante que l'eau à égal volume. Or, d'après la définition des mesures métriques, chaque gramme d'eau, à cette température, a pour volume un centimètre cubique. Par conséquent, on saura que chaque centimètre cubique de la substance donnée pèse deux grammes ou trois grammes, ou n grammes, ce qui est précisément la chose que l'on voulait savoir. Il n'est pas même nécessaire que les pesées soient faites à la température précise du maximum de condensation de l'eau ; mais alors il faut avoir égard aux dilatations de ce liquide et de la substance qu'on lui compare. C'est pourquoi nous ne

pouvions pas nous occuper de cette recherche d'une manière générale avant d'avoir mesuré, et réduit en formules, les dilatations des corps.

Ce nombre n , qui exprime combien de fois la substance donnée pèse autant que l'eau à volume égal, s'appelle *la pesanteur spécifique*, ou plus exactement *le poids spécifique du corps*. Nous le rapporterons généralement, comme nous venons de le faire, à la température du maximum de condensation de l'eau; et alors le nombre n , qui exprimera le poids spécifique d'un corps, exprimera aussi le nombre de grammes que pèse un centimètre cube de ce corps.

Lorsque nous avons établi dans le premier livre les principes de l'équilibre et du mouvement, nous avons appelé *densité* d'un corps, la quantité relative de matière inerte qu'il renfermait sous un volume donné; et nous avons vu que cette quantité pouvait, *pour toutes les applications de mécanique*, s'évaluer proportionnellement au poids; en sorte qu'un corps doit être dit deux ou trois fois, ou n fois plus dense qu'un autre, selon qu'il pèse deux, ou trois, ou n fois autant, à volume égal, que celui auquel on l'a comparé. Ainsi, en prenant la densité du premier corps pour l'unité des densités, celle du second et de tout autre corps sera aussi représentée par le nombre n . Dans notre système de mesures, l'unité de densité la plus convenable est celle de l'eau à la température du maximum de condensation. Alors *la densité de tout autre corps est égale à sa pesanteur spécifique*. Nous adopterons généralement cette convention.

Concevons maintenant une masse d'eau qui, réduite à son maximum de condensation, renferme un nombre V de centimètres cubiques. V exprimera aussi son poids en grammes. Mais cette expression ne sera rigoureusement exacte que pour le parallèle terrestre relativement auquel le gramme est déterminé; car l'énergie de la pesanteur étant inégale à diverses latitudes, la même masse d'eau prise successivement sur différents parallèles terrestres, a des poids absolus différents; et, si l'on veut toujours rapporter ces poids au gramme primitif, considéré comme invariable, leur expression changera propor-

tionnellement aux intensités de la gravité dans les deux lieux. Représentons donc par 1 cette intensité dans le lieu où l'on a déterminé le gramme, à Paris, par exemple; sa valeur pour tout autre point de la terre se trouvera exprimée par un autre nombre plus grand ou moindre, que les observations du pendule font connaître, comme nous l'avons expliqué dans le premier livre, et dont j'ai donné l'expression analytique dans le *Traité général*. En multipliant le volume primitif V par ce nombre, le produit exprimera le poids de la même masse d'eau en grammes à une latitude quelconque, le poids de chaque gramme étant toujours identiquement conforme à la première détermination.

Si l'on veut exprimer de même le poids P d'un égal volume de tout autre corps, il faut multiplier le poids précédent de la masse d'eau par la pesanteur spécifique de ce corps. Dans ce sens, on dit que le *poids d'un corps est égal au produit de sa densité et de son volume par la pesanteur*; mais il ne faut pas oublier que, dans cet énoncé, le poids, la pesanteur, le volume et la densité n'expriment pas des quantités absolues. Ce sont des nombres abstraits rapportés chacun à leur unité propre.

Ces principes généraux étant établis, nous allons entrer dans le détail des expériences par lesquelles on détermine le nombre n dans les divers états des corps.

CHAPITRE XVIII.

Sur la manière d'obtenir la Pesanteur spécifique des Gaz.

Les densités des substances gazeuses étant toutes fort petites, il convient, pour rendre leurs différences plus sensibles, de les rapporter d'abord à quelqu'une d'entre elles; nous choisirons pour cela l'air atmosphérique, qui, d'après l'observation générale des physiciens et des chimistes, est de même nature dans tous les climats de la terre et dans toutes les saisons.

. Pour mesurer le poids d'un même volume d'air et de gaz, on prend un ballon de verre dont la capacité doit être au moins de cinq à six litres, afin que les erreurs des pesées n'aient pas trop d'influence sur les résultats; ce qui arriverait si l'on opérait sur de trop petits volumes. Ce ballon doit être fermé par un robinet assez bien travaillé pour intercepter toute communication entre l'intérieur du ballon et l'air extérieur. On tient d'abord le robinet ouvert; et, après avoir vissé le ballon sur le plateau d'une bonne machine pneumatique, on y fait le vide aussi exactement qu'il est possible. Pour plus de simplicité, supposons d'abord que ce vide soit tout-à-fait exact, en sorte que tout l'air ait été extrait de l'intérieur du ballon. On ferme alors le robinet, on dévisse le ballon, et on le pèse dans cet état avec des balances très-exactes (1). Soit P son poids ainsi observé.

Cette opération faite, on ouvre doucement le robinet, sans détacher le ballon de la balance. L'air extérieur y rentre, le remplit. Alors on le pèse de nouveau, le robinet restant ouvert : on trouve constamment qu'il pèse davantage. Soit P'' son poids dans cette nouvelle circonstance.

Il est évident que l'augmentation de poids du ballon est due à l'air qui s'y introduit, et est précisément égale au poids de cet air. Ainsi l'excès de la seconde pesée sur la première, ou $P'' - P$, exprimera le poids du volume d'air atmosphérique que le ballon contient, dans les circonstances où l'on a opéré.

On s'y prend précisément de la même manière pour connaître le poids du même volume de tout autre gaz. On commence de même par peser le ballon vide. Soit π son poids, qui peut être différent de P à cause du changement de densité

(1) Pour faire cette opération, l'on ne pose pas le ballon dans les plateaux de la balance, ce qui serait très-incommode, parce qu'il faudrait leur donner de très-grandes dimensions. Mais on accroche le ballon à la balance par le moyen d'un fil de cuivre, dont les extrémités sont contournées en anneaux. L'un de ces anneaux se fixe à la partie inférieure d'un des plateaux de la balance, et l'autre s'adapte à un crochet qui termine la partie supérieure du robinet du ballon. *Fig. 6).*

qui a pu survenir dans l'air qu'il déplace. Cette observation faite, on le remplit aussitôt de gaz, que l'on y introduit avec toutes les précautions nécessaires pour en assurer la pureté. Puis on le ferme; on le pèse de nouveau, et on le trouve plus lourd qu'auparavant. Soit π'' son poids ainsi observé.

Il est évident que la différence $\pi'' - \pi$ est le poids du gaz que l'on y a introduit; et le rapport $\frac{\pi'' - \pi}{\pi'' - \pi}$ est la pesanteur de ce gaz, comparée à celle de l'air atmosphérique, dans les circonstances où l'expérience a été faite.

Mais, en opérant ainsi à différens jours sur le même air, sur le même gaz, avec le même ballon, la même machine pneumatique et les mêmes balances, on trouve des résultats continuellement différens; ce qui prouve que ces observations, quoique exactes, ne sont point comparables entre elles, et doivent, pour le devenir, subir plusieurs corrections que nous allons exposer.

D'abord nous savons que la pression atmosphérique n'est pas constamment la même. Or, elle agit sur l'air atmosphérique contenu dans le ballon, quand on le pèse plein et ouvert; la densité de cet air doit donc changer, ainsi que son poids, selon que la pression devient plus ou moins considérable. Voilà une première cause de variations qu'il nous faudra corriger.

La température produit aussi un effet pareil; car, soit qu'elle s'élève ou qu'elle s'abaisse, elle dilate l'air ou le condense, la pression restant la même. Il faudra donc pareillement l'observer et en tenir compte dans les résultats.

Ces mêmes causes influenceront également sur les poids de tous les autres gaz, lorsqu'on les introduira dans le ballon après y avoir fait le vide. Il faudra donc aussi tenir compte de l'état de pression et de température auquel on les introduit.

Le ballon lui-même n'a pas toujours une égale capacité; car le verre dont il est formé se dilate et se resserre, selon que la température s'élève ou s'abaisse, et alors son volume augmente ou diminue; il faudra donc aussi avoir égard à ces changemens.

Enfin, nous avons vu que l'air et tous les autres gaz peuvent contenir une certaine quantité de vapeurs aqueuses, qui varie avec la température et avec le dessèchement plus ou moins considérable que le gaz a éprouvé. Ainsi, un même volume d'un même gaz aura des poids différens, selon qu'il contiendra une quantité plus ou moins grande de cette vapeur, qui se trouve substituée à une certaine portion de sa masse. Il faudra donc, pour rendre les résultats comparables, connaître la quantité de vapeurs aqueuses qui entrent dans les gaz, ainsi que dans l'air atmosphérique que l'on pèse, et en tenir compte dans les résultats; ou bien il faudra la détruire en l'absorbant par des alcalis.

Toutes les causes que nous venons d'examiner influenceront encore sur les expériences d'une autre manière, en modifiant la densité de l'air atmosphérique extérieur au ballon, et dans lequel celui-ci est plongé lorsqu'on le pèse; car un corps plongé dans un fluide pesant, y perd toujours une partie de son poids, égale à celui du volume de fluide qu'il déplace. La perte de poids du ballon, soit plein, soit vide, lorsqu'on le pesera dans l'air, variera donc avec le volume du ballon, avec la pression atmosphérique, la température et l'état hygrométrique de l'air extérieur.

Nous avons supposé que la machine pneumatique que l'on emploie pouvait opérer un vide parfait. Mais cela n'est jamais ainsi; et, quelque soin que l'on prenne pour épuiser l'air dans l'intérieur du ballon, il y reste toujours une petite quantité de fluides élastiques dont l'existence se manifeste par la pression qu'ils exercent sur le baromètre qui communique à l'intérieur de la machine pneumatique. Il faudra donc mesurer cette pression, et savoir si elle est produite par un petit reste d'air ou de vapeurs aqueuses, ou par un certain mélange de ces deux substances.

Avec ces diverses données, on peut calculer les poids d'air atmosphérique et de gaz qui seraient contenus dans le ballon à la température de la glace fondante et sous la pression de $0^m,76$, l'air et le gaz étant parfaitement privés de vapeurs aqueuses. Si de plus le volume du ballon est connu, en litres

et parties du litre, on pourra en conclure ce que pèse un litre de chaque gaz. On trouvera dans le *Traité général* toutes les formules nécessaires pour effectuer complètement ces réductions, ainsi que l'indication de tous les procédés qui peuvent rendre les expériences précises. Ne pouvant exposer ici ces détails, je me bornerai à en rapporter, comme conséquence, une règle très-simple et très-exacte, dont les résultats sont même indépendans de l'état hygrométrique de l'air extérieur. Seulement elle exige que, dans les diverses pesées du vide, de l'air et du gaz, le ballon dont on fait usage soit séché intérieurement par communication avec des sels alcalins.

Dans cette supposition, observez la petite tension θ que marque l'éprouvette de votre machine pneumatique, lorsque vous faites le vide sec le plus exact qu'il vous est possible dans votre ballon. Pesez-le ensuite dans cet état; appelez P son poids apparent. Cela fait, introduisez-y le gaz, et observez la pression barométrique p' , exercée dans l'intérieur du ballon, au moment où vous tournez le robinet pour le fermer. $p' - \theta$ sera la portion de cette pression que le gaz supporte réellement. Soit t' sa température. Observez de nouveau le poids apparent P'' du ballon ainsi rempli; puis faites-y de nouveau le vide sec jusqu'à la même tension θ que vous y avez laissée précédemment, et prenez de nouveau son poids P''' ; cela posé, $P'' - \frac{1}{2}(P + P''')$ sera le poids exact du gaz sec, dans les circonstances de son introduction, c'est-à-dire à la température t' , sous la pression $p' - \theta$, et pour le volume actuel de votre ballon; il ne restera plus, pour rendre les résultats comparables, que de les réduire à une pression et une température constantes; par exemple, à 0^m,76 et à 0°, comme nous l'avons expliqué page 252. Mais si l'on veut atteindre la dernière rigueur, il faudra encore réduire le volume actuel du ballon à un terme fixe, en tenant compte de la dilatation du verre. C'est au moyen d'opérations semblables ou équivalentes que la table suivante a été formée.

TABLEAU de la pesanteur spécifique des gaz et de quelques vapeurs, comparée à celle de l'air, prise pour unité.

SUBSTANCES.	DENSITÉS DÉTERMINÉES PAR L'EXPÉRIENCE.	DENSITÉS CALCULÉES D'APRÈS LA PROPORTION DES ÉLÉMENTS ET LA CONTRACTION DU VOLUME.	
Air atmosphérique . . .	1,0000.		
Gaz oxygène	1,10359.		
Gaz azote	0,96713.		
Gaz hydrogène	0,07321.		
Gaz acide carbon.	1,51961.		
Gaz ammoniacque	0,59669.	0,59438. } 3 hy. et 1 az. contrac. en 2 vol.	
Gaz hydrochloriq.	1,24740.		
Chlore	2,470. GAY et THÉNARD.	2,421. } Sup. que 1 de chl. et 1 d'hyd. font 2 gaz hydrochlor.	
Gaz oxide de carb.	0,9569. CRUIKSHANKS.	0,96782. } Supp. que 1 d'acide carb., moins $\frac{1}{2}$ ox., font 1 de ce gaz.	
Protoxide d'azote	1,5204. COLIN.	1,52092. } 1 az. et $\frac{1}{2}$ ox. réd. à 1 vol.	
Deutoxide d'azote	1,0388. BÉRARD.	1,03636. } 1 az., 1 ox. contr. nulle.	
Gaz hydrogène sul.	1,1912. } GAY et THÉNARD.		
Gaz acide sulfuré	2,1204. }		
Gaz oléfiant	0,97804. TH. DE SAUSSURE.		
Gaz fluoborique	2,3709. } JOHN DAVY.		
Gaz fluosilicique	3,5737. }		
Gaz chlorocarbon.		3,3888. D'après J. DAVY.	
Gaz euchlorine		2,3782. } 4 de chl. et 2 d'ox réd. à 5 vol.	
Gaz hydriodique	4,443. GAY.	4,4288.	
Vapeur	d'eau	0,62349.	0,624. } Supp. que 2 d'hyd. et 1 d'ox. donnent : de vapeur.
	d'alcool absolu	1,6133. }	
	d'éther sulfurique	2,5860. }	
	d'éther hydriodique	5,4749. } GAY.	
	d'essence de térébent.	5,0130. }	
	de carbure de soufre	2,6447. }	
	d'iode		3,6195.
	d'éther hydrochlor.	2,219. } THÉNARD.	
	de carbone	0,416. }	

La dernière colonne, qui contient les densités calculées d'après la composition chimique, a besoin de quelque explication. M. Gay-Lussac a fait depuis long-temps cette importante remarque, que les substances gazeuses résultantes de la combinaison de plusieurs autres gaz contiennent toujours, sous un volume donné, un nombre entier de volumes de leurs élémens, contractés ou dilatés simultanément, dans une proportion généralement exprimée par des nombres simples. Ceci peut se vérifier par la table des densités mêmes. En effet, la densité d'un gaz, c'est son poids sous l'unité de volume, celui de l'air étant 1. D'après cela, si l'on prend la densité de chacun des élémens un nombre entier de fois, on aura le poids d'autant de volumes de chacun d'eux. Ajoutant ces produits, on aura le poids du volume total, formé par le nombre total des volumes. Ainsi, il n'y aura plus qu'à lui appliquer la proportion de contraction ou de dilatation supposée. Prenons pour exemple le gaz ammoniacque. On sait, par sa décomposition, qu'il contient 5 parties de gaz hydrogène en volume, combinées avec un volume d'azote; or, d'après les densités de ces élémens, on a

Poids de 3 volumes d'hydrogène 5.	0,07321 ou 0,21963
Poids de 1 volume d'azote.	0,96913
	<hr/>
Somme, ou poids de 4 volumes du mélange. .	1,18876
Donc, poids d'un seul volume.	0,29719
Maintenant, le poids d'un volume de gaz am-	
moniacque est.	0,59669

c'est-à-dire presque exactement double du précédent. On voit donc par-là que, dans la combinaison, chaque double volume du mélange s'est contracté en un seul volume. Alors, la densité calculée doit être double de 0,29719, c'est-à-dire égale à 0,59438, ce qui est en effet très-peu différent de la densité observée. C'est ainsi qu'ont été calculées les proportions de contraction ou de dilatation des mélanges pour les autres substances gazeuses désignées dans la dernière colonne; et l'accord entre les résultats et l'observation se soutient d'une ma-

nière trop remarquable pour qu'on puisse méconnaître que la simplicité des rapports de leur volume est réellement une condition essentielle de leur formation.

On a étendu, par analogie, cette condition, même aux substances qu'il ne nous est pas possible de réduire en gaz ; et on en a conclu les densités qu'elles devraient avoir si elles étaient amenées à cet état. Par exemple, l'analyse chimique prouve que le gaz oxygène ne change pas de volume quand il se combine avec le charbon et forme l'acide carbonique. Or, d'après notre table, un volume d'acide carbonique pèse 1,51961. Retranchons-en le poids d'un volume d'oxygène, qui est 1,10359, le reste 0,41602 exprimera le poids du carbone contenu dans le volume 1 de cet acide. Ce sera donc aussi le poids d'un volume 1 de vapeur de carbone, puisqu'il ne s'est point opéré de condensation.

Maintenant si au poids d'un pareil volume, qui est 0,41602, on ajoute le poids de $\frac{1}{2}$ volume d'oxygène qui est 0,55179, la somme sera 0,96781. C'est précisément la densité du gaz oxide de carbone ; ainsi on peut énoncer la composition de ce gaz sous cette nouvelle forme. On voit alors que le carbone y est combiné avec une proportion d'oxygène moitié moindre, en poids, que dans l'acide carbonique. Le même rapport existe entre les quantités d'oxygène qui forment le protoxide et le deutoxide d'azote, comme on peut le voir dans notre tableau. En général, les substances qui ont une grande affinité les unes pour les autres, offrent ainsi, le plus souvent, des rapports très-simples entre les proportions successives des poids suivant lesquels elles se combinent ; et cette remarque est devenue un des fondemens des théories chimiques actuelles. Il est toutefois douteux que la même simplicité de proportion s'établisse nécessairement dans les cas où l'affinité est très-faible.

Je joins ici le tableau des poids absolus de quelques gaz supposés complètement desséchés.

NATURE DES GAZ.	POIDS d'un centimètre cube en grammes à la température de la glace fondante et sous la pression 0 ^m ,76, observée à la latitude de 45°.
Air atmosphérique.....	0 ^g ,001299075
Oxigène.....	0,001433530
Azote.....	0,001258972
Hydrogène.....	0,0000951053
Gaz acide carbonique.....	0,001974088
Gaz hydrochlorique.....	0,001619943
Gaz ammoniac.....	0,000775145
Vapeur d'eau.....	0,000810249

Si l'on voulait avoir le poids d'un litre de ces mêmes gaz, il faudrait multiplier par 1000 le nombre qui lui correspond, puisque le litre contient 1000 centimètres cubes. Le poids de la vapeur aqueuse rapporté dans ce tableau répond à une circonstance mathématique, puisque cette vapeur ne pourrait pas subsister à l'état aériforme, à la température de la glace fondante, et sous la pression 0^m,76; mais cette donnée est utile pour les calculs, parce qu'on peut partir de là comme d'un terme fixe pour calculer le poids d'un centimètre cube de cette vapeur à toute autre température et sous toute autre pression donnée, et réellement observée. Le calcul est absolument le même que pour un gaz sec, comme nous l'avons déjà fait remarquer page 285.

Depuis l'époque déjà ancienne où ces résultats sur les poids des gaz ont été déterminés, principalement par les expériences que nous avons faites, M. Arago et moi, on a découvert que les substances gazeuses transvasées à travers l'eau, se déplacent mutuellement, et s'échangent entre elles dans leur combinaison avec ce liquide. Or, ce phénomène, qui nous était inconnu, a dû avoir lieu plus ou moins, soit dans la formation des gaz dont nous avons fait usage, soit même dans le temps très-court que nous employions à les introduire dans notre

ballon; car ces opérations se font d'ordinaire en faisant passer les gaz à travers des masses d'eau qui, restant librement exposées au contact de l'air atmosphérique, doivent toujours être imprégnées. L'importance de ces élémens, qui servent de données dans une foule d'expériences chimiques, exigeait qu'on les délivrât de cette petite cause d'incertitude. C'est ce qu'ont fait MM. Berzélius et Dulong; et, par des expériences nouvelles faites avec tout le soin imaginable, en se préservant de cet échange, ils ont trouvé la pesanteur spécifique de l'oxygène 1,1026, celle de l'azote 0,9757, celle de l'acide carbonique 1,5245, et celle du gaz hydrogène 0,0688. Ces résultats, comme les nôtres, sont rapportés à la température de la glace fondante, et à la pression de 0^m,76. On voit que leur différence avec ceux-ci est bien petite. Toutefois, elle est la plus sensible pour l'hydrogène, comme cela devait être parce, qu'étant de beaucoup plus léger que tout autre gaz, son mélange avec un quelconque d'entre eux doit nécessairement rendre son poids spécifique trop fort.

Les tableaux ci-dessus montrent que beaucoup de substances aériformes sont moins pesantes que l'air atmosphérique à volume égal. Si l'on imagine un volume donné d'une de ces substances, par exemple, de gaz hydrogène, enfermé dans une enveloppe sans pesanteur, et abandonné à lui-même dans l'atmosphère, il tendra à descendre par son propre poids, mais il sera poussé en haut par une force égale au poids du volume d'air qu'il déplace. Ainsi ce volume de gaz s'élevera dans l'air jusqu'à ce qu'il arrive dans des couches dont la densité soit moindre que la sienne. On pourra même, en lui donnant de grandes dimensions, rendre sa force ascensionnelle assez grande pour enlever une enveloppe pesante, et même une nacelle et des hommes. Tel est le principe des ballons aérostatiques, dont l'invention, l'une des plus belles du dix-huitième siècle, est due à Montgolfier.

Le premier ballon fut lancé par Montgolfier et son frère, à Annonay, en 1782. Il était sphérique, et avait 110 pieds de circonférence. L'enveloppe était de papier, et la substance aériforme employée était l'air atmosphérique lui-même, di-

laté par la chaleur d'un fourneau placé sous l'orifice inférieur du ballon. Il s'éleva à la hauteur de mille toises.

Bientôt l'expérience fut répétée à Paris; des hommes hardis osèrent monter dans une frêle nacelle, et entretenir eux-mêmes le feu qui servait à les élever. Jusque-là le ballon était retenu par des cordes. Enfin Pilatre Desrosiers et Darlandes partirent à ballon perdu, et parcoururent en dix-sept minutes une distance de quatre mille toises.

Ce genre de ballon, appelé Montgolfière, du nom de son inventeur, était d'une manœuvre dangereuse et difficile; dangereuse, parce que le feu entretenu dans la nacelle pouvait se communiquer à la nacelle elle-même, ou aux parois du ballon; difficile, par la nécessité d'augmenter le feu quand on voulait s'élever, de le diminuer quand on voulait descendre, opérations qui, par leur nature, ne peuvent pas être réglées exactement.

M. Charles eut l'heureuse idée d'employer pour substance aériforme le gaz hydrogène, dont la densité, n'étant qu'environ $\frac{1}{13}$ de celle de l'air atmosphérique, devait donner une force ascensionnelle considérable, et toujours constante, sans qu'il fût besoin d'aucun travail pour l'entretenir. La difficulté était de trouver une enveloppe qui fût peu pesante, et pourtant imperméable à ce gaz. Après diverses expériences, M. Charles choisit le taffetas enduit d'un vernis fait avec la gomme élastique dissoute à chaud dans l'essence de térébenthine. Ce procédé réussit parfaitement; MM. Charles et Robert s'élevèrent ainsi les premiers aux Tuileries dans un aérostat de vingt-six pieds de diamètre, et parcoururent en peu de minutes un espace de neuf lieues. Alors Robert descendit, et M. Charles, resté seul dans la nacelle, s'éleva de nouveau dans les airs avec la rapidité d'une flèche, jusqu'à la hauteur de dix-sept cent cinquante toises.

Dans les ballons à gaz hydrogène, le voyageur modère à son gré sa hauteur. Pour cela, il emporte avec lui quelques sacs remplis de sable. Veut-il s'élever, il jette une partie de ce sable, et devient plus léger. Veut-il descendre, il laisse échapper une petite quantité du gaz que son aérostat renferme,

et il devient plus lourd. Pour faciliter cette manœuvre, le sommet du ballon est muni d'une soupape qui s'ouvre par le moyen d'une corde, dont l'extrémité pend dans la nacelle. Cette corde est le salut du voyageur; car s'il ne pouvait ouvrir sa soupape, il serait le jouet de son ballon, et courrait le danger de le voir s'élever à des hauteurs où il creverait par la dilatation du gaz. Il faut donc s'assurer soi-même que cette corde est forte, bien attachée à la soupape, et qu'elle l'ouvre et la ferme facilement. Il est même prudent, pour plus de sûreté, d'avoir deux cordes pareilles, attachées à la même soupape.

De plus, à quelque hauteur que l'on désire s'élever, il ne faut jamais se défaire de tout son lest; car, lorsqu'on a ouvert la soupape pour redescendre, le ballon, devenu plus lourd, descend en effet par l'excès de son poids, et descend comme un corps pesant. Il n'est retardé dans sa chute que par la résistance de l'air. Si on l'abandonne à lui-même, il acquiert ainsi une vitesse qui devient très-dangereuse quand on arrive à heurter la terre. C'est ce choc qu'il faut prévenir en jetant d'avance, et peu à peu, le lest que l'on a conservé. La diminution successive de poids compense alors en partie l'accélération de la pesanteur, et vous amène doucement vers la terre, ou même vous permet de vous arrêter à une petite distance de sa surface, si le lieu où l'aérostat descend vous semble offrir quelque danger.

Au moment où l'on part, il est inutile et même dangereux d'enfler entièrement l'aérostat; car, à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, on arrive dans des couches d'air où la pression est moindre qu'à la surface de la terre. En conséquence, le gaz contenu dans l'aérostat se dilate; et, si le ballon a été entièrement gonflé d'abord, il devient bientôt nécessaire de faire sortir une certaine quantité de gaz par les soupapes de sûreté que l'aéronaute gouverne. Au lieu de cela, supposez que le ballon, à la surface de la terre, ne soit qu'à moitié rempli, et que cependant il ait une force ascensionnelle suffisante pour vous enlever avec votre nacelle et tout ce qu'elle contient. A mesure que vous vous élevez, le gaz intérieur se dilatera pour se

mettre à la même pression que l'air extérieur. Celui-ci devient à la vérité moins lourd; mais le volume de votre ballon augmente précisément dans le même rapport, et compense ainsi cette diminution; par conséquent votre force ascensionnelle dans cet air raréfié est encore la même qu'à l'instant du départ. Elle ne sera pas non plus altérée par l'abaissement de température qui se fait sentir à mesure qu'on s'élève, car tous les gaz se dilatent également par les mêmes variations de température; et ainsi l'effet sera le même sur le gaz contenu dans le ballon et sur l'air atmosphérique qui l'environne, en supposant leur température la même.

Cette remarque, sur l'inutilité de gonfler les ballons en partant, a été faite pour la première fois par M. Charles, et nous en avons profité dans le voyage aérostatique que nous avons fait, M. Gay-Lussac et moi, pour des recherches de physique dont je parlerai plus tard. Notre force ascensionnelle, au moment du départ, était très-faible; seulement celle qu'il fallait pour nous enlever avec nos instrumens. On la mesurait par le moyen d'une romaine placée sous la nacelle, et attachée à terre. Nous primes du lest ce qu'il en fallait pour l'amener d'abord au degré que nous avions projeté, et qui était, je crois, d'un kilogramme. Alors nous nous abandonnâmes à cette force qui nous éleva lentement jusqu'à 4000 mètres de hauteur. Une seconde ascension, faite avec le même ballon, par M. Gay-Lussac seul, l'éleva à la hauteur de 7000 mètres, la plus grande à laquelle l'homme soit jamais parvenu.

L'aérostat à gaz hydrogène est aujourd'hui le seul en usage. Quelques modifications que l'on a essayé d'y faire, n'ont pas été heureuses. Pilatre Desrosiers voulut, on ne sait pourquoi, combiner ce moyen d'ascension avec celui de l'air dilaté par le feu. Il employait deux ballons placés l'un au-dessous de l'autre, dont le supérieur était rempli de gaz hydrogène, et l'inférieur d'air atmosphérique échauffé. C'était établir un fourneau sous un magasin à poudre. Pilatre Desrosiers a péri victime de son invention. Un autre physicien italien, Zambecari, est mort aussi après plusieurs tentatives constamment

malheureuses. Malgré ces funestes exemples, on peut être assuré qu'en observant soigneusement le petit nombre de précautions que j'ai tout-à-l'heure expliquées, les voyages aérostatiques n'offrent plus absolument aucun danger aujourd'hui.

CHAPITRE XIX.

Mesure de la Pesanteur spécifique des Liquides.

POUR déterminer le poids spécifique des liquides, de même que celui de tous les autres corps, il faut peser deux volumes égaux d'eau et de liquide, réduire ces poids au vide, à la température du maximum de condensation de l'eau, et les diviser l'un par l'autre.

Pour obtenir l'égalité des volumes, on se sert d'un flacon de verre, fermé par un bouchon de même substance dont la surface a été usée à l'émeri dans le col du flacon même, afin d'obtenir entre eux une jonction parfaite. On remplit ce flacon successivement d'eau et de liquide. On commence par déterminer exactement le poids du flacon vide, par la méthode des doubles pesées. Ensuite, on le pèse de même plein d'eau distillée, prise à une température connue; et, retranchant le premier poids du second, on a le poids apparent E de l'eau que le flacon contient à cette température. Alors on le remplit du liquide que l'on veut examiner, et dont on observe aussi la température avec exactitude. On détermine de la même manière le poids apparent L du volume de ce liquide qui est renfermé dans le flacon. Avec ces données et les lois de la dilatation du liquide employé, on peut calculer son poids spécifique.

D'abord rien ne serait plus facile à faire, si l'on voulait négliger toutes les réductions; c'est-à-dire, si l'on voulait employer directement les deux pesées, comme si elles étaient faites dans le vide et à la température du maximum de condensation; car alors le rapport $\frac{L}{E}$ serait la pesanteur spécifique du liquide soumis à l'expérience. Ainsi, en supposant,

par exemple, que ce liquide fût de l'éther, et que le flacon en contînt 39^g,184, tandis qu'il contiendrait 50^g3 d'eau, la pesanteur spécifique de cet éther serait $\frac{39,184}{50,3}$ ou 0,779. C'est ce que l'on fait le plus communément. Mais il est évident que cette manière d'opérer n'est qu'une approximation, qui ne saurait être employée dans des recherches délicates.

Pour parvenir à la véritable pesanteur spécifique, par la voie la plus simple et la plus directe, il faut regarder la pesée de l'eau, faite dans le flacon, comme servant uniquement à calculer sa capacité; après quoi la seconde pesée donnera le poids d'un centimètre cube du liquide pour une température quelconque. Si l'on veut en conclure sa pesanteur spécifique, il n'y aura qu'à réduire ce poids, par le calcul, au vide et à la température du maximum de condensation de l'eau. J'ai donné dans le *Traité général* toutes les formules nécessaires pour ces réductions. En les appliquant à des pesées très-exactes de l'eau, du mercure et de l'air atmosphérique, j'en ai déduit les résultats suivans qui sont d'une application fréquente.

Poids d'un centimètre cube de mercure à 0° . . .	13 ^g ,597190
Rapport des poids du mercure et de l'eau à volume égal, et à la température de 0°	13,598207
Rapport du poids du mercure à celui de l'air atmosphérique sec, sous la pression de 0 ^m ,76 et à la température de 0°	10466,82

Si l'on voulait obtenir le poids d'un centimètre cube des mêmes substances pour une autre température que 0°, il faudrait réduire ces évaluations proportionnellement aux dilatations de chaque substance. Nous avons déjà donné celles de l'air et du mercure, qui sont sensiblement constantes dans l'étendue de l'échelle thermométrique. Celle de l'eau, qui est très-sensiblement variable, se trouvera dans la table suivante, où les températures sont indiquées en degrés de Réaumur.

Tempé- rature de l'eau	VOLUMES.	DENSITÉS.	Tempé- rature de l'eau	VOLUMES.	DENSITÉS.
0	1,00000000	1,00000000	40	1,01229496	0,9878544
1	0,99995523	1,0000447	41	1,01292812	0,9872370
2	0,99993058	1,0000694	42	1,01357490	0,9866069
2,736	0,99992521	1,0000746	43	1,01423514	0,9859646
3	0,99992589	1,0000739	44	1,01490866	0,9853103
4	0,99994099	1,0000593	45	1,01559531	0,9846441
5	0,99997571	1,0000241	46	1,01629494	0,9839665
6	1,00002990	0,9999700	47	1,01700736	0,9832771
7	1,00010340	0,9998966	48	1,01773243	0,9825766
8	1,00019604	0,9998041	49	1,01846998	0,9818648
9	1,00030766	0,9996925	50	1,01921984	0,9811425
10	1,00043809	0,9995620	51	1,01998187	0,9804094
11	1,00058718	0,9994131	52	1,02075589	0,9796660
12	1,00075476	0,9992457	53	1,02154175	0,9789124
13	1,00094067	0,9990600	54	1,02233925	0,9781423
14	1,00114474	0,9988564	55	1,02314826	0,9773754
15	1,00136682	0,9986350	56	1,02396862	0,9765923
16	1,00160674	0,9983938	57	1,02480010	0,9758003
17	1,00186435	0,9981390	58	1,02564272	0,9749982
18	1,00213946	0,9978650	59	1,02649613	0,9741877
19	1,00243194	0,9975739	60	1,02736024	0,9733683
20	1,00274116	0,9972663	61	1,02823487	0,9725403
21	1,00306829	0,9969411	62	1,02911980	0,9717040
22	1,00341185	0,9965997	63	1,03001508	0,9708595
23	1,00377212	0,9962419	64	1,03092034	0,9700471
24	1,00414893	0,9958681	65	1,03183547	0,9691467
25	1,00454211	0,9954783	66	1,03276031	0,9682788
26	1,00495152	0,9950729	67	1,03369472	0,9674035
27	1,00537698	0,9946517	68	1,03463853	0,9665212
28	1,00581832	0,9942154	69	1,03559156	0,9656317
29	1,00627540	0,9937637	70	1,03655366	0,9647353
30	1,00674805	0,9932970	71	1,03752464	0,9638326
31	1,00723610	0,9928159	72	1,03850440	0,9629232
32	1,00773939	0,9923200	73	1,03949272	0,9620076
33	1,00825777	0,9918098	74	1,04048948	0,9610860
34	1,00879106	0,9912856	75	1,04149451	0,9601585
35	1,00933910	0,9907473	76	1,04250755	0,9592256
36	1,00990174	0,9901952	77	1,04352856	0,9582872
37	1,01047881	0,9896298	78	1,04455740	0,9573433
38	1,01107014	0,9890512	79	1,04559337	0,9563945
39	1,01167558	0,9884592	80	1,04663760	0,9554406

De l'Aréométrie.

Lorsqu'on n'a pas besoin d'une précision extrême, on peut déterminer la pesanteur spécifique des liquides par le moyen d'un instrument assez commode, inventé par Farenheit, qui lui a donné le nom d'*aréomètre*; il est représenté *fig. 70*. Cet instrument est construit en verre; il est renflé par le bas, et au contraire effilé par le haut, en un tube cylindrique d'un petit diamètre. Une petite quantité de mercure enfermée dans la boule B, fait que le centre de gravité de l'instrument est situé beaucoup plus bas que celui de son volume; d'où il résulte que, lorsqu'il est plongé dans un fluide pesant, il s'y tient debout dans un équilibre stable, sans jamais se renverser. Un trait extrêmement fin T est marqué sur le col CC, précisément au point où l'instrument s'enfonce dans le plus léger des liquides dont on veut éprouver la pesanteur, par exemple, dans l'éther. Alors si on le plonge dans un liquide plus lourd, dans l'eau, par exemple, il ne s'y enfoncera pas jusqu'au trait T; et, pour l'amener à ce point, ce qu'on appelle l'*affleurer*, il faudra le rendre plus lourd, ce qui pourra se faire en plaçant des poids sur le chapeau P. Or, quand l'instrument flotte ainsi, la force qui le soutient est, d'après les premières lois de l'hydrostatique, égale au poids du volume de liquide qu'il déplace. Ce volume est constant dans toutes les expériences, puisque la tige est toujours enfoncée jusqu'au trait T; mais le poids en est variable, selon la nature du liquide, et il est égal au poids propre de l'instrument que l'on est censé connaître, plus les poids additionnels dont il a fallu le charger pour l'affleurer. On a donc, par cette observation, les poids d'un même volume des différens liquides sur lesquels on opère, et on en déduit leurs pesanteurs spécifiques, en les divisant par le poids aussi observé du même volume d'eau.

Pour rendre ces comparaisons tout-à-fait rigoureuses, il faut que les expériences soient faites précisément à la température du maximum de densité de l'eau, ou qu'on les y ait ramenées par le calcul d'après les dilatations connues des

liquides observés. J'ai donné dans le *Traité général* toutes les formules nécessaires pour cet objet.

Au lieu de faire enfoncer l'aréomètre jusqu'à une marque fixe T, à l'aide de poids additionnels, on peut le laisser plonger librement, autant que l'exige son poids *seul*, et conclure les densités des liquides par l'observation des volumes variables qu'il déplace dans chacun d'eux; car, connaissant ainsi le poids et le volume de la partie plongée, on en conclura aussitôt, par une simple proportion, le poids absolu de tout autre volume. Mais, si l'on ne veut que comparer entre eux les poids relatifs de divers liquides, on peut se dispenser de ce calcul en opérant toujours avec le même aréomètre. Car, par exemple, si le volume ainsi submergé est, dans un liquide 16 centimètres cubiques, et dans un autre 32, il est clair que 32 centimètres cubes de celui-ci pèsent autant que 16 de l'autre. En général, dans cette manière d'opérer *sous des poids égaux*, les densités seront réciproquement proportionnelles aux volumes déplacés par l'aréomètre. Reste donc à le graduer de manière qu'on puisse connaître ces volumes. Pour cela, donnez-lui une tige bien cylindrique, pesez-le, et marquez exactement le point T de la tige auquel il s'affleure quand il s'enfonce par son propre poids dans l'eau, à la température du maximum de condensation. Alors son poids exprimé en grammes vous donnera le volume de la partie plongée, exprimé en centimètres cubiques. Cela fait, ajoutez de nouveaux poids sur le chapeau ou sur le haut de la tige, de sorte que l'instrument enfonce davantage et s'affleure à un autre point que vous marquerez également. Le poids additionnel ajouté au poids propre de l'instrument vous donnera encore le volume de la partie plongée, dans cette nouvelle circonstance; et, en le retranchant du premier, vous connaîtrez le volume de la portion de la tige comprise entre les deux points d'affleurement. Conséquemment, si elle peut être censée cylindrique, vous n'aurez qu'à diviser cet intervalle en un nombre quelconque de parties égales qui répondront à autant de portions d'égal volume dont vous connaîtrez le rapport au volume primitif pris pour point de départ. Supposons, par exemple, que chaque division en

soit $\frac{1}{1000}$; alors, si vous représentez par 1000 le volume de la partie qui plonge quand l'instrument s'enfonce, par son propre poids, jusqu'au trait T, dans l'eau distillée, lorsqu'ensuite dans un autre liquide il s'enfoncera jusqu'au second trait T', ou au troisième T'', ou au quatrième T''', vous saurez que les volumes déplacés sont : 1001, 1002 ou 1003, et ainsi du reste; d'où vous conclurez que la densité du liquide, comparativement à l'eau, est en raison inverse, c'est-à-dire $\frac{1000}{1001}$, ou $\frac{1000}{1002}$, ou $\frac{1000}{1003}$. Vous pourriez même, par un artifice fort simple, vous épargner la réduction définitive de ces fractions, et trouver tout de suite la densité en millièmes. Pour cela il faudra faire les divisions de la tige inégales, marquer la première T', à une distance de T, qui comprenne non pas $\frac{1}{1000}$, mais $\frac{1}{999}$, du volume primitif, la seconde T'' à $\frac{2}{998}$, la troisième T''' à $\frac{3}{997}$, et ainsi de suite, toujours en partant du point de départ T; puis vous écrirez à côté de chacune le nombre 999, 998, 997, qui a servi de diviseur pour la tracer. Car, par ce moyen, à quelque point T', T'', T''' de la tige que l'aréomètre s'enfonce, le volume total de la partie plongée se trouvera exprimé exactement par 1000; et le volume primitif, borné au trait T, le sera par le nombre marqué au point d'affleurement; ainsi la densité sera exprimée par $\frac{999}{1000}$, $\frac{998}{1000}$, $\frac{997}{1000}$, toujours avec un dénominateur égal à 1000. On peut faire ainsi des collections d'aréomètres dont les divisions se suivent depuis les densités les plus petites jusqu'aux plus grandes que l'on ait occasion d'observer.

CHAPITRE XX.

Pesanteur spécifique des Corps solides.

Le procédé que nous avons employé pour trouver la pesanteur spécifique des liquides, peut également servir pour trouver celle des corps solides qui ne se dissolvent pas dans l'eau. Pour cela, il suffit que le corps puisse être introduit dans un flacon ou dans tout autre vase susceptible d'être fermé exactement; mais il n'est pas nécessaire qu'il soit d'un

seul morceau : il peut même être en poussière fine. La manière la plus simple de faire l'expérience est la suivante.

On commence par déterminer exactement le poids apparent S du corps dans l'air ; et, au moment de la pesée, on note l'état du baromètre et du thermomètre ; ensuite on remplit le flacon ou le vase, d'eau distillée prise à une température connue. On place le corps, avec le flacon ainsi rempli, dans un des plateaux de la balance, et on tare le tout, en mettant dans l'autre plateau les poids nécessaires pour établir l'équilibre. Cela fait, on ouvre le flacon, on y introduit le corps qui chasse une partie de l'eau ; on le ferme ensuite, en ayant soin de ne pas laisser de bulles d'air dans son intérieur. On l'essuie exactement, et on le replace dans le même plateau de la balance ; alors ce plateau se trouve plus léger de tout le poids de l'eau chassée par le corps. On y ajoute les poids nécessaires pour établir l'équilibre, et l'on connaît ainsi le poids E de cette eau ; on connaît aussi le poids apparent S du corps. Avec ces données et les lois de la dilatation de ce corps, on peut calculer son poids spécifique.

D'abord ici, comme pour les liquides, le résultat se présente de lui-même quand on consent à négliger toutes les réductions, c'est-à-dire lorsqu'on emploie directement les deux pesées comme si elles étaient faites dans le vide et à la température du maximum de condensation de l'eau. Car alors, S et E étant les poids du corps et de l'eau à volume égal, $\frac{S}{E}$

sera le poids spécifique cherché. Par exemple, si le corps pèse dans l'air 523 grammes, et l'eau déplacée 84 grammes, le poids spécifique du corps ainsi calculé sera $\frac{523}{84}$, ou 6,226.

On peut encore déterminer E en suspendant le corps à un crin très-fin, attaché d'avance au plateau de la balance, et pesant successivement ce corps ainsi attaché, d'abord dans l'air, ensuite dans l'eau. La première opération donnera le poids S ; la seconde fera connaître le poids du corps dans l'eau. En le retranchant de S , on connaîtra la perte de poids que ce corps fait dans l'eau : ce sera E .

Il y a des corps qui s'imbibent d'eau sans se dissoudre ni

se décomposer. Pour ceux-ci, la question de la recherche du poids spécifique présente une espèce d'équivoque. Veut-on connaître le poids spécifique d'un grès, par exemple, en faisant abstraction des interstices qui s'y trouvent, et en examinant seulement quel serait le poids spécifique d'un corps qui aurait un même volume extérieur et un même poids que ce grès, mais qui serait sans interstices? ou bien, veut-on connaître le poids spécifique de la matière imperméable que ce corps contient? Dans les deux cas, on peut trouver le poids spécifique de la manière suivante. On détermine d'abord, comme précédemment, le poids du corps sec dans l'air : supposons qu'il pèse 1000 grammes. Ensuite on le plonge dans l'eau jusqu'à ce qu'il soit parfaitement imbibé; alors on voit de quelle quantité son poids s'est augmenté. Admettons que cette augmentation soit de 50 grammes, on introduit alors le corps dans le flacon, et l'on voit combien il déplace d'eau. Supposons que ce soit 240 grammes. Maintenant, si l'on veut déterminer le poids spécifique du corps, sous son volume extérieur, il faut regarder les 50 grammes d'eau qu'il a absorbés comme employés uniquement à boucher ses interstices. Alors le volume extérieur du corps a réellement déplacé 240 grammes d'eau. On divise donc 1000 par 240, et le poids spécifique apparent est 4,167.

Si l'on veut, au contraire, savoir le poids spécifique de la matière imperméable du corps, on doit considérer que cette matière n'a pas déplacé 240 grammes d'eau, mais $240 - 50$ ou 190 grammes; son poids spécifique est donc $\frac{1000}{190}$ ou 5,263.

Quand on veut savoir le poids spécifique d'un sel ou d'un corps quelconque, qui se dissout dans l'eau, on choisit un autre liquide, comme l'alcool, ou quelque huile, où il ne se dissout pas. On détermine d'abord le poids spécifique de ce liquide, relativement à l'eau, selon la méthode enseignée dans le chapitre précédent. Supposons qu'il soit de 0,886. On évalue ensuite le poids spécifique du corps proposé, relativement à ce liquide, comme on le ferait relativement à l'eau. Supposons qu'on le trouve de 3,278; on multiplie alors ces deux nombres l'un par l'autre, et leur produit 2,904308

exprime le poids spécifique du corps comparé à l'eau. La légitimité de cette méthode est évidente, puisque des rapports de densités ne sont que des rapports de poids, sous des volumes égaux.

Il faut maintenant compléter ces procédés, en y introduisant toutes les corrections que les observations exigent pour être ramenées à des termes comparables. Tel est l'objet des formules que j'ai données dans le *Traité général*.

On peut aussi déterminer les pesanteurs spécifiques des corps solides par le moyen de l'aréomètre. On a imaginé pour cela diverses modifications de cet instrument. Je me bornerai à décrire celui que M. Charles emploie depuis plus de vingt ans dans ses cours, et qu'il nomme *aréomètre-balance*. C'est le même qu'on connaît dans les cabinets de physique, sous le nom *d'aréomètre de Nicholson*.

Cet appareil, représenté *fig. 72*, est un véritable aréomètre de Farenheit, au bas duquel on a seulement ajouté un petit seau d'argent HH, percé à jour, et qui sert à contenir le corps solide S, quand on veut le peser dans l'eau. La boule de verre B, remplie de mercure, et qui sert de lest, s'accroche à ce seau. Maintenant, veut-on peser un corps solide? On met d'abord l'aréomètre dans un large vase rempli d'eau distillée dont la température est connue, et l'on ajoute sur son chapeau les poids nécessaires pour le faire enfoncer jusqu'au trait fixe T, marqué sur son col. Je suppose qu'il faille pour cela 26 grammes, à la température où l'on opère. Alors on ôte ces poids; on leur substitue le corps, qu'on place sur le chapeau FF. S'il pèse plus de 26 grammes, il fait enfoncer l'aréomètre au-dessus du trait T; et on ne peut pas le peser avec cet aréomètre-là. Mais s'il pèse moins de 26 grammes, il faudra ajouter une certaine quantité de grammes pour achever l'affleurement; et la différence de ces poids à 26 grammes donnera le poids apparent du corps dans l'air; c'est-à-dire, que s'il a fallu ajouter n grammes, ce poids sera $26 - n$.

Maintenant ôtez le corps de dessus le chapeau FF, et placez-le dans le seau d'argent HH. S'il est plus lourd que l'eau, à volume égal, il fera enfoncer l'aréomètre, mais d'une quan-

tité moindre que quand il était dans l'air. Alors il faudra ajouter sur le chapeau plus de n grammes, pour que l'instrument s'enfonce jusqu'au trait T. Soit ce nombre n' ; dans ce cas, $26 - n'$ sera le poids du corps dans l'eau. Si l'on retranche ce poids de celui du corps dans l'air, on aura le poids apparent, dans l'air, d'un volume d'eau égal à celui du corps. Le résultat sera donc la différence des poids additionnels, ou $n' - n$. En divisant $26 - n$ par ce nombre, le quotient exprimera la pesanteur spécifique du corps relativement à l'eau, dans les circonstances où l'on a opéré.

Par exemple, dans l'*aréomètre - balance de M. Charles*, la valeur exacte du poids constant additionnel est $26^{\text{g}}, 200$ quand la température est $12^{\circ}, 5$. Supposons qu'à cette température, ayant placé isolément sur le chapeau le corps que l'on veut peser, on trouve qu'il faut y ajouter $14^{\text{g}}, 100$ pour faire enfoncer l'instrument jusqu'à la marque. Alors le poids du corps dans l'air sera $26^{\text{g}}, 200 - 14^{\text{g}}, 100$, ou $12^{\text{g}}, 100$. On transporte ce corps dans leseau d'argent : supposons qu'alors il faille ajouter sur le chapeau $4^{\text{g}}, 500$ aux $14^{\text{g}}, 100$ qui s'y trouvaient déjà, ce qui fera en tout $18^{\text{g}}, 600$. Ces $4^{\text{g}}, 500$ ajoutés seront la perte de poids que le corps fait dans l'eau ; ce sera donc aussi le poids du volume d'eau qu'il déplace. Conséquemment sa pesanteur spécifique apparente sera $\frac{12,100}{4,500}$ ou $2,688\text{g}$.

Si le corps était plus léger que l'eau, et qu'on le mit dans leseau d'argent, il ne peserait pas sur lui, et par conséquent l'opération ne pourrait pas avoir lieu. Dans ce cas, M. Charles renverse leseau comme le représente la figure 73, et le corps placé au-dessous soulève l'aréomètre. Mais comme déjà l'instrument seul exige l'addition d'un certain poids pour s'enfoncer jusqu'à la marque, il faut employer ici un poids plus grand ; toutefois si l'on compte, comme tout-à-l'heure, ce qu'il faut ajouter au premier poids additionnel pour l'affleurer, cette différence exprimera encore la perte de poids que le corps fait dans l'eau. Ainsi en divisant son poids dans l'air, par cette perte, qui est le poids du volume d'eau qu'il déplace,

le quotient sera encore sa pesanteur spécifique, comme dans le cas précédent.

CHAPITRE XXI.

Des Phénomènes capillaires.

Nous avons déjà plusieurs fois remarqué que les phénomènes les plus curieux de la physique sont ceux qui nous donnent quelques lumières sur la constitution même des corps et sur les actions réciproques de leurs particules. Nous allons considérer une classe entière de phénomènes de ce genre très-étendue et très-variée, et qu'il est d'autant plus important de connaître, qu'elle offre le grand avantage de pouvoir être soumise à un calcul rigoureux.

Si l'on suspend horizontalement des plaques de verre, de marbre, de métal, etc., à l'un des plateaux d'une balance; et si, après les avoir mises en équilibre avec des poids, on les fait toucher à la surface d'un liquide, on voit qu'elles y adhèrent avec une certaine force; car elles ne peuvent plus en être séparées qu'en ajoutant de nouveaux poids dans l'autre plateau. Cette adhésion n'est pas produite par la pression de l'air, car elle a lieu de même dans le vide. On voit donc qu'ici ce sont les molécules mêmes du corps solide qui s'attachent aux particules du liquide, en vertu d'une force d'affinité. Mais, ce qu'il y a de bien remarquable, il en résulte aussi qu'il s'exerce une action de ce genre entre les particules du liquide lui-même. En effet, lorsque le disque est susceptible d'être mouillé par le liquide, comme cela a lieu, par exemple, dans le cas d'un disque de verre posé sur l'eau ou sur l'alcool, ce disque, lorsqu'on le retire, emporte avec lui une petite couche liquide qui y reste adhérente. Ce n'est donc pas alors, à proprement parler, le corps solide qui s'est détaché du liquide, c'est cette petite couche qui s'est séparée des molécules liquides qui étaient au-dessous d'elle. Or, la force qu'il faut employer pour l'en détacher ainsi, est incomparablement plus considé-

nable que son propre poids, et par conséquent cet excès de force prouve nécessairement l'existence d'une adhésion intérieure au liquide, qui retenait la couche unie au reste de la masse liquide, indépendamment de la pesanteur.

D'après les notions que nous avons déjà acquises sur les attractions réciproques des molécules des corps, nous devons pressentir que la force qui s'exerce ici est de même nature que ces attractions, et qu'elle n'aura d'effet sensible qu'à des distances très-petites. C'est aussi ce que l'expérience démontre. Quelque épaisseur que l'on donne à la matière du disque, si sa nature et le contour de sa surface demeurent les mêmes, la force qu'il faudra employer pour le détacher d'un liquide donné sera la même aussi. Par conséquent, une fois que le disque a une certaine épaisseur, probablement plus petite que toutes celles que l'art pourrait lui donner, les nouvelles couches matérielles qu'on y ajoute n'exercent plus sur le liquide d'action appréciable. D'où l'on voit que cette action n'est capable de produire des effets sensibles que dans les distances très-petites. Mais, ce qui le prouve mieux encore, c'est que tous les disques de même largeur, quelle que soit leur nature, lorsqu'ils sont susceptibles d'être mouillés par le liquide, exigent absolument la même force pour en être détachés. Ainsi, dans ce cas, la petite couche d'eau infiniment mince qui s'attache à leur surface, met entre eux et le reste du liquide une distance assez grande, quoique si petite, pour que celui-ci n'en éprouve aucune action sensible; et alors la force qu'il faut employer pour détacher tous les disques de même largeur est constante, parce que c'est celle qui est nécessaire pour détacher le liquide de lui-même.

Des phénomènes produits par la même cause, mais différens en apparence, s'observent encore quand on plonge dans un liquide des tubes creux dont le calibre intérieur est fort petit. Alors, si le liquide est de nature à mouiller le tube, on le voit s'élaner dans son intérieur, et s'y maintenir élevé au-dessus du niveau naturel, d'autant plus que le tube est plus étroit. C'est ce qui a lieu, par exemple, quand on plonge des tubes de verre dans l'eau ou dans l'alcool. Dans ce cas, l'extrémité

supérieure de la colonne est terminée par un ménisque concave vers l'air. Mais si le liquide n'est pas de nature à mouiller le tube, comme cela a lieu, par exemple, quand on plonge des tubes de verre humides dans du mercure, ou des tubes graissés dans l'eau, on voit le liquide s'abaisser au-dessous du niveau, au lieu de s'élever; et alors l'extrémité supérieure de la colonne se termine par un ménisque convexe. Dans tous les cas, l'élévation ou l'abaissement sont d'autant plus considérables, que le tube est plus étroit. Tels sont les phénomènes que les physiciens ont appelés *capillaires*, pour exprimer que le diamètre des tubes qui servaient à les produire, devait approcher de la finesse des cheveux.

Ces effets sont les mêmes dans le vide que dans l'air; ils ne tiennent donc pas à la pression de ce fluide. Mais ils dépendent, comme les précédens, des attractions à petites distances exercées par le tube sur le liquide, et par le liquide sur lui-même. Aussi, lorsqu'on fait varier l'épaisseur du verre dont sont formés les tubes, sans changer leur diamètre intérieur, les élévations ou les abaissemens du liquide y demeurent absolument les mêmes qu'auparavant, ce qui prouve qu'au-delà d'une certaine limite d'épaisseur, probablement trop petite pour que nous puissions l'atteindre, toutes les couches que l'on peut ajouter à la matière du tube ne produisent plus d'effet appréciable. Par une conséquence de cette loi, lorsque des tubes de même diamètre sont mouillés complètement par le liquide, dans toute leur étendue, son élévation est la même dans tous, quelle que soit leur nature; ce qui prouve que déjà la petite couche qui s'attache à leur surface intérieure éloigne assez leurs particules du reste des colonnes liquides, pour que leur attraction sur elles devienne insensible. Alors l'ascension est égale dans tous les tubes, parce qu'elle est égale à ce qu'elle serait dans un tube d'égal diamètre formé par le liquide lui-même. Cette égalité tient, comme on voit, à une cause pareille à celle que nous avons observée dans l'adhésion des disques sur un liquide qui les mouillait. Mais pour qu'elle s'observe dans les tubes, il faut qu'ils soient complètement mouillés; car sans cela le frottement du li-

quide contre leurs parois sèches, faisant varier la direction des premiers élémens de la surface libre, la courbure de toute cette surface change, ainsi que la différence de niveau.

En général, le caractère le plus frappant de ces phénomènes, c'est la liaison constante qui existe entre l'élévation ou l'abaissement de la colonne fluide, et la forme extérieurement concave ou convexe de la surface par laquelle elle se trouve terminée. C'est aussi dans ce rapprochement que l'on trouve le secret du phénomène, comme M. Laplace l'a fait voir.

Lorsqu'un liquide en repos prend naturellement une surface horizontale, on doit concevoir que ce liquide exerce sur lui-même une action propre, indépendante de la pesanteur terrestre, action qui tend à faire entrer les molécules de la surface dans l'intérieur du fluide, et qui produirait réellement cet effet, sans la résistance qui résulte de l'impenétrabilité. Maintenant si, par une cause quelconque, cette surface devient concave ou convexe, comme cela a lieu dans les tubes capillaires, le calcul montre que l'attraction propre du fluide sur lui-même, est différente de ce qu'elle était dans l'état plan; elle est plus forte si la surface devient convexe à l'extérieur; plus faible si elle devient concave. Le premier cas est celui du mercure qui s'abaisse dans des tubes de verre, le second convient à l'eau qui s'y élève. Pour une colonne circulaire contenue dans un tube très-fin, la variation de la force attractive est presque exactement réciproque au diamètre intérieur du tube; et son expression analytique se réduit juste à moitié, si le tube se change en deux plans parallèles dont l'intervalle soit le même que son diamètre intérieur.

En partant de ces données mathématiques, rien n'est plus facile que d'expliquer la raison physique qui détermine l'élévation ou l'abaissement des liquides dans les tubes capillaires. En effet, commençant par le premier cas, qui suppose un ménisque concave, *fig. 74*, imaginons un canal infiniment étroit et de figure quelconque, qui, partant du point le plus bas S du ménisque, traverse le tube et se replie par-dessous, de manière à venir se terminer en H à la surface libre du fluide. Pour que celui-ci soit en équilibre, il faut qu'il y ait

équilibre dans le petit canal. Or, ce dernier est pressé à ses deux orifices S et H par deux forces inégales : l'une, en H, est l'action d'un corps terminé par une surface plane; l'autre en S, dans l'intérieur du tube capillaire, est celle du même corps terminé par une surface concave : cette dernière est par conséquent plus faible. Il est donc impossible que l'équilibre subsiste dans cet état, et il faut nécessairement, pour qu'il ait lieu, que le liquide s'élève dans le tube capillaire jusqu'à ce que le poids de la petite colonne soulevée compense ce qui manque à l'action attractive par l'effet de la concavité de la surface. La différence de ces actions est en raison inverse du diamètre du tube; la hauteur de la petite colonne suivra donc aussi le même rapport, ce qui est conforme à l'observation.

Si l'extrémité de la colonne liquide était convexe au lieu d'être concave, les résultats seraient contraires. Dans ce cas, l'action qu'elle exercerait sur sa propre surface, serait plus forte que celle du plan, toujours dans le rapport inverse du diamètre du tube. Par conséquent, si l'on suppose qu'un liquide affecte cette forme dans un tube capillaire, en reprenant tous les raisonnemens que nous venons de faire, avec cette seule modification, on verrait que le petit canal curviligne est encore pressé à ses deux orifices d'une manière inégale, plus fortement du côté de la surface convexe que du côté de la surface horizontale. D'où il suit que, pour l'équilibre, le fluide devra s'abaisser dans le tube où l'action est la plus forte, afin que cette dépression produise une différence de niveau qui puisse compenser la faiblesse de la force opposée. L'abaissement du fluide sera donc comme la différence des deux forces, c'est-à-dire, réciproque au diamètre du tube. C'est ce qui arrive, en effet, lorsque le fluide ne peut pas mouiller le tube et s'attacher à ses parois.

Le caractère distinctif de cette théorie, c'est de faire tout dépendre de la forme de la surface. La nature du corps solide et celle du fluide ne font que déterminer la direction des premiers élémens, de ceux où le fluide touche le corps solide; car c'est là seulement que s'exerce sensiblement leur mutuelle affinité. Ces directions, une fois données, sont toujours les

mêmes pour le même fluide et pour la même matière solide, quelle que soit la figure des corps qui en sont faits, par exemple, pour des tubes et pour des plans; mais au-delà de ces premiers élémens, et hors de la sphère d'activité sensible du corps solide, la direction des autres élémens et la forme de la surface sont uniquement déterminées par l'action du fluide sur lui-même.

Toutes les causes qui, en agissant sur la surface intérieure du tube, peuvent changer la direction des premiers élémens, doivent donc aussi changer la courbure de la surface liquide, et par suite l'élevation du fluide. Ceci explique l'abaissement de l'eau dans les tubes enduits de graisse à l'intérieur, l'élevation du mercure dans les tubes secs, et son abaissement dans les tubes humides. Le frottement peut aussi produire des effets analogues, et M. Laplace en cite des exemples : ces effets se conçoivent très-bien d'après sa théorie ; et, au lieu d'être irréguliers et bizarres comme ils paraissent d'abord, ils sont au contraire assujettis à des lois certaines, et peuvent se prévoir exactement.

Cette théorie explique également, et avec la même simplicité, tous les autres phénomènes capillaires sans exception. Ainsi l'ascension de l'eau dans des cylindres concentriques, ou dans les tubes coniques, ou entre des plans, la courbure qu'elle affecte lorsqu'elle adhère à un plan de verre, la forme sphérique que prennent naturellement les gouttes de liquides, la marche d'une goutte de fluide entre deux glaces peu inclinées, la force qui pousse les uns vers les autres les corps flottans sur la surface des liquides, l'adhésion des disques plans avec cette même surface, adhésion quelquefois si forte, qu'il faut un poids très-notable pour les détacher, etc. ; tous ces effets si variés se déduisent de la même formule, non d'une manière vague et conjecturale, mais calculés avec leurs valeurs numériques, et ils acquièrent ainsi des rapports qu'on n'y soupçonnait pas. On peut voir dans le *Traité général* l'exposition étendue de ces résultats. On y trouvera aussi le détail des procédés extrêmement précis, par lesquels M. Gay-Lussac est parvenu à mesurer toutes les particularités des phéno-

mènes, et à offrir ainsi à la théorie analytique tous les élémens possibles de vérification.

L'attraction mutuelle des liquides et des solides, cause générale des phénomènes capillaires, ne se manifeste pas seulement dans l'état d'équilibre, elle influe aussi sur les mouvemens des liquides dans les vases qui les renferment. Je rapporterai ici quelques exemples qui rendent cette influence sensible, et je les tirerai d'une note très-intéressante sur l'écoulement des fluides, publiée par M. Le Hot.

Lorsqu'une colonne d'eau ou de tout autre liquide ABCD, *fig. 75*, oscille dans un siphon cylindrique de verre, dont les deux branches AB, CD sont verticales et d'égal diamètre, on prouve par le calcul que, si le mouvement de cette eau est tout-à-fait libre, il sera absolument analogue à celui d'un pendule, de sorte que, quelle que soit la nature du liquide, les oscillations devront être toutes de même étendue, de même durée, et se continuer ainsi indéfiniment : néanmoins l'expérience montre qu'elles diminuent graduellement d'amplitude, et qu'elles cessent d'être sensibles, même dans le vide. Il existe donc une résistance qui gêne le mouvement des particules liquides, et use graduellement leur vitesse. Or, puisque leur contact avec le tube est l'unique circonstance physique qui leur soit étrangère, il faut que la résistance prenne naissance dans ce contact même, et que de là elle se communique graduellement jusqu'au centre de la colonne oscillante. C'est précisément là, en effet, ce que doit occasionner l'attraction de la matière du tube sur le liquide, et celle du liquide sur lui-même. Car d'abord la première de ces forces, s'exerçant sur une couche infiniment mince, formée par les particules les plus voisines de la paroi du tube, ralentira la vitesse d'oscillation que tendrait à leur imprimer la gravité seule, et pourra même, dans quelques cas, l'anéantir entièrement, si elle est assez énergique pour retenir fixement ces particules. Celles-ci à leur tour agiront pareillement par leur attraction propre, sur une autre couche plus intérieure; et elles y produiront un retardement analogue, mais dont la quantité sera, en général, différente, comme étant produite par des attractions d'une

autre intensité ; et le même effet se propageant ensuite de couche en couche , jusqu'au centre de la colonne fluide , y produira un retardement total , de même que dans l'état d'équilibre il y déterminait une élévation ou un abaissement.

D'après cela , si l'on introduit successivement dans un même siphon des colonnes liquides d'égale longueur , mais de nature différente , le décroissement des amplitudes d'oscillation devra être inégal , puisque l'attraction du tube sur le liquide et du liquide sur lui-même ne seront pas les mêmes dans ces différens cas : c'est aussi ce que l'observation confirme. Pour faire cette expérience avec exactitude , M. Le Hot incline d'abord le siphon afin de faire monter le liquide dans une des branches plus que dans l'autre ; puis il ferme le haut de cette branche avec le doigt , et il replace le siphon dans une situation verticale : le liquide ne pouvant descendre dans la branche fermée sans y raréfier l'air , se trouve maintenu par la pression de l'atmosphère à une certaine hauteur au-dessus de son niveau ; c'est là son point de départ , que l'on peut ainsi mesurer à loisir. Alors , ôtant le doigt , le liquide tombe et commence à osciller à partir de ce terme , et l'on peut mesurer la diminution de ses excursions en fixant le point où elle s'élève dans une branche ou dans l'autre , après un nombre d'oscillations déterminé. M. Le Hot a trouvé de cette manière que , dans des siphons de verre , et à la température de 17° , l'eau est moins retardée que l'alcool et plus que le mercure. Il a trouvé aussi que le ralentissement éprouvé par l'eau et l'alcool diminue à mesure que la température s'élève.

Par une déduction évidente de ces faits , on voit que l'écoulement des liquides dans des tubes capillaires doit se trouver modifié par l'action de ces liquides sur eux-mêmes et sur la matière des tubes. C'est aussi ce que l'expérience confirme encore. Tous les liquides s'écoulent plus lentement par un tube capillaire que par une ouverture de même diamètre percée en mince paroi. Le tube d'écoulement étant supposé horizontal , il existe pour chaque liquide une hauteur de charge telle que la vitesse d'écoulement reste la même pour toutes les longueurs de tubes plus grandes ; mais elle s'accélère si on diminue la

longueur du tube. Par un effet de la même cause, la durée de l'écoulement des liquides de différente nature est différente dans des circonstances pareilles, c'est-à-dire, en supposant qu'ils coulent dans un même tube capillaire, à une même température, et sous des hauteurs de charge égales pour chacun d'eux. Par exemple, un volume d'eau pure s'écoule ainsi plus promptement qu'un volume égal d'alcool ou d'eau salée, mais moins vite qu'un pareil volume de mercure. Enfin, pour chaque liquide, le temps nécessaire à l'écoulement d'un volume donné diminue à mesure que la température s'élève. Ces faits ont été observés par Dubuat, physicien aussi exact qu'ingénieur. Quelques physiciens ont cru pouvoir les attribuer à la fixation d'une couche liquide d'une épaisseur sensible, que l'attraction du tube rendrait adhérente à la paroi intérieure, et qui diminuerait d'autant le diamètre réel du canal par lequel s'opère l'écoulement. Mais la grande épaisseur qu'il faudrait supposer à cette couche immobile, épaisseur qui dans certains cas devrait être de plus d'un millimètre, suffirait pour élever un doute très-fort contre cette supposition; et, en effet, si on laisse tomber du sable réduit en poudre très-fine dans un vase d'où l'eau s'écoule par un tube capillaire, il y a toujours quelques particules de cette poudre qui, dans leur mouvement, suivent la paroi intérieure du tube, et qui la suivent de si près qu'on ne distingue pas le moindre intervalle sensible entre elles et eux. La couche d'eau qui avoisine cette paroi et qui entraîne ces particules n'est donc pas fixée, du moins à une distance sensible de la paroi. En outre, si le ralentissement venait d'un rétrécissement physique dans le diamètre réel de l'ouverture par laquelle le fluide s'écoule, la longueur du tube d'écoulement n'y aurait aucune influence; au lieu que, jusqu'à une certaine limite, l'accroissement de longueur du tube diminue la quantité du liquide écoulé. Enfin, on peut, comme l'a fait M. Le Hot, prouver directement, par une expérience, que l'augmentation de l'écoulement, quand la température s'élève, n'est pas due à l'augmentation du diamètre du jet, mais à l'augmentation de sa vitesse; et, pour cela, il suffit d'observer la hauteur ver-

ticale à laquelle un même fluide jaillit, par le même tube et sous la même pression, mais à des températures diverses. Car la hauteur du jet dépend uniquement de la vitesse de projection. Or, en faisant cette épreuve, on trouve que le liquide jaillit plus haut, à mesure que la température est plus élevée. Et cependant, comme en s'échauffant il se dilate, la résistance que l'air lui oppose alors, doit ralentir sa vitesse un peu plus qu'elle ne le faisait auparavant.

Cette force attractive, sensible seulement à de petites distances, et de laquelle dérivent les phénomènes capillaires, est la véritable source des affinités chimiques. Seulement, dans les phénomènes capillaires, elle ne se montre point dans toute son étendue; elle n'y paraît que par ses différences, et en raison des variations que produit sur elle la différente courbure des surfaces par lesquelles les corps sont terminés; au lieu que dans les affinités chimiques, c'est l'attraction propre, et en quelque sorte individuelle des molécules, qui agit pleinement avec toute son énergie. Les phénomènes capillaires peuvent donc nous donner des lumières importantes, sinon sur l'intensité absolue de cette attraction, au moins sur ses caractères. Déjà les variations qu'ils éprouvent à diverses températures paraissent indiquer que l'intensité de l'action exercée par un même système de particules matérielles, ne croît pas proportionnellement à sa condensation, mais dans un rapport moindre, ce qui est d'une grande conséquence relativement à l'action des corps sur la lumière, où cette diminution s'observe aussi.

CHAPITRE XXII.

De l'Élasticité.

LES expériences que nous avons faites jusqu'à présent nous ont montré les corps comme des assemblages de molécules matérielles extrêmement petites, maintenues en équilibre entre deux forces, savoir une affinité mutuelle qui tend à les réunir, et un principe répulsif, qui est probablement le même

que celui de la chaleur, et qui tend à les écarter. Quoique ces molécules soient si petites que nous ne puissions absolument pas observer leur forme, nous avons cependant découvert qu'étant placées à de certaines distances les unes des autres, elles exercent des attractions d'intensité diverse selon les côtés par lesquels elles se présentent. Ces différences sont sur-tout devenues sensibles lorsque les corps liquides s'approchaient de l'état solide; et l'on en voit aussi l'effet dans les cristaux, où les molécules s'arrangent et s'adaptent les unes aux autres d'une manière particulière, toujours constante pour chaque substance, lorsque leur rapprochement s'est opéré librement et avec lenteur. Comme on remarque d'ailleurs que les forces attractives, qui produisent l'affinité, ne sont sensibles qu'à des distances très-petites, circonstance que la théorie des phénomènes capillaires met dans l'évidence la plus parfaite, on est conduit, en généralisant ces idées, à considérer les divers états d'un même corps comme des passages successifs, déterminés par les rapports qui existent entre l'intensité du principe répulsif qui écarte ses particules, et celle de l'affinité qui les retient. Si les molécules du corps se trouvent placées à des distances telles que l'affinité réciproque des particules soit insensible, le principe répulsif agit seul sans être contrebalancé. Alors les molécules font effort pour se fuir les unes les autres. Elles se fuient en effet quand elles ne sont pas retenues par des obstacles extérieurs; ou, si elles sont retenues par de pareils obstacles, elle font effort pour les repousser. C'est le cas des substances aériformes. Maintenant rapprochons ces particules à des distances beaucoup plus petites les unes des autres, à des distances telles que l'affinité qui les attire soit en équilibre avec le principe répulsif qui les écarte, nous aurons un autre état des corps. Cet état peut être tel que l'affinité des particules s'exerce sans que les modifications de cette affinité, qui dépendent de la figure des particules, soient encore sensibles; car, quelle que soit la loi de l'affinité, l'effet de ces modifications doit s'affaiblir par la distance beaucoup plus rapidement que la force principale. Alors les molécules s'attireront de la même manière, quelle

que soit leur position relative autour de leur centre de gravité. Les caractères permanens d'un tel état doivent donc être une mobilité parfaite des particules, résultante de leurs attractions toujours semblables, et une grande résistance à la compression, résistance produite par l'effort du principe répulsif, devenu beaucoup plus considérable que dans les gaz. C'est le cas des corps liquides. Enfin, si l'on conçoit les particules amenées à des distances plus petites encore, non-seulement leur force principale d'affinité, mais encore les modifications de cette force, dépendantes de leur figure, pourront devenir sensibles. Alors, si les molécules sont amenées graduellement à ces distances, en conservant la liberté de se mouvoir, elles se tourneront, et se disposeront de manière à se joindre, ou plutôt à s'approcher les unes des autres par les côtés où elles s'attirent davantage, du moins lorsqu'elles auront de pareils côtés; et, par cette disposition générale et régulière, elles formeront un corps solide cristallisé. Mais ces positions d'équilibre pourront n'être pas les seules qui constitueront la solidité. Car, si des circonstances étrangères, par exemple, l'agitation des particules ou un refroidissement rapide, les empêchent de prendre exactement les dispositions favorables au maximum de leur attraction, elles seront forcées de s'approcher par d'autres côtés, et de se présenter les unes aux autres dans d'autres situations où l'influence de leur figure pourra encore être sensible, quoique différente de ce qu'elle était dans le cas d'un arrangement libre et spontané; ce sera donc l'état des substances solides non cristallisées.

Or, par une conséquence de cet arrangement, et par cela même que la disposition des particules qui peut y produire l'équilibre n'est pas unique, il s'ensuit qu'en soumettant le corps solide à des forces mécaniques telles que des pressions, des chocs brusques, on pourra, du moins dans certaines substances, forcer les particules à se présenter les unes aux autres par des côtés différens, sans détruire pour cela leur état de solidité. On peut même concevoir cette action extérieure tellement irrégulière, qu'elle agisse diversement sur les

particules diverses d'un même corps, qu'elle les tourne dans des sens différens, et qu'elle aille enfin jusqu'à séparer tout-à-fait quelques-unes d'entre elles, sans déplacer sensiblement les autres. Tel est le cas des corps solides que l'on frappe, que l'on brise avec un marteau, ou que l'on broie avec un pilon. Mais, si les forces qui agissent de cette manière sont conduites avec intelligence; et si la nature de la substance permet à ses particules divers états d'équilibre solide, le corps pourra acquérir ainsi des formes et des propriétés nouvelles; il pourra s'étendre en lames, se tirer en fils, s'arrondir en vase. Il pourra acquérir à sa surface plus de dureté. Tel est le cas de certains métaux qui peuvent s'aplatir au laminoir, s'allonger à la filière, se modeler ou se durcir sous le marteau. Dans ces cas divers, on sent que, pour forcer les particules à changer leurs positions d'équilibre, il faut nécessairement une certaine force. Les expériences montrent que cette force, pour produire un effet sensible et permanent, doit excéder pour chaque substance, et pour chaque état de cette substance, une limite déterminée; en sorte que, si la force est moindre que cette limite, la particule sur laquelle elle agit ne change pas sa position d'équilibre. Elle s'en écarte seulement un peu, tandis que la force agit sur elle; mais dès qu'elle est abandonnée à elle-même, elle revient à son premier état d'équilibre et à sa position primitive, par une suite d'oscillations isochrones. Cette propriété constitue ce que l'on appelle l'*élasticité des corps*. Elle serait parfaite dans un corps dont les particules résisteraient ainsi à tout changement permanent d'agrégation, quelle que fût la force qui agit sur elles; de sorte qu'elles reviendraient toujours à leur première position d'équilibre, après en avoir été écartées momentanément. C'est ce qui a lieu par exemple pour les lames de verre qui, après avoir été pliées, reviennent sur elles-mêmes et reprennent exactement leur première forme, du moins tant qu'on n'exécède pas; pour chacune d'elles, un certain degré de courbure où elle se rompt. Ainsi, tant qu'on ne va pas jusqu'à cette limite de courbure, les particules qui composent la lame ne changent pas leurs points d'adhésion, et l'élasticité

est parfaite. Mais l'élasticité sera imparfaite, si les particules, en même temps qu'elles oscillent, ne sont pas ramenées par leurs oscillations, précisément à la même position d'équilibre qu'elles avaient d'abord. C'est le cas des lames de fer et de plusieurs autres métaux, qui, lorsqu'elles ont été pliées au-delà de certaines limites, ne reviennent pas tout-à-fait à leur première direction. Enfin, l'élasticité sera nulle ou insensible, si les molécules, déplacées par la plus petite force, ne montrent aucune tendance pour revenir à leur position primitive; c'est ce que l'on observe dans les lames minces de plomb qui, étant pliées, conservent complètement la courbure qu'on leur donne. Dans tous les cas, on voit que l'élasticité doit être absolument distinguée de la cohésion, puisque celle-ci est la force absolue avec laquelle les particules adhèrent les unes aux autres, au lieu que l'élasticité est la tendance qu'elles ont, dans certains cas, pour revenir à leur position primitive, lorsqu'une impulsion extérieure et passagère les en a momentanément écartées d'une quantité extrêmement petite, et moindre que la distance à laquelle leur figure aurait une influence différente sur le mode ou l'intensité de leur agrégation.

Ces considérations indiquées par l'ensemble des expériences que nous avons déjà faites, peuvent se vérifier immédiatement, en tirant des fils métalliques par des poids connus, et les laissant ensuite revenir librement sur eux-mêmes; ou, en les tordant d'un certain nombre de tours et les laissant se détordre librement. Car ces retours à l'état primitif se font toujours par une série d'oscillations d'égales durées, et la force qui ramène le corps est toujours proportionnelle à l'écart qu'on lui a donné. Ainsi, dans les fils tendus, la force de rétraction est proportionnelle à la quantité dont ils ont été momentanément allongés. Et dans les fils tordus la réaction de torsion est exactement proportionnelle à l'angle de torsion. On peut voir dans le *Traité général* les preuves de ce résultat tirées de deux belles suites de recherches, dont l'une a été faite par s'Gravesande, et l'autre par Coulomb.

L'élasticité qui ramène les particules à leurs positions primitives, lorsqu'elles en ont été tant soit peu écartées, existe

non-seulement dans les métaux, mais dans tous les corps de la nature, lorsqu'ils sont réduits en fibres très-minces. Elle existe même dans les fils d'une finesse extrême qui sortent du corps du ver à soie, et on l'y rend sensible en les réunissant en grand nombre. La toile de l'araignée, plus fine encore, est encore élastique, puisqu'elle cède à la pression sans se rompre, et qu'elle revient sur elle-même quand la force qui la tire est supprimée.

Toutes les opérations physiques ou mécaniques qui changent l'état d'agrégation des particules des corps influent nécessairement sur les propriétés qui dépendent de cet état d'une manière immédiate, comme la dureté et l'élasticité. Par exemple, le fer frappé fortement et long-temps au marteau, ou tordu, ou tiré à la filière, éprouve un rapprochement de parties qui rend sa densité, sa dureté et son élasticité plus grandes. C'est ce que l'on appelle l'écrourir. Quand il est dans cet état, chauffez-le jusqu'à rougir, et laissez-le ensuite se refroidir lentement. La chaleur, en écartant ses parties, leur permet de reprendre les positions relatives qui constituaient leur premier état d'équilibre; et le métal perd son accroissement de dureté et de densité accidentelles; c'est ce qu'on appelle le recuire. Lorsque le fer, au lieu d'être pur, est allié avec une proportion de charbon plus ou moins considérable, ce qui constitue les diverses espèces d'acier, les variations brusques de température y produisent encore d'autres effets extrêmement remarquables. L'acier recuit est malléable; chauffez-le jusqu'au rouge, et plongez-le subitement dans un liquide froid, tel que l'eau, par exemple, ce qui s'appelle le *tremper*; il en sort, après le refroidissement, incomparablement plus dur; et, selon que l'alternative de température qu'il a ainsi éprouvée est plus ou moins considérable, il acquiert la consistance d'un excellent ressort, ou devient tout-à-fait cassant; et ces modifications sont accompagnées d'une altération de forme qui semble indiquer un changement violent opéré dans l'agrégation de ses parties. Pour se faire une idée nette de ce phénomène, il faut partir d'un fait général; c'est que l'acier, après avoir été trempé, ne revient pas aux mêmes dimensions qu'il avait

auparavant. A égalité de température, il occupe toujours un volume plus considérable; de sorte que la trempe le tient en quelque sorte dans un état forcé de dilatation. On en a la preuve dans une foule de procédés des arts. Si l'on fabrique des coins cylindriques d'acier rodés exactement de manière à entrer juste dans un cylindre creux de même diamètre, et qu'on les trempe isolément, sans tremper le cylindre, ils ne peuvent plus y entrer ensuite. Si on les trempe en place, et que la matière du cylindre ne soit pas susceptible de trempe, en sorte qu'après le refroidissement elle revienne seule à ses dimensions primitives, les coins, en se dilatant, la refoulent de tous côtés sur elle-même, comme si on les eût chassés violemment dans un trou beaucoup moindre que leur diamètre; et ils sont ainsi retenus dans le trou, sans autre appareil, avec une force inexprimable. M. Fortin, qui a fait sur ce sujet diverses expériences, a trouvé que l'expansion produite par la trempe est incontestable; mais son étendue a varié selon les dimensions des pièces trempées, quoiqu'elles fussent toutes du même acier, et qu'on les eût exposées à des températures exactement pareilles. Toutefois, le seul fait de cette expansion donne une indication assez nette de ce qui se passe dans le phénomène de la trempe. Il paraît qu'à l'instant où l'acier fortement échauffé est précipité subitement dans une température très-basse, le refroidissement, qui saisit les couches extérieures de la masse plus aisément que le centre, les force de se mouler pour ainsi dire sur ce centre échauffé et dilaté; ce qui leur fait prendre des dimensions plus grandes qu'elles n'auraient eues si elles avaient été abandonnées graduellement à elles-mêmes. Bientôt les molécules placées plus près du centre se refroidissent à leur tour; mais les couches extérieures, déjà parvenues à un état fixe, les retiennent par leur attraction, déterminent le volume qu'elles doivent remplir, et les empêchent ainsi de se rapprocher autant qu'elles l'auraient pu faire si elles eussent été abandonnées librement à un refroidissement graduel.

D'après cette manière de voir, l'état de trempe de l'acier est un état forcé, où les particules sont disposées autrement qu'elles ne le seraient si elles eussent été librement aban-

données au seul effet de leurs attractions mutuelles. Il ne faut donc pas s'étonner si la dureté, l'élasticité, et les autres propriétés physiques qui dépendent de l'arrangement des particules, en sont modifiées si fortement. Mais pourquoi la promptitude du refroidissement produit-elle ces effets sur l'acier, tandis qu'elle n'occasionne aucun changement sensible dans le fer pur, l'argent, l'or, l'étain, le cuivre et les autres métaux simples? Pourquoi cette même cause produit-elle des résultats inverses sur l'alliage qui sert à faire les *tamtams* et les cymbales, comme M. Darcet l'a observé, et comme je l'ai vérifié d'après lui? Car cet alliage, composé de 78 parties de cuivre et de 22 d'étain, devient cassant et non malléable, lorsqu'après l'avoir chauffé jusqu'au rouge, on le laisse refroidir lentement dans l'air; tandis qu'au contraire il devient flexible et malléable, quand après l'avoir ainsi chauffé, on le plonge subitement dans l'eau froide. Dans le premier cas, son grain est blanc et brillant comme celui de l'étain; dans le second, il est jaune, de la couleur du cuivre. La trempe et le recuit déterminent aussi dans le grain de l'acier des différences considérables. Il est difficile de ne pas soupçonner dans ces phénomènes un changement de combinaison entre les particules de nature différente, dont l'acier et l'alliage sont chacun composés. Néanmoins cette composition ne paraît pas être une condition essentielle pour que l'état d'agrégation d'une substance puisse être changé d'une manière durable. D'après une très-belle observation faite par M. Thénard, le fer et le cuivre, étant exposés à un courant de gaz ammoniac, à une température assez élevée pour les rendre rouges, y deviennent cassants et friables, sans rien absorber de sensible à la balance; et, en même temps, ils décomposent complètement ce gaz. Suivant une autre remarque du même chimiste, le phosphore pur, étant chauffé jusqu'à 60° centésimaux, et refroidi lentement dans l'air, est blanc et transparent; tandis que, si on le refroidit brusquement, en le jetant dans l'eau froide, il devient noir et opaque comme du charbon; et on peut le faire passer à volonté autant de fois qu'on veut, d'un de ces états à l'autre. Tous ces effets si variés, produits par le mode

de refroidissement, sont impossibles à prévoir *a priori*, et ne sauraient se découvrir que par l'expérience. Ce sont autant d'états d'équilibre possibles entre toutes les forces dont les particules des corps sont animées; mais ces forces sont trop nombreuses, et jusqu'ici trop imparfaitement connues, pour que l'on puisse calculer d'avance le résultat de leur composition, dans les diverses circonstances où l'on peut placer les corps.

Le verre étant trempé, comme l'acier, se durcit de même, et devient excessivement fragile. On peut l'éprouver, en laissant tomber dans l'eau froide de petites larmes de verre en fusion. Par l'effet de ce refroidissement subit, elles prennent un état d'agrégation nouveau; et, si on brise la pointe de l'espèce de voûte qu'elles forment, toutes les particules se séparent en une fine poussière. C'est ainsi que sont faites ces larmes bataviques dont les enfans s'amuse, et qui peuvent servir également aux méditations des physiciens. Les effets qu'elles produisent indiquent évidemment un état forcé des particules, et un mode d'agrégation déterminé, dépendant de la cause de refroidissement qui agit sur elles. Mais ce qui le prouve encore avec plus d'évidence, c'est qu'on leur ôte ces propriétés en les chauffant de nouveau jusqu'à rougir, et les laissant refroidir avec lenteur. Ces petites larmes peuvent encore servir à rendre sensible aux yeux le mode progressif de refroidissement qui a lieu en général dans l'opération de la trempe; car lorsqu'on les forme dans l'obscurité, on les voit rouges dans l'eau pendant un temps fort sensible; quoique leur surface extérieure, saisie la première par le contact du liquide, soit sans aucun doute refroidie instantanément fort au-dessous de la température qui peut leur donner cette couleur.

De la Balance de torsion.

Après avoir analysé avec un grand soin les effets de la torsion des fils métalliques, Coulomb en fait une application très-heureuse à la construction d'un instrument qui peut servir à mesurer en général toutes les petites forces. Cet instrument est essentiellement formé d'un fil métallique vertical,

dont le bout supérieur est attaché à un point fixe , et dont le bout inférieur , tendu par un petit poids , porte une aiguille horizontale. Quand on veut apprécier de très-petites forces , on les fait agir sur l'extrémité de cette aiguille , et l'on mesure leur intensité par l'angle dont elles l'écartent de son point de repos. En un mot , on *balance* ces forces par la torsion qu'éprouve le fil métallique , et c'est pour cela que Coulomb a donné le nom de *balance de torsion* à cet appareil.

Afin que l'agitation de l'air n'altère pas le mouvement de l'aiguille , elle est renfermée dans une cage cylindrique de verre , et le fil est aussi enfermé dans un cylindre de verre creux , au haut duquel on adapte un cadran divisé , qui peut tourner à frottement dur autour du cylindre. La pince qui retient le fil porte une aiguille horizontale qui marche sur ce cadran , et qui sert d'indicateur , quand on veut tordre le fil d'un nombre de degrés déterminé. Enfin une division circulaire appliquée horizontalement autour de la cage de verre , mesure la marche de l'aiguille : tout l'appareil est représenté *fig. 76*.

On donne au fil et à l'aiguille des longueurs et des grosseurs diverses , selon l'objet que l'on a en vue. Si l'on veut éprouver de très-petites forces , et donner une grande sensibilité à l'appareil , il faut employer des fils longs et fins ; car la force de torsion est inversement proportionnelle aux longueurs des fils , et directement proportionnelle aux quatrièmes puissances de leurs épaisseurs. Les longs fils ont encore cet avantage qu'on peut les tordre d'un plus grand nombre de degrés , sans que leur élasticité soit altérée. Il faut en outre employer les matières dont l'élasticité est la moins imparfaite. A cet égard , on peut consulter , dans le *Traité général* , les indications données par Coulomb.

La balance de torsion peut servir pour rendre sensible l'attraction générale que tous les corps de la nature exercent les uns sur les autres , proportionnellement à leur masse et réciproquement au carré de leur distance ; attraction qui , pour la masse de la terre , produit la pesanteur en vertu de laquelle tous les corps tendent vers son centre. Concevons en effet ,

que l'aiguille étant en repos, dans la position que l'état naturel du fil lui assigne, on place latéralement devant ses extrémités, et en sens opposés, deux sphères d'une matière quelconque. Si elles exercent réellement une attraction à distance sur les molécules de l'aiguille ainsi suspendue, et si elles sont à leur tour attirées par elle, l'aiguille doit se déranger de sa position primitive; et ses extrémités doivent se rapprocher des sphères qui l'attirent, jusqu'à ce que la force de torsion du fil, qui s'oppose à ce déplacement, soit devenue assez énergique pour faire équilibre à l'attraction. Même, à cet instant d'équilibre, l'aiguille marchera encore, non pas, à la vérité, en vertu de l'attraction seule, puisque la force de torsion l'emporte alors sur elle, mais en vertu de sa vitesse précédemment acquise. Elle s'avancera ainsi jusqu'à ce qu'enfin la force de torsion toujours croissante ayant détruit cette vitesse, commence à ramener l'aiguille vers son point de repos, le lui fasse même dépasser jusqu'à une certaine distance, d'où elle recommencera de nouveau à se mouvoir vers les sphères, et ainsi de suite, en faisant une série d'oscillations. On pourra encore rendre l'effet plus sensible en donnant au système mobile une forme telle que la plus grande partie de sa masse se trouve placée vers ses extrémités, ce qui se fera en employant une aiguille cylindrique terminée à ses bouts par deux grosses sphères. Cela aura en outre l'avantage de faciliter le calcul de l'expérience; car, dans la loi de l'attraction réciproque au carré des distances, on démontre qu'une sphère homogène attire un point extérieur, comme si toute sa masse était réunie à son centre en un point unique; et, quoique la masse de l'aiguille ne puisse jamais être rendue tout-à-fait nulle, on conçoit que, si elle est fort petite comparativement à la masse des sphères qui la terminent, elle n'aura sur les oscillations qu'une influence pareillement très-faible, dont il sera facile de tenir compte par le calcul. On pourra alors former, par les lois de la mécanique, l'expression de la force qui sollicite les deux sphères, lorsqu'elles oscillent avec la vitesse observée, en présence des corps attirans, que l'on peut aussi

prendre sphériques pour plus de simplicité. En comparant la durée de ces oscillations à celle d'un pendule vertical, que l'attraction du globe terrestre ferait seule mouvoir, on connaîtra le rapport de cette force à celle qu'exercent les sphères employées. De là on déduira le rapport des masses des sphères à la masse de la terre; et comme les volumes de ces corps sont aussi connus, on en tirera les rapports de leurs densités. Cavendish, qui a fait cette belle expérience, a trouvé ainsi que la densité moyenne de la terre est égale à 5,5, celle de l'eau étant 1.

Coulomb a aussi employé la balance de torsion pour mesurer les intensités des forces électriques et magnétiques, comme nous l'expliquerons plus loin. Il s'en est servi pour apprécier l'adhérence des liquides sur eux-mêmes, ou sur d'autres corps. Pour cela il y plongeait des disques plans, suspendus par leur centre dans une situation horizontale à l'aide de fils métalliques d'une force connue, et il comparait les vitesses des oscillations exécutées par ces disques dans les liquides et dans l'air.

CHAPITRE XXIII.

Du Frottement.

LORSQUE deux corps sont posés l'un sur l'autre par des faces planes, il naît de leur contact une force qui les retient ensemble avec une certaine énergie, et qui s'oppose à ce qu'ils puissent glisser librement sur les surfaces par lesquelles ils se touchent; cette force se nomme le *Frottement*.

Ce phénomène semble au premier coup d'œil devoir être produit par l'entrelacement des aspérités des deux corps; mais, en y réfléchissant, on trouve qu'il est difficile de l'attribuer à cette seule cause. Le frottement est à la vérité très-énergique pour les corps rudes, mais il existe même pour les corps les mieux polis, où il est difficile de croire que les aspérités se pénètrent. En outre on n'aperçoit pas qu'il se fasse, sur

ces corps, aucune destruction sensible des parties de leurs surfaces lorsqu'on les fait glisser les uns sur les autres, pendant un temps très-court; ce qui devrait pourtant arriver, du moins à ce qu'il semble, si leurs aspérités s'entre-déchiraient en se séparant. Au reste, le vrai moyen de décider cette question, si elle peut l'être, c'est d'étudier le frottement par l'expérience. On y parvient en choisissant, pour un des corps, un plan incliné auquel on puisse donner successivement plusieurs inclinaisons graduelles et mesurables par le moyen d'un mouvement circulaire divisé, *fig. 77*. On pose sur ce plan un des corps que l'on veut éprouver et auquel on a fait préalablement une face plane. Puis, on fait croître graduellement l'inclinaison, jusqu'à ce que le corps commence à glisser le long du plan incliné par le seul effort de la pesanteur. Il est évident qu'un instant avant que cela arrive, l'énergie du frottement est égale au poids du corps décomposé parallèlement au plan incliné, c'est-à-dire multiplié par le sinus de l'angle que ce plan fait avec l'horizon. On a donc ainsi une mesure du frottement exacte et comparable.

Par des expériences de ce genre on trouve les résultats suivants : toutes choses égales d'ailleurs, le frottement diminue à mesure que les surfaces sont mieux polies; il est plus grand entre des corps de même matière qu'entre des corps de matière différente. Il n'atteint pas son maximum d'énergie au moment du contact, mais après un certain temps, pendant lequel il s'accroît de plus en plus, jusqu'à une limite qu'il ne dépasse point. Enfin son énergie est proportionnelle à la pression, indépendamment de l'étendue des surfaces; de sorte, par exemple, qu'un polyèdre dont les faces sont également polies, éprouve une égale friction sur un même plan incliné, quelle que soit celle de ses faces par laquelle on l'y pose, la pression étant alors toujours égale au poids total du corps. Ceci semble bien contraire à l'idée d'une pénétration de parties. On observe aussi que le frottement est plus grand quand les mêmes parties d'un des corps parcourent successivement les diverses parties de l'autre, par exemple,

lorsqu'un solide à faces planes glisse sur un plan par une de ses faces, qu'il ne l'est lorsque les diverses parties du premier corps touchent successivement les diverses parties de l'autre, comme lorsqu'une bille roule sur le tapis d'un billard. On désigne le premier de ces frottemens par le nom de *frottement de la première espèce*, et l'autre s'appelle *frottement de la seconde espèce*. Celui-ci ne serait-il pas plus faible que l'autre, parce que les particules seraient moins de temps en contact?

LIVRE III.

De l'Acoustique.

CHAPITRE PREMIER.

De la production et de la propagation du Son.

Nous avons vu, dans les chapitres précédens, que les particules des corps élastiques, lorsqu'elles étaient écartées momentanément de leur position naturelle, y revenaient par une suite d'oscillations isochrones. Ces mouvemens se communiquant à l'air, qui est aussi un corps compressible et élastique, y produisent des condensations et des dilatations alternatives qui sont d'abord excitées dans les couches de ce fluide les plus voisines des corps agités, mais qui de là se propagent au loin dans toute la masse de l'air, de même que les ondes formées sur une eau tranquille par une pierre que l'on y jette se propagent circulairement tout autour du centre de l'ébranlement. Quand ces changemens alternatifs et périodiques de densité se succèdent avec une rapidité suffisante, ils excitent, dans l'organe de l'ouïe, la sensation de ce qu'on appelle un son; et la rapidité plus ou moins grande de leur succession forme toute la différence des tons aigus ou graves par lesquels les sons se distinguent les uns des autres. Conformément à la

marche que nous avons toujours suivie dans le cours de cet ouvrage, nous allons établir, d'une manière expérimentale, les différentes propriétés que nous venons d'énoncer, quoiqu'à dire vrai, la plupart d'entre elles soient déjà des conséquences nécessaires de ce que nous avons trouvé, par l'expérience, sur les vibrations des corps élastiques et sur la nature physique de l'air.

D'abord, il est bien facile de prouver qu'en effet les corps solides, lorsqu'ils sont ébranlés de manière à produire un son distinct, vibrent avec beaucoup de rapidité ; car si on les touche alors légèrement avec le doigt ou avec le tranchant d'une petite lame métallique, on sent très-distinctement une multitude de pulsations ou de battemens qui se succèdent avec une extrême vitesse. Par exemple, on peut faire aisément cette épreuve sur une cloche que l'on vient de frapper, ou sur une corde métallique tendue que l'on a pincée de manière à produire un son.

Pour prouver que le son est réellement l'effet de ces vibrations portées à un certain degré de rapidité, il n'y a qu'à les rendre d'abord très-lentes, comme on peut le faire en tendant la corde par un poids très-faible ; on pourra alors compter ses excursions, mais elle ne produira pas de son sensible. Pour qu'elle en produise, il faudra augmenter successivement le poids qui la tend ; et, plus il sera fort, la longueur de la corde restant la même, plus les sons seront aigus : en même temps le nombre des vibrations de la corde s'accroîtra au point qu'elles ne pourront plus être suivies par l'œil. Mais le calcul y suppléera ; car il détermine cette rapidité quand on connaît la longueur de la corde, son poids, et le poids qui la tend. On trouve ainsi que les sons rendus par la corde cessent d'être distinctement appréciables, même par l'oreille la plus délicate, lorsqu'elle exécute moins de 32 vibrations par seconde, auquel cas elle fait entendre le même son qu'un tuyau d'orgue ouvert à son extrémité, et de la longueur de 32 pieds. Cette limite des sons appréciables, c'est-à-dire susceptibles d'être musicalement comparés les uns aux autres,

n'est au reste qu'une indication approchée qui n'est point susceptible de rigueur.

Après avoir ainsi prouvé que le son est excité par les vibrations rapides des corps élastiques, il faut prouver que sa transmission se fait par le moyen de l'air, du moins lorsqu'il n'y a que ce fluide entre le corps sonore et l'organe de l'ouïe. Or, cela est très-facile : il suffit de suspendre une petite cloche dans un ballon de verre, et d'essayer si on l'entend encore quand on l'agite après avoir fait le vide. Mais, pour que l'expérience soit rigoureuse, il faut suspendre la cloche à l'aide de quelque substance molle qui ne transmette pas son mouvement vibratoire au ballon lui-même, ou au moins qui ne le transmette que très-amorti. Rien n'est meilleur pour cet usage que la réunion de quelques brins de chanvre non tordus. Tant que le ballon est rempli d'air, si on le secoue, on entend le son de la cloche ; mais si on ôte l'air, au moyen de la machine pneumatique, et qu'on dévisse ensuite le ballon, on a beau le secouer et faire vibrer la cloche, on n'entend plus rien ; au lieu que le son renaît dès qu'on laisse rentrer un peu d'air : il est d'abord très-faible, et augmente progressivement d'intensité à mesure que l'air rentre. Tous les autres fluides élastiques peuvent servir à propager le son aussi bien que l'air, comme on peut s'en assurer en les introduisant tour à tour dans le ballon après y avoir fait le vide. Les vapeurs mêmes, d'eau, d'éther, d'alcool, transmettent le son, comme je m'en suis assuré en introduisant dans le ballon les liquides propres à les produire ; ce qui se faisait aisément par le moyen d'un double robinet adapté au ballon, comme la *fig. 1^{re}*. le représente. C'est pourquoi lorsqu'on veut prouver avec rigueur que le son ne se produit point dans le vide, il faut fixer préalablement dans le ballon quelques morceaux de potasse caustique, afin d'absorber les vapeurs aqueuses qui pourraient y rester, et qui transmettraient encore le son d'une manière perceptible, quoique très-faible, à cause de leur peu de densité.

Les fluides élastiques ne sont pas les seuls corps qui trans-

mettent le son; il se propage aussi par le moyen des corps liquides. Car si l'on choque deux pierres ensemble sous l'eau, dans un étang, on entend le bruit de ce choc, même à de grandes distances, lorsqu'on a la tête plongée dans l'eau. Du moins, Franklin assure avoir ainsi entendu le son, sous l'eau, à la distance d'un demi-mille.

Enfin le son se transmet ainsi à travers les corps solides. Le mineur, en creusant sa galerie, entend les coups du mineur qu'on lui oppose, et juge ainsi de sa direction. Si l'on se place à l'une des extrémités d'une longue file de tuyaux métalliques, comme on peut le faire dans les aqueducs, on entend très-distinctement les coups de marteau frappés à l'autre extrémité, et même on entend ainsi distinctement deux sons, l'un plus rapide, transmis par le métal, l'autre plus lent, transmis par l'air. Nous comparerons plus loin les vitesses de ces deux sortes de propagations.

Maintenant il nous faut considérer de plus près comment les ébranlemens, produits par les vibrations des corps sonores dans les molécules d'air qui les avoisinent, peuvent être propagés de là progressivement jusqu'à l'organe de l'ouïe; et, puisque la continuité des vibrations ne fait autre chose que rendre cette transmission continuelle et durable, on voit que, pour considérer le phénomène dans sa plus grande simplicité, il faut examiner d'abord comment se propage un ébranlement instantané; par exemple, l'explosion subite d'un canon ou d'un pistolet.

Pour fixer les idées, supposons que l'explosion se fasse dans une masse sphérique d'air. Au moment où elle aura lieu, les molécules comprises dans cette sphère seront chassées et poussées fortement sur celles qui les avoisinent. Mais celles-ci leur opposant une résistance qu'il faut vaincre, il s'ensuit que les premières se compriment en même temps qu'elles se déplacent. Celles qui les environnent, cédant en partie à leur effort, se déplacent aussi et se compriment, mais dans une proportion moindre, jusqu'à ce qu'enfin la compression et le mouvement deviennent insensibles à une certaine distance du centre de l'explosion. Voilà ce qui a

lieu au premier instant ; mais la cause de l'explosion ayant cessé , les molécules qui avaient été comprimées se dilatent en tous sens par l'effet de leur élasticité naturelle , et repoussent de toutes parts les obstacles qui s'opposent à ce mouvement. Elles repoussent donc aussi les molécules voisines , qui n'avaient pas été ébranlées dans le premier instant , et les compriment à leur tour. L'effet devient alors le même pour celles-ci , qu'il avait été d'abord pour les premières ; et , par ces condensations et dilatations alternatives , l'ondulation se propage successivement dans toute l'étendue de la masse d'air , comme un choc instantané à travers une file de billes élastiques en contact les unes avec les autres.

Pour déterminer avec exactitude les diverses particularités de cette propagation , il faut exciter , en un point de l'atmosphère , une explosion subite , et mesurer les intervalles de temps après lesquels le bruit en parvient à diverses distances dans une même couche horizontale. Cela sera facile si l'explosion produit en même temps une lumière qui soit visible du lieu où l'observateur est placé ; car la transmission de la sensation que les corps lumineux excitent dans nos organes est si rapide , que , dans toutes les distances où nous pouvons opérer sur la terre , elle paraît absolument instantanée. Ainsi , l'instant physique où nous verrons la lumière , pourra être pris pour celui auquel l'explosion a eu lieu. Il ne restera plus qu'à mesurer , avec une montre à secondes , l'intervalle de temps écoulé entre l'apparition de la lumière et le moment où l'on entend le son.

C'est ainsi qu'en 1738 , les membres de l'Académie des sciences déterminèrent la vitesse de la propagation du son , entre Montlhéry et Montmartre , sur une longueur d'environ 29000^m. Le signal se faisait par des coups de canon. Ils trouvèrent ainsi que la vitesse de propagation était uniforme. La valeur absolue de cette vitesse , conclue d'un grand nombre d'expériences , se trouva de 337^m,18 par seconde. Elle était sensiblement la même , soit que le temps fût couvert ou serein , clair ou brumeux , pourvu que l'air fût tranquille. Mais , s'il était agité par le vent , la vitesse du vent ,

décomposée suivant la direction de la ligne sonore, augmentait ou diminuait de toute sa valeur la vitesse de propagation du son, selon qu'elle lui était ou favorable ou contraire.

D'après cette analyse physique du phénomène, on voit que le mouvement et les condensations qui existent à chaque instant dans la masse d'air, ne sont réellement que la répercussion du mouvement et des condensations imprimées aux premières particules sur lesquelles l'explosion a agi directement; et comme, dans un air libre, à mesure que l'ondulation s'étend, elle se communique à-la-fois à un plus grand nombre de particules, il faut qu'alors les agitations et les changemens momentanés de densité aillent toujours en s'affaiblissant à mesure que l'on s'éloigne du centre de l'explosion. C'est aussi ce que l'on observe dans l'atmosphère; car le son paraît d'autant plus faible qu'on est plus éloigné du lieu où il s'est produit. Mais si la masse d'air, dans laquelle le mouvement se propage, était cylindrique, on ne voit pas que la force du son dût s'affaiblir avec la distance, si ce n'est peut-être par le frottement de l'air contre les parois des tuyaux. C'est aussi ce que j'ai éprouvé, par expérience, dans les tuyaux des aqueducs de Paris, sur une colonne d'air cylindrique de 951 mètres de longueur. La voix la plus basse était entendue à cette distance, de manière à distinguer parfaitement les paroles, et à établir une conversation suivie. Je voulus déterminer le ton auquel la voix cessait d'être sensible, je ne pus y parvenir. Les mots dits aussi bas que quand on parle à l'oreille, étaient reçus et appréciés; de sorte que, pour ne pas s'entendre, il n'y aurait eu absolument qu'un moyen, celui de ne pas parler du tout. Entre une demande et une réponse faite de cette manière, il s'écoulait 5'',58 sex.; c'était donc là le temps que le son mettait à parcourir deux fois la longueur de la colonne d'air, c'est-à-dire 1902 mètres. Pour savoir si les sons graves ou aigus, forts ou faibles, se propageaient avec une égale vitesse, ou s'il y avait entre eux, sous ce rapport, quelque différence, je fis jouer des airs de flûte à une des extrémités du tuyau. On sait qu'en général un chant musical est assu-

jetti à une certaine mesure qui règle très-exactement l'intervalle des sons successifs. Par conséquent si quelques-uns des sons s'étaient propagés plus rapidement ou plus lentement que les autres, lorsqu'ils seraient parvenus à mon oreille, ils se seraient trouvés confondus avec ceux qui les précédaient ou qui les suivaient dans l'ordre du chant, et le chant ainsi entendu aurait paru tout-à-fait altéré. Au lieu de cela, il était parfaitement régulier, et conforme à sa mesure naturelle; d'où il résulte que tous les sons se propagent avec une vitesse égale. Cette remarque avait déjà été faite en 1758 par les membres de l'Académie des sciences; j'ignore au moyen de quel procédé. Pour faire avec succès les expériences que je viens de rapporter, il est absolument nécessaire de choisir les instans de la nuit les plus calmes, comme de une heure à deux heures du matin. Dans le jour, mille bruits confus agitant l'air extérieur, font résonner les tuyaux, et empêchent de distinguer, ou même détruisent les faibles ébranlemens produits par une voix basse à l'extrémité de la colonne d'air. Aussi, dans ces circonstances, les cris les plus forts ne sont quelquefois pas entendus.

Enfin, on peut aisément rendre sensible dans les tuyaux le double effet des vitesses et des condensations transmises en même temps aux particules d'air, à mesure que l'ondulation sonore les atteint. Dans la colonne cylindrique sur laquelle je faisais mes expériences, des coups de pistolet tirés à une des extrémités, occasionnaient encore à l'autre une explosion considérable, lorsque l'ébranlement y arrivait. L'air était chassé du dernier tuyau avec assez de force pour produire sur la main un vent impétueux, pour lancer à plus d'un demi-mètre de distance des corps légers que l'on plaçait sur sa direction, et pour éteindre des bougies allumées, quoique l'on fût à 951 mètres de distance du lieu où le coup était parti deux secondes et demie auparavant.

Tous ces phénomènes étant de simples conséquences des propriétés physiques de l'air, on conçoit qu'ils doivent pouvoir se calculer et se prédire rigoureusement d'après les lois de la mécanique. C'est aussi ce qui a lieu. Pour les en dé-

duire, il faut d'abord définir le milieu où ils se produisent. On conçoit donc un fluide aériforme homogène, d'une densité et d'une température constantes, dont la force de ressort est connue et mesurée par la pression d'une colonne de mercure d'une hauteur déterminée. Puis on suppose qu'une petite portion de ce fluide, pour ainsi dire une seule particule, soit subitement ébranlée d'une manière quelconque, par exemple, soit poussée, pressée, ou dilatée, ou reçoive à-la-fois toutes ces modifications, et l'on demande au calcul comment cet ébranlement doit se répandre dans toute la masse. On trouve ainsi qu'il s'y propage successivement, c'est-à-dire qu'il n'atteint chaque particule éloignée qu'à une époque déterminée selon sa distance, qu'il l'agite un instant, et l'abandonne ensuite à son état primitif de repos. La vitesse de cette propagation est uniforme. Son expression analytique montre que son carré est proportionnel à la force de ressort du milieu fluide, et réciproque à sa densité; d'où il suit que, pour un même gaz, elle est constante, quelque compression ou quelque dilatation qu'on lui fasse subir, pourvu que sa température ne change pas; car, d'après la loi de Mariotte, le ressort d'un gaz, qui ne s'échauffe ni ne se refroidit, varie proportionnellement à la densité qu'on lui donne. Par cette raison la vitesse du son, dans une couche horizontale de l'atmosphère, serait la même à toute hauteur, si la température n'allait pas en diminuant à mesure qu'on s'élève; mais le refroidissement des régions supérieures fait que le son s'y propage plus lentement. Son intensité y est aussi plus faible pour un ébranlement égal, parce que le nombre des molécules ébranlées est moindre dans un même rayon. On conçoit de même qu'un bruit excité dans les hautes régions de l'atmosphère doit s'affaiblir et s'éteindre en se propageant vers les couches inférieures, plus rapidement que dans la transmission horizontale, parce que ces couches étant plus denses, le mouvement primitif s'y répartit entre un plus grand nombre de particules, au lieu que l'affaiblissement doit être moindre à distances égales, si le son primitivement excité dans les parties inférieures de l'atmosphère se propage dans les hautes régions.

D'après ces calculs, la vitesse absolue du son dans l'air atmosphérique à la température de la glace fondante, devrait lui faire parcourir par seconde $279^m,29$; et, à la température de six degrés où les académiciens français ont fait leurs expériences, elle devrait être $282^m,42$. L'observation a donné $537^m,18$, résultat plus fort de $\frac{1}{6}$. Cette différence, comme l'a remarqué M. Laplace, vient de ce que, dans le calcul de l'élasticité de l'air, on ne tient pas compte de la chaleur qui se dégage et qui s'absorbe dans les contractions et les dilatations successives par lesquelles le son est produit. Ces variations, quoique momentanées, produisent des alternatives correspondantes dans la température des molécules d'air ébranlées, et il en résulte que leur ressort varie plus rapidement que ne le supposerait la loi de Mariotte pour une température constante. On conçoit donc que cette cause doit accélérer la vitesse du son conformément à l'expérience; et, en la soumettant au calcul, on en déduit la véritable vitesse en fonction de l'élévation de température qu'une masse d'air peut se communiquer à elle-même par le dégagement de sa propre chaleur, quand elle est subitement comprimée dans un rapport connu. Malheureusement cet élément paraît bien difficile à déterminer avec exactitude par expérience, à cause de la proportion énorme de chaleur qu'absorbent les vases dans lesquels nous sommes obligés d'enfermer l'air pour agir sur lui. C'est pourquoi on renverse le problème; et, partant de la vitesse du son déterminée par expérience, on en déduit la quantité de chaleur dégagée. On trouve ainsi qu'une masse d'air, comprimée de $\frac{1}{116}$ de son volume, peut élever sa propre température de 1° centésimal.

La réalité de cette explication peut se prouver par une remarque décisive; c'est que le son se produit et se transmet dans les vapeurs aussi bien que dans les gaz permanens. Or, d'après la constitution des vapeurs, cela ne saurait absolument avoir lieu, si les condensations périodiquement produites par les vibrations du corps sonore, n'y déterminaient des dégagemens instantanés de chaleur capables de maintenir l'élasticité du fluide, en élevant sa température, puisque,

sans cela, les parties comprimées par ces excursions ne feraient que céder à la force comprimante, et se condenseraient en liquide, sans propager l'ébranlement à d'autres particules plus éloignées; ce qui est précisément le mode essentiel par lequel le son est formé et transmis.

Jusqu'ici nous n'avons considéré qu'un seul centre d'ébranlement primitif réduit à un point mathématique: mais, s'il y en a plusieurs, ce qui est le cas le plus ordinaire, il faudra considérer chacun d'eux comme le centre d'une ondulation qui se répandra sphériquement dans l'espace; et, si les vitesses et les variations de densité initiales imprimées aux particules aériennes sont toutes fort petites, comme on le suppose pour simplifier le calcul du phénomène, les molécules éloignées de l'espace où naissent les agitations primitives, auront un mouvement composé qui sera la résultante totale des agitations émanées des centres partiels. La durée de ce mouvement dépendra du temps que les agitations emploieront à se succéder selon la distance des points d'où elles partent; et son intensité dépendra de l'accord ou de l'opposition plus ou moins grande qui existera entre elles au moment de leur concours en chaque point de l'espace. Par exemple, isolant par la pensée une masse d'air d'une forme et d'une étendue quelconque, concevons qu'on imprime primitivement à chacune de ses particules des vitesses et des densités arbitraires, puis qu'on les abandonne subitement à leur propre ressort; cette masse, en revenant sur elle-même pour reprendre l'égalité de pression qui convient à son équilibre, exercera dans l'atmosphère environnant des ondulations dont la direction et l'intensité en chaque point dépendront de l'état qu'on lui aura primitivement donné. Cet état pourra être tel que les ondulations propagées soient beaucoup plus intenses dans un sens que dans un autre, ou même qu'elles s'exercent seulement dans un sens, et soient nulles dans le sens opposé. Mais, par une propriété remarquable que l'analyse démontre, et qui a été découverte par Euler, quelles que soient les intensités de ces ondulations propagées, chacune d'elles, une fois formée, ne peut se transmettre que dans un seul sens, sans s'étendre sphériquement

comme l'agitation primitive, ni pouvoir jamais revenir en arrière; et en effet, lorsque le son se propage dans une étendue libre où il ne rencontre pas d'obstacle capable de le réfléchir en arrière, on observe qu'après avoir frappé l'oreille pendant un intervalle de temps plus ou moins sensible, il cesse et ne revient plus.

Jusqu'ici nous avons considéré la transmission du son dans une masse d'air homogène et indéfinie. Supposons maintenant cette masse terminée par une surface de position fixe; alors il faudra concevoir que les molécules d'air, immédiatement adjacentes à cette surface, ne s'en séparent point; car, si elles s'en détachaient, il se produirait un vide sur la surface, et les molécules d'air qui l'auraient un instant quittée seraient aussitôt forcées d'y revenir. Elles ne pourront donc que glisser dans le sens du plan tangent. En outre, jusqu'à ce que l'ondulation sonore soit parvenue à la surface fixe, elle doit se propager comme dans l'air libre, puisque, pendant tout ce trajet, la densité de l'air est la même que si l'obstacle n'existait pas. Ces conditions, introduites dans les formules analytiques, montrent, lorsqu'on sait y satisfaire, comment l'ondulation sonore doit se continuer. On prouve de cette manière qu'à la rencontre d'une surface plane le son doit se réfléchir comme la lumière, en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence; et, si l'on suppose que l'ondulation directe émane d'un seul point ébranlé, la marche et l'intensité de l'ondulation réfléchie seront aussi les mêmes que si elle émanait d'un seul point situé à la même distance de l'autre côté du plan réflecteur. Ces résultats expliquent le phénomène de l'écho. Si la surface de l'obstacle est un ellipsoïde, et que le centre de l'ondulation directe soit placé à un des foyers, le son se réfléchira par une autre onde sphérique, dont le centre sera à l'autre foyer; et son intensité croîtra, après la réflexion, à mesure que l'onde ainsi formée se concentrera et convergera vers ce point. Tels sont, jusqu'à présent, les seuls cas de réflexion du son que l'on ait su tirer de la théorie, en ayant égard aux trois dimensions de la masse d'air.

En remplissant un même ballon successivement avec diffé-

rens fluides aériformes, ou même avec des vapeurs, on peut estimer l'intensité relative du son qui s'y produit, d'après la distance à laquelle il est entendu; mais il faut alors employer, dans l'intérieur du ballon, un corps sonore dont les vibrations se fassent toujours avec une force égale, tel que serait, par exemple, un petit timbre d'horlogerie. En opérant de cette manière, on trouve que l'intensité du son croît avec la densité du fluide aériforme que le ballon renferme.

La vitesse de la transmission du son à travers les corps solides se calcule, comme à travers l'air, d'après la réaction élastique du milieu. M. Lagrange en a donné la formule pour le cas de la propagation suivant une fibre solide; et M. Laplace a calculé la réaction d'une pareille fibre, d'après l'allongement ou le raccourcissement qu'elle éprouve lorsqu'elle est tirée ou contractée par une force connue. Il a trouvé ainsi qu'en appelant 1 la vitesse de transmission du son dans l'air, cette vitesse devenait dans le laiton $10\frac{1}{2}$, dans l'eau de pluie $4\frac{1}{2}$, dans l'eau de mer $4\frac{7}{10}$, toutes beaucoup plus rapides que dans l'air. Ces résultats peuvent se vérifier par un genre d'expériences que nous expliquerons bientôt. On peut aussi les confirmer d'une manière immédiate en observant la transmission du son dans de longues colonnes de chaque substance. J'ai fait moi-même des observations de ce genre sur un assemblage de 376 tuyaux de fonte qui formait une longueur de 951 mètres $\frac{1}{4}$. On adaptait à l'un des orifices de ce canal un anneau de fer de même diamètre que lui, au centre duquel étaient fixés, par des tiges de même métal, un timbre, et un marteau d'horlogerie, porté par un bras à ressort, qui permettait de le lancer à volonté contre le timbre. Alors le choc du marteau sur le timbre se transmettait au tuyau par l'intermédiaire des tiges et de l'anneau de fer. Ainsi, en se plaçant à l'autre extrémité de la ligne, on devait entendre deux sons, l'un transmis par le métal du tuyau, l'autre par l'air. En effet, on les entendait fort distinctement en appliquant l'oreille contre les tuyaux, et même sans l'y appliquer. Le premier son, plus rapide, était transmis par le corps des tuyaux; le second, par l'air. Des coups de marteau frappés

directement sur le dernier tuyau produisaient aussi cette double transmission. On observait soigneusement, avec des chronomètres à demi-secondes, l'intervalle de deux sons transmis. J'ai trouvé par ces expériences que le son se transmettait 10 fois $\frac{1}{2}$ aussi vite par le métal que par l'air.

CHAPITRE II.

De la perception et de la comparaison des Sons continués.

MAINTENANT que nous savons comment une agitation subite, produite dans quelques points d'un fluide élastique, se propage à toute sa masse, il nous sera bien facile de comprendre comment les vibrations des corps peuvent être transmises par l'air jusqu'à l'organe de l'ouïe, et y fait entendre un son continu. Car, à mesure que les particules d'un corps vibrant vont et reviennent dans leurs excursions alternatives, elles agissent mécaniquement sur les molécules d'air qui les environnent; et si, en allant, elles les poussent et les compriment, en revenant elles leur ouvrent un vide où elles peuvent se dilater. C'est pourquoi les particules d'air contiguës au corps sonore iront aussi, et reviendront tour à tour, comme lui, par des vibrations pareilles; elles agiteront donc à leur tour les molécules d'air qui les avoisinent, celles-ci en agiteront d'autres, et ainsi de suite à l'infini.

Pour nous faire une idée nette de cette transmission, considérons-la d'abord dans une colonne d'air cylindrique, de densité uniforme et isolée de toutes parts, telle que AO , *fig. 2*. Supposons que le corps sonore soit une surface plane qui vibre perpendiculairement à cette colonne, en sorte que CC , $C'C'$, représentent les limites de ses excursions; et désignons par T le temps très-court qu'elle met à passer d'une de ces positions à l'autre. Pour ramener l'effet de ces vibrations à celui des ébranlemens instantanés, que nous avons traités d'abord, divisons par la pensée leur étendue totale AA' en une infinité de petites lames d'air que nous supposerons être

ébranlées les unes après les autres, mais chacune pendant un instant infiniment petit. Alors, la surface vibrante partant du point A , le premier ébranlement sera produit en A ; et, si elle s'arrêtait tout court après ce premier choc, il en résulterait une onde sonore infiniment petite, qui se propagerait dans toute la masse d'air avec la vitesse ordinaire du son. En outre, à cause de la petitesse de la lame d'air primitivement soumise à l'impulsion du corps sonore, l'ébranlement propagé ne durerait, en chaque point, qu'un instant infiniment petit. Maintenant, avant de transporter la surface vibrante à une seconde lame d'air, il faut admettre, ce qui sera prouvé dans peu par l'expérience, que, dans tous les sons appréciables par l'organe de l'ouïe, la vitesse absolue du corps sonore est toujours très-petite comparativement à la vitesse de transmission du son. D'après cela, quand la surface vibrante atteindra la seconde lame d'air, l'agitation excitée en elle par la première onde sonore sera déjà passée, et elle se trouvera revenue à l'état de repos. La surface l'ébranlera donc par son choc, comme elle avait ébranlé la première lame, ce qui produira une seconde ondulation qui se propagera dans toute la ligne d'air, à la suite de la première. Enfin, lorsqu'après le temps total T , la surface vibrante sera arrivée en A' , limite de son excursion dans ce sens, la dernière ondulation partira de ce point. Il se développera ainsi dans la ligne d'air une série continue d'ondulations de même nature, qui courront à la suite les unes des autres, et par conséquent il se trouvera à chaque instant sur cette ligne une suite de points consécutifs qui seront simultanément agités. L'ensemble de ces points formera l'onde sonore, laquelle sera constamment comprise entre les ondulations extrêmes parties de A et de A' . Si l'intervalle AA' était nul, les ondulations extrêmes auraient le même point de départ; alors la longueur totale de l'onde serait égale à l'avance qu'a pu prendre l'ondulation qui est partie la première, c'est-à-dire à l'espace que cette ondulation a dû parcourir pendant le temps T , dont son départ a précédé le départ de la dernière. Mais le point A' d'où celle-ci émane, étant plus avancé sur leur route commune, cette différence de position compense en partie son retard, et fait

que l'on doit retrancher l'intervalle AA' de la longueur totale de l'onde ainsi calculée. Dans tous les sons réguliers et appréciables à nos organes, l'intervalle AA' compris entre les excursions du corps sonore forme une si petite portion de la longueur totale de l'onde que l'on peut le négliger. Alors la première partie est la seule dont il faille tenir compte, c'est-à-dire que, pour ce cas, le seul qui nous intéresse, *la longueur des ondes sonores est sensiblement égale à l'espace que le son peut parcourir pendant le temps T que durent les excursions du corps vibrant, par lequel le son est produit.*

D'après cela, si le corps faisait une vibration par seconde, la température étant supposée celle de la glace fondante, l'onde sonore qui en résulterait aurait une longueur égale à $333^m,44$ ou $1026^p,4$, qui est l'espace que le son parcourt, dans cette circonstance, en une seconde de temps; et, pour toute autre durée supposée de vibration, la longueur de l'onde varierait proportionnellement à cette durée. De là nous déduirons le tableau suivant, qui nous sera fréquemment utile.

Nombre des vibrations infinitement petites du corps sonore en une seconde de temps.	Longueur des ondes sonores qui en résultent (1).	
	1	1024 pieds.
	2	512
	4	256
Commencement des sons appréciables à l'oreille.	32	32
	64	16
	128	8
	256	4
	512	2
	1024	1
	2048	6 pouces
	4096	3 pouces.
Fin des sons appréciables.	8192	18 lignes.

Les sons compris entre les limites que l'accolade embrasse sont les mêmes que rendrait un tuyau d'orgue ouvert à ses deux bouts, et dont la longueur serait égale à celle de l'ondulation aérienne.

Nous verrons par la suite que l'expérience confirme ces résultats de la manière la plus exacte.

(1) Je donne ici ces mesures en pieds, parce que leur principale application a pour objet les tuyaux d'orgue, dont les longueurs ont été, jusqu'à présent, calculées en pieds, pouces et lignes anciens. Pour éviter les fractions, j'ai pris la vitesse du son par seconde égale à 1024 pieds, au lieu de 1026, parce que 1024 étant une puissance exacte de 2, se prête, sans reste, à la division soudouble.

Nous n'avons encore considéré qu'une seule des vibrations du corps sonore, de A en A'. Quand il reviendra de A' en A, il excitera une autre série d'ondulations comprise entre les mêmes limites de durée et d'amplitude que la précédente, et dont l'ensemble formera ainsi une onde totale qui aura encore la même longueur. Celle-ci suivra immédiatement la première, comme se suivent les mouvemens du corps sonore qui les excite. Mais, si l'une a poussé les particules d'air dans le sens AA', en les condensant, la seconde les attirera dans le sens A'A, en les raréfiant; de sorte que, si leur densité initiale D est devenue successivement $D, D + d, D$, par l'effet de la première onde, elle deviendra $D, D - d, D$, par l'effet de la deuxième. Toutes les particules aériennes successivement ébranlées éprouveront graduellement ces états divers; et, dans le passage d'une onde à la suivante, elles se retrouveront toujours revenues au repos et à leur état initial de densité. Car les positions CC, C'C', étant supposées les limites des vibrations naturelles du corps sonore, limites fixées par la seule élasticité de ses parties, son mouvement ne peut pas y cesser brusquement; mais il doit devenir graduellement insensible à mesure qu'il s'en approche; de sorte que les dernières impulsions qu'il produit alors sur l'air sont très-faibles, et finissent par être nulles; ce qui permet aux molécules ébranlées de revenir graduellement à leur premier état de densité et d'équilibre avant que l'onde opposée commence à agir sensiblement sur elles. Ces alternatives périodiques de mouvement se reproduiront ainsi sans interruption aussi long-temps que le corps sonore qui les excite continuera à vibrer à l'origine de la ligne d'air; de sorte qu'après un nombre n de ses vibrations, il y aura sur cette ligne d'air un nombre n d'ondes égales, mais de nature alternativement contraire, c'est-à-dire alternativement condensantes et raréfiantes, lesquelles courront à la suite les unes des autres, *fig. 3*, et occuperont ensemble une longueur totale égale à leur somme. Si donc il existe sur la ligne d'air un organe propre à être ébranlé par ces ondulations, l'observateur qui en sera doué aura la sen-

sation du son produit par le corps sonore. La périodicité des ondes, leur durée, leur force, la loi progressive suivant laquelle chacune d'elles fait varier la densité des particules aériennes, seront autant de caractères sensibles, à l'aide desquels l'organe pourra distinguer les différens sons, et y reconnaître des qualités diverses. Nous avons déjà remarqué que *l'acuité* plus ou moins grande du son est liée avec la rapidité des vibrations; elle sera donc indiquée à l'organe par la rapidité avec laquelle les ondes alternatives se succèdent. Quant à *l'intensité*, elle dépendra de l'étendue des excursions des particules aériennes successivement agitées, de l'énergie des condensations et des dilatations passagères que chaque onde produira en elles; enfin du nombre plus ou moins grand de particules qui éprouveront ces effets et les transmettront simultanément à l'organe auditif.

D'après ces considérations, on conçoit que le commencement et la fin des ondes sonores doivent produire peu d'impression sur l'organe, puisqu'alors les déplacements des particules et leurs variations de densité sont très-faibles. Néanmoins, comme les sensations durent et subsistent toujours un certain temps, même après que la cause qui les produisait a cessé, il doit arriver et il arrive en effet, quand les vibrations sont fort rapides, que l'impression causée par le milieu des ondes sonores couvre la faiblesse de leurs extrémités; de sorte qu'il en résulte une sensation qui devient continue, par la seule périodicité de la cause qui l'excite. C'est ce qui a lieu dans tous les sons que la musique emploie. Mais, si la succession des vibrations devient assez lente pour que l'oreille puisse y saisir des périodes d'intensité, et distinguer leurs intervalles, on doit, au lieu d'un son continu, entendre une suite de bruits ou de battemens périodiquement réglés. C'est aussi ce que l'expérience confirme, et nous en aurons bientôt des preuves multipliées.

CHAPITRE III.

Vibrations des Cordes élastiques.

MAINTENANT que nous avons analysé les circonstances physiques dont l'ensemble caractérise chaque son, il faut, à l'aide de quelque procédé mécanique régulier et constant, produire une série continue et indéfinie de sons, pour chacun desquels nous puissions connaître à chaque instant le nombre de vibrations qui s'exécute par seconde. Car alors, un son quelconque étant entendu, si nous le rapportons, dans la série, à son *unisson*, c'est-à-dire, à celui qui donne exactement la même sensation d'aigu ou de grave, nous saurons, par cela même, avec le degré de justesse que peut avoir l'oreille, quel est le nombre de vibrations par seconde nécessaire pour le produire; et il se trouvera conséquemment défini par ce nombre. Or, quoique cette comparaison s'opère ainsi à l'aide d'une simple sensation, l'expérience prouve que, lorsque l'oreille est exercée, elle se fait avec une exactitude qui ne laisse absolument rien à désirer. Parmi les divers corps dont les vibrations peuvent ainsi nous fournir un type de sons universellement comparable, il n'en est point de plus commode que les cordes élastiques tendues fortement, principalement lorsqu'elles consistent en un simple fil de métal tiré à la filière. La forme exactement cylindrique d'un pareil fil, son homogénéité, l'égalité élasticité de toutes ses parties, enfin la facilité qu'on a pour le reproduire exactement le même, quand on connaît sa grosseur et la nature de sa substance, sont autant de qualités qui le rendent éminemment propre à des expériences toujours comparables. Pour en tirer des vibrations sonores, il faut le tendre fortement entre deux points fixes comme les cordes des instrumens de musique, ou l'attacher fixement par un seul bout et le tendre verticalement par un poids, comme le représente la *fig. 4*; ou bien encore on peut le diriger horizontalement, en le faisant passer sur une poulie placée à la hauteur du point fixe, comme le représente la *fig. 5*.

Dans ces deux derniers cas, pour isoler la portion du fil que l'on veut faire vibrer, il faut, après l'avoir tendu, limiter sa longueur en le serrant par des pinces, ou l'arrêtant par des *chevalets*, qui empêchent les points extrêmes de se déplacer pendant le mouvement. Les appareils de ce genre sont appelés *monocordes* ou *sonomètres*. Le sonomètre vertical, *fig. 4*, est beaucoup plus exact et plus parfait que l'horizontal, parce que, dans ce dernier, la tension que le poids devrait produire est toujours modifiée plus ou moins par le frottement que la poulie éprouve autour de son axe, frottement d'autant plus rude qu'elle se trouve pressée sur cet axe par l'action du poids; et cela fait qu'avec le même poids, appliqué au même fil, on n'a pas toujours la même tension. Par ce motif il faut employer le sonomètre vertical pour les recherches précises, et réserver l'autre pour un petit nombre d'expériences où l'horizontalité est nécessaire, comme on le verra plus tard. Enfin, comme les sons d'une simple corde, isolée de tout autre corps, seraient très-faibles et s'éteindraient en un moment, on a soin, dans la pratique, de fixer les points d'attache sur une caisse vide dont les parois sont faites de planchettes de bois, sèches, élastiques et minces, comme celles qui forment *la caisse* des violons, des basses et des autres instrumens à cordes. L'expérience prouve que ces planches, partageant le mouvement vibratoire de la corde, résonnent comme elles et renforcent le son qu'elle produit. Nous essaierons plus loin d'étudier comment s'opère cette correspondance de mouvemens. Pour le moment nous l'emploierons comme un fait. Lorsqu'une corde métallique ainsi tendue par un poids constant, est écartée tant soit peu de sa direction rectiligne, que nous supposons verticale, et qu'elle est ensuite abandonnée à la force de traction qui la sollicite, cette force imprime d'abord, à chaque point de la corde, un mouvement accéléré vers sa position primitive de repos. Elle le ramène ainsi à cette position; mais la vitesse acquise l'empêche de s'y arrêter et le porte de l'autre côté de la verticale, où il s'écarte jusqu'à une certaine limite d'excursion à laquelle la force de traction toujours agissante l'arrête enfin; après quoi elle le ramène de nouveau en sens

contraire : ce qui fait faire à la corde, de part et d'autre de la verticale, une suite d'oscillations dont les limites peuvent s'apercevoir à la vue simple, quoiqu'elles soient presque toujours trop rapides pour pouvoir être comptées. L'étendue de ces oscillations va continuellement en diminuant; mais, si elles sont fort petites, la variation de leur amplitude n'altère pas sensiblement leur durée; et ainsi elle ne change pas non plus le ton du son qui en résulte, c'est-à-dire l'espèce de sensation d'aigu ou de grave qu'il fait éprouver. Par une conséquence du même principe, ce son demeure aussi le même de quelque façon que la corde soit écartée de son état d'équilibre, soit qu'on la pince ou qu'on la fasse vibrer avec un archet. Dans ce phénomène, on peut considérer chaque élément infiniment petit de la corde comme une petite masse dont la force de traction est le moteur; de façon que si l'on connaît la longueur de la corde, son poids et la force qui la tire, ce doit être un simple problème de mécanique que de déterminer la durée de ses oscillations infiniment petites. En effet, en partant de ces seules données, le calcul démontre les résultats suivans.

Lorsque deux cordes de même grosseur et de même matière sont tendues également, et diffèrent seulement par la longueur, les nombres de vibrations dans un temps donné sont réciproques aux longueurs.

Mais si, la nature de la corde et sa longueur restant les mêmes, on fait varier seulement le poids qui la tend, les nombres d'oscillations en un temps donné, sont directement proportionnels aux racines carrées de ces poids. On peut aisément éprouver sur le monocorde l'effet de ces deux genres de variation.

D'abord, pour faire varier la longueur toute seule, on peut employer un petit chevalet mobile, de forme triangulaire, que l'on place sous la corde, au point où l'on veut la limiter. Ce chevalet, représenté par H, *fig.* 6, doit avoir une hauteur telle, qu'étant placé entre la tablette de la caisse et la corde elle-même, celle-ci presse dessus assez fortement pour se trouver fixée au point de contact. On peut encore, avec plus de

sûreté et d'exactitude, serrer la corde entre les lèvres d'une pince métallique P, *fig. 4*, portée par un curseur qui s'ajuste aux côtés de la caisse, et parcourt une division de parties égales, tracée sur ces côtés, de sorte qu'on peut l'amener et la fixer à tel point de la longueur totale que l'on veut choisir.

Tout étant ainsi disposé, supposons d'abord que l'on relâche la pince, ou que l'on ôte le chevalet afin de faire d'abord vibrer la corde entière. Le nombre de ses oscillations par seconde sera déterminé, et pourra se calculer par les formules de la mécanique, d'après le poids de la corde, sa longueur et le poids tendant (1). Quel que soit ce nombre, pour le désigner d'une manière abrégée, représentons-le par la lettre n . Puis, afin de fixer la sensation du son qui en résulte, servons-nous d'un orgue, d'un piano, ou de tout autre instrument à sons fixes, que nous aurons à notre disposition, et cherchons, sur ses diverses touches, le son qui nous paraîtra identique, pour le degré d'aigu ou de grave, à celui que le sonomètre nous a donné. Si cet unisson ne se rencontre pas avec toute l'exactitude que l'oreille exige, arrêtons-nous au son le plus voisin, et modifions, dans l'instrument auxiliaire, la tension de la corde ou la longueur du tuyau qui le donne, jusqu'à ce que nous parvenions à obtenir l'unisson tout-à-fait rigoureux. Alors, en frappant la touche ainsi accordée, nous serons assurés de reproduire identiquement, et à volonté, le premier son produit par la vibration de la corde entière du sonomètre; ce son sera donc ainsi fixé pour toute la suite des expériences, du moins en supposant que l'instrument auxiliaire ne se dérange point.

Maintenant, sans changer le poids tendant du sonomètre, plaçons le chevalet ou la pince précisément au milieu de la

(1) Pour que le son, ainsi obtenu, soit pur et d'une intensité sensiblement égale dans les expériences successives, il faut que le mode d'ébranlement soit constant, instantané, et de nature à ne gêner en rien la liberté des vibrations. Rien ne remplit mieux ces conditions que de tirer un peu la corde de son état d'équilibre, non avec le doigt, mais avec une petite languette de peau de bulle, et de l'abandonner ensuite à elle-même.

corde entière, *fig. 7*, et faisons vibrer séparément chacune de ses moitiés. Elles seront à l'unisson entre elles, si la corde est bien égale et homogène dans toute sa longueur; mais le son de chaque moitié différera du premier son rendu par la corde totale : il en sera, ce que l'on appelle en musique l'*octave aiguë*; et, comme ce rapport se vérifie toujours, quelles que soient la longueur, la grosseur et la tension de la corde que l'on subdivise, il faut en conclure que, lorsqu'un son est l'octave aiguë d'un autre, il répond à un nombre de vibrations deux fois plus rapides; de sorte que, si l'on veut désigner chaque son par le nombre de vibrations qui lui appartient, le premier sera 1 et le second 2; et, si l'on veut appeler le son fondamental ut_1 et son octave ut_2 , conformément aux dénominations usitées en France, on aura

Le son fondamental. $ut_1 = 1$.

Son octave aiguë. $ut_2 = 2$.

Réciproquement, si l'on voulait considérer le son ut_2 comme fondamental, le son ut_1 , qui correspond à un nombre de vibrations moitié moindre, serait ce que l'on appelle son *octave grave*. Ainsi, en appliquant le même rapport au son ut_1 , et désignant son octave grave par ut_{-1} , on aurait de même

Le son fondamental. $ut_1 = 1$.

Son octave grave. $ut_{-1} = \frac{1}{2}$.

Néanmoins en faisant usage de ces expressions, il faudra toujours se souvenir qu'elles *désignent* seulement les sons, et les *classent* d'après un de leurs caractères essentiels; mais qu'elles ne *mesurent ni n'expriment* les *sensations* mêmes que ces sons excitent en nous.

Plaçons maintenant le chevalet ou la pince du sonomètre au tiers de la corde, comme le représente la *fig. 8*, et faisons vibrer sa plus petite partie; alors, d'après la théorie, le nombre de vibrations de cette partie sera triple de celui qui convient à la corde entière, c'est-à-dire égal à $3n$; aussi le son qu'elle produira sera beaucoup plus aigu que le son fondamental ut_1 . Pour comparer plus aisément le nouveau son

à ce type primitif, substituons-lui pour un moment son octave grave, qui sera donnée par les deux autres tiers de la corde, comme les expériences précédentes le prouvent, et comme l'observation directe le montre aussi. Le nombre de vibrations de cette partie sera alors deux fois moindre, ou $\frac{2}{3}n$, c'est-à-dire qu'il sera $\frac{2}{3}$ du nombre de vibrations donné par la corde entière; et le son qui en proviendra sera par rapport au premier ut_1 , ce que l'on appelle en musique sa *quinte aiguë*; laquelle s'exprime en français par *sol*. Ainsi, comme nous avons désigné ut_1 , par 1, nous aurons, selon la même notation, $sol_1 = \frac{3}{2}$; par conséquent l'octave aiguë de sol_1 , qui était d'abord donnée par le tiers de la corde, devra être exprimée par sol_2 ; et ainsi, en exprimant cette octave comme nous avons exprimé les autres sons, c'est-à-dire, par le nombre relatif de vibrations dont elle résulte, nous aurons $sol_2 = 3$.

Continuant toujours à subdiviser la corde de notre sonomètre, plaçons le chevalet au quart de sa longueur, *fig. 9*, et faisons vibrer ce quart isolément. Le nombre de ses vibrations sera quadruple de celui de la corde entière; le son qui en résultera sera donc l'*octave aiguë* de ut_2 ; ou, suivant les dénominations usitées en musique, ce sera la *double octave* de ut_1 , que nous désignerons par ut_3 ; et, puisque, selon notre notation précédente, ut_1 est 1, nous aurons $ut_3 = 4$. L'autre portion de la corde, qui comprend les $\frac{3}{4}$ de sa longueur, étant mise aussi en vibration à son tour, fera, par seconde, un nombre de vibrations égal aux $\frac{4}{3}$ de ut_1 ; le son qui en résultera, sera, par rapport à ut_1 , ce que l'on appelle en musique la *quarte aiguë*, que l'on exprime par *fa*: nous aurons donc encore selon notre notation $fa_1 = \frac{4}{3}$.

En continuant à subdiviser ainsi la corde en un nombre croissant de parties égales, on pourra trouver successivement tous les sons employés dans la musique. Mais, en nous bornant ici à ceux qui composent la série des sons que l'on nomme la *gamme*, on aura les valeurs suivantes, dans lesquelles on a pris pour unité le nombre de vibrations qui appartient au son fondamental ut_1 .

Désignation des sons en allemand et

en anglais (1).....	C	D	E	F	G	A	B	C.
Noms français.....	<i>ut</i>	<i>ré</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>ut</i> .
Nomb. des vibr. dans un même temps.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
Longueur des cordes qui les donnent.	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$.

Si l'on assemble, à côté les unes des autres, sur une même table sonore, huit cordes de même nature, de même grosseur, tendues par des poids égaux, et dont les longueurs relatives soient telles que les indique le tableau précédent, ces cordes, lorsqu'on les fera vibrer, rendront effectivement les sept sons de la gamme, comme on peut aisément le vérifier par l'expérience; et, si l'on emploie un plus grand nombre de cordes, dont les longueurs soient successivement doubles, quadruples, octuples des précédentes, on aura autant de nouvelles gammes, dont les sons seront l'octave ou la double octave, ou la triple octave de la première. Dans les instrumens de musique, tels que le piano et le clavecin, on ébranle les cordes des diverses octaves par des marteaux qui sont mis en mouvement au moyen de petits leviers de bois sur lesquels on pose les doigts, et que l'on nomme *touches*. Les touches qui appartiennent à une même gamme sont placées à côté les unes des autres. Ainsi la touche qui donne *ré*₁ est la seconde après *ut*₁, celle qui donne *mi*₁ est la troisième, celle qui donne *fa*₁ est la quatrième, celle qui donne *sol*₁ est la cinquième; et ainsi de suite. On a pris de là l'usage de désigner les notes d'après le rang où elles se trouvent placées à la suite d'*ut*. Ainsi on dit que *mi*₁ est la tierce d'*ut*₁; *fa*₁, la quarte; *sol*₁, la quinte; *la*₁, la sixte; *si*₁, la septième, et ainsi de suite; de sorte que si l'on énonce,

(1) Les indications par lettres sont celles qui sont employées dans les orgues, et que l'on inscrit sur les tuyaux. Pour se rappeler aisément leur correspondance avec la notation française, il suffit de se souvenir que le LA, dont le nom finit par un A, est désigné aussi par cette lettre, après quoi, les sons énoncés dans l'ordre de la gamme, suivent la série des lettres consécutives de l'alphabet, comme on le voit ici :

la si ut ré mi fa sol.
 A B C D E F G.

par exemple, la dix-septième majeure au-dessus de ut_1 , cela veut dire la dix-septième touche en partant de ut_1 ; ce qui répond par conséquent à la double octave de mi_1 , ou à mi_3 .

Jusqu'ici nous n'avons fait varier que la longueur de la corde; mais, en faisant varier la tension seule qui est représentée par le poids P , nous pourrions aussi doubler et tripler le nombre des vibrations, ou en général le multiplier dans tel rapport qu'il nous plaira. Alors, quand le calcul nous indiquera quelque'un des nombres d'oscillations donnés par les expériences précédentes, nous devons aussi retrouver le même son, s'il est vrai que, pour la même espèce de corde, le son ne dépende que du nombre des vibrations. C'est en effet ce qui se vérifie avec la plus parfaite exactitude. Si la corde tendue par le poids P donne le son ut_1 , tendue par le poids $4P$ elle donnera ut_2 , tendue par le poids $\frac{9}{4}P$ elle donnera sol_1 , avec le poids $\frac{25}{16}P$ elle donnera mi_1 , et ainsi de suite. En général les nombres de vibrations, à longueur égale, sont comme les racines carrées des poids.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que le son principal donné par chaque corde, selon sa longueur et le poids qui la tend. Mais, en écoutant avec attention le son produit par une corde métallique, on peut facilement y reconnaître le mélange de plusieurs autres sons plus aigus que le son fondamental; par exemple, si celui-ci est représenté par ut_1 , on entend très-distinctement, sol_2 et mi_3 , c'est-à-dire l'octave de sa quinte, et la double octave de sa tierce, lesquelles sont respectivement représentées par les nombres 3 et 5, le son fondamental étant 1. Une oreille exercée apprécie encore l'octave de ut_1 , qui est représentée par le son 2, et la double octave dont la valeur est 4. En sorte qu'en généralisant ce résultat, on conçoit que la même corde fait entendre à-la-fois, mais avec une intensité continuellement décroissante, les sons 1, 2, 3, 4, 5... etc., c'est-à-dire tous ceux qu'elle peut donner en se subdivisant dans un nombre entier de parties. Cela a fait donner à ces sons le nom d'*harmoniques*, parce que le mot d'harmonie désigne la résonnance simultanée de plusieurs sons dont l'ensemble flatte l'oreille, et qu'il n'en est point de plus flatteuse pour

elle , que celle des sons qui forment la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5... Afin que leur coexistence dans la corde vibrante soit plus facile à reconnaître, il faut faire l'expérience avec une corde assez grosse et assez longue pour que le son principal ut_1 soit grave et intense. On réussit très-bien avec les grosses cordes d'une basse. Lorsqu'on ébranle fortement une pareille corde par un coup d'archet bien soutenu et qu'on l'abandonne ensuite à elle-même, l'oreille la moins exercée entend distinctement les premiers termes de la série des harmoniques ; mais, quand on s'est habitué à distinguer ainsi les sons simultanés, ils deviennent ensuite sensibles avec toutes les cordes des instrumens de musique.

Dans tous ces cas, la tension étant constante, la production simultanée de tous ces sons ne peut avoir lieu que par une division spontanée de la corde qui s'arrange de manière à les donner tous à-la-fois. C'est en effet ce qui a lieu ; et ces sons ne se troublent point les uns les autres, parce que c'est un principe général de mécanique que l'air, l'eau, et en général un fluide matériel quelconque, peut recevoir à-la-fois plusieurs mouvemens très-petits, sans que leurs effets se confondent. C'est ce que l'on nomme le principe de la coexistence des petites oscillations. Quant au détail de son application au cas actuel, voyez le *Traité général*.

Cette coexistence de mouvemens dans une même corde, peut se rendre sensible pour les yeux même. Par exemple, si l'on veut produire une simple division en deux parties, *fig. 10*, il n'y a qu'à placer en N, au milieu de la corde, un obstacle léger, qui empêche ce point de s'écarter de l'axe, sans toutefois arrêter la transmission longitudinale du mouvement d'une des moitiés à l'autre. Il suffit pour cela de toucher la corde en ce point avec le tranchant d'une carte, ou même d'y poser légèrement le doigt. Alors, si l'on passe un archet sur la première moitié AN, de manière à la faire vibrer toute entière, elle rend le son qui convient à sa longueur ; ce sera par conséquent l'*octave aiguë* du son fondamental que donnerait toute la corde. Mais en même temps l'autre moitié NB se met aussi en mouvement par communication, et oscille

suivant la même période que la première ; toutefois avec une direction d'excursion constamment opposée. On peut rendre ce mouvement visible, en ajustant de distance en distance, sur cette seconde partie, de petits morceaux de papier pliés, très-légers, qui soient comme à cheval sur elle. Aussitôt que la première moitié de la corde entre en vibration par l'agitation qu'on lui imprime immédiatement, les petits morceaux de papier, posés sur l'autre partie, s'agitent vivement et sont quelquefois lancés au loin. On peut répéter cette épreuve en divisant la corde en un nombre quelconque de parties égales, *fig. 11*, et plaçant des papiers de deux couleurs, les uns aux milieux des parties vibrantes, les autres à leurs limites, qui doivent devenir des points de repos. Alors, on touche légèrement un seul de ces points pour exclure tous les modes de vibration qui l'écarteraient de l'axe, et l'on passe l'archet sur le milieu d'une des parties qui doivent vibrer, afin d'en décider l'excursion. Les plus favorables pour cet effet sont celles qui avoisinent les points d'attache fixe de la corde. Aussitôt que la vibration est décidée, les papiers placés sur les parties vibrantes s'agitent; puis, dès que le son se prononce nettement, ils tombent tous, et les autres restent. Cette jolie expérience est de Sauveur. Elle réussit sur-tout très-bien avec les cordes à boyau que l'on appelle *filées*, parce qu'on a enroulé autour un fil de métal très-fin pour leur donner plus de masse.

On peut encore exciter la division d'une corde en faisant vibrer près d'elle une autre corde dont la vitesse de vibration soit à la sienne dans le rapport de l'unité à un nombre entier. Si, par exemple, la première corde donne ut_1 , et la seconde ut_2 , lorsqu'on fera résonner celle-ci, l'autre se mettra aussi en mouvement, et se divisera d'elle-même en deux parties égales, séparées par un nœud de vibration. C'est ce que l'on pourra reconnaître, soit en écoutant avec attention le son de cette corde, soit en la touchant et la sentant frémir, soit enfin en posant de petits morceaux de papier sur les ventres qui doivent se mouvoir, et sur le nœud qui doit rester immobile. En analysant avec soin les circonstances qui augmentent ou qui affaiblissent cette communication du mouvement vibratoire,

on arrive à reconnaître qu'en général elle s'opère par l'intermède de l'air et des autres corps matériels interposés entre les cordes qui se font vibrer mutuellement. Ces corps, agités par la première corde, agitent l'autre à leur tour, et lui communiquent l'espèce de vibrations qu'ils exécutent eux-mêmes. Ce phénomène se présente sans cesse dans la musique. Lorsqu'on passe un archet sur la corde ut_1 d'une basse, laquelle fait entendre en même temps ses harmoniques ut_2 et sol_2 , la corde sol_1 de cet instrument se divise visiblement en deux parties égales, dont chacune vibre à l'unisson de ce sol_2 . Une verge élastique qui vibre, fait vibrer aussi les cordes métalliques tendues qui sont à l'unisson avec elle. Un violon dont on joue juste fait vibrer les cordes analogues d'une guitare : une flûte le fait également, même lorsque la guitare est posée sur un corps mou. Dans ces derniers cas, le son paraît bien se transmettre uniquement par l'air. Mais, pour qu'il s'établisse, entre deux cordes, une communication de mouvement sensible par l'effet d'ondulations si faibles, il faut que les impulsions successives qu'elles impriment à la seconde corde s'accordent toutes entre elles, et conspirent toutes à la faire mouvoir suivant un même mode d'oscillation. Il faut donc que cette corde puisse prendre un mouvement qui s'accorde périodiquement avec le retour des ondulations de l'air qui la frappe. C'est ce qui a lieu lorsque sa longueur est double, triple, ou généralement un multiple entier quelconque de celle de la première corde mise en vibration. Mais la condition serait encore satisfaite si elle en était un sous-multiple, c'est-à-dire $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$... Alors le son de la première corde étant exprimé par $ut_1 = 1$, celui de la seconde corde serait toujours un de ses harmoniques 2, 3, 4, 5...; et comme tous ces harmoniques résonnent à-la-fois dans la première corde, chacun d'eux doit mettre en mouvement la corde isolée qui lui correspond; c'est aussi ce que l'expérience confirme.

Enfin, on peut aussi exciter, et pour ainsi dire créer de nouveaux sons par le seul concours de plusieurs autres, sans aucune communication de mouvement quelconque; et même, ce qui paraîtra plus extraordinaire, sans employer aucun

corps qui donne immédiatement ces sons. Pour vérifier cette espèce de paradoxe, il faut se former l'idée la plus étendue de ce qui constitue pour nous le son. En général, toutes les fois que l'oreille reçoit l'impression soutenue d'une suite de battemens suffisamment rapides, elle éprouve la sensation distincte d'un son; et elle détermine la nature de ce son d'après la rapidité avec laquelle les vibrations se succèdent. Supposons maintenant que l'on fasse résonner à-la-fois, par deux cordes placées près l'une de l'autre, les deux sons ut_2 et sol_2 d'une même octave. Les nombres de vibrations de ces cordes dans un même temps seront entre eux comme 2 et 5; il y aura donc des instans où les ondulations qu'elles excitent dans l'air arriveront ensemble à l'oreille, et d'autres où elles y arriveront séparées. Pour distinguer les époques de ces accords et de ces discordances, représentons tous les instans qui répondent au commencement et à la fin des vibrations, par des points également espacés sur une même ligne de cette manière :



Les époques des coïncidences sont évidentes; les intervalles qui les séparent sont doubles de ceux qui séparent les vibrations de ut_2 . L'oreille sera donc affectée par leur retour périodique, comme elle le serait par un son ut_1 , plus grave d'une octave que ut_2 . C'est en effet ce qui arrive, et la découverte de ce beau phénomène est attribuée au célèbre musicien Tartini. Pour l'observer, il faut que les deux sons soient parfaitement justes, et soutenus quelque temps sans aucune altération. Autrement, le retour de leurs coïncidences n'étant plus régulier, ne pourrait plus produire l'effet d'un son appréciable. Cette expérience s'exécute avec la plus grande facilité sur l'orgue, dont les sons joignent à une justesse mécanique l'avantage de pouvoir être prolongés indéfiniment. Elle offre même une épreuve sûre, et depuis long-temps usitée, pour reconnaître si cet instrument est exactement d'accord. En

effet on peut, par un calcul fort simple, déterminer quel doit être le son résultant produit par deux sons quelconques dont on connaît le nombre relatif de vibrations. Ainsi, en essayant si les touches que l'on suppose accordées, produisent réellement les sons résultans qui conviennent aux sons qu'elles doivent rendre, on saura si leur accord est exact. Cette épreuve est même la plus délicate à laquelle on puisse les soumettre ; car la moindre variation dans les sons composans produit ordinairement un changement considérable dans le son qui doit en résulter.

Lorsque les deux sons, que l'on produit ainsi ensemble, sont assez rapprochés l'un de l'autre pour que les rencontres de leurs vibrations soient fort rares, ou lorsque, quoique distans, ils sont pris dans des octaves si graves que leur rencontre ait lieu moins de trente-deux fois par seconde, le son résultant se change en battemens distincts, séparés par des intervalles sensibles. C'est ce que l'on peut aisément éprouver sur l'orgue, le trochléon, et en général sur tous les instrumens à sons fixes. Dans l'orgue, par exemple, si l'on choisit des touches correspondantes aux octaves les plus graves, la série des battemens ressemble aux roulemens d'un tambour, dont les coups sont plus ou moins précipités. Ce résultat confirme bien ce que nous avons déjà dit au commencement de ce livre, qu'un son soutenu et uniforme n'est autre chose qu'une suite de battemens, qui se succèdent à intervalles égaux, avec une rapidité suffisante.

Pour exposer ces effets remarquables du concours de deux sons, j'ai supposé qu'ils commençaient exactement ensemble. C'est ce qui ne pourrait arriver que dans des cas infiniment rares ; mais cette condition, qui simplifiait les raisonnemens, n'est nullement nécessaire à la production du phénomène. Seulement, les intermittences absolues qu'elle suppose se trouvent remplacées par des *maxima* et des *minima* d'intensité, pareillement périodiques, ce qui suffit pour que la continuité de leurs retours produise un son. C'est ce que l'on peut remarquer avec évidence sur l'orgue. Quand on y produit des battemens par le concours de deux sons graves et peu diffé-

rens l'un de l'autre, il ne s'opère jamais d'intermittences de sons complètes; mais une sorte de bourdonnement continu, avec des renflemens et des affaiblissemens périodiques d'une parfaite régularité.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que les vibrations transversales des cordes élastiques; mais une pareille corde peut encore vibrer d'une autre manière; savoir, en s'étendant et se contractant tour à tour dans le sens de sa longueur. Car, en traitant de l'élasticité des cordes tirées par des poids, nous avons vu qu'elles tendent à revenir sur elles-mêmes; et que, lorsque la force qui les tirait est affaiblie ou supprimée, elles reviennent en effet à leurs dimensions primitives par une suite d'oscillations isochrones. Si donc une pareille corde, fortement tendue entre deux points fixes, est frottée dans le sens de sa longueur, on peut très-bien concevoir qu'il s'y produise de semblables vibrations. Car le frottement longitudinal ne fait que tirer instantanément quelques tranches de la corde hors de leur position actuelle d'équilibre pour les pousser sur celles qui les avoisinent d'un côté, et les éloigner de celles qui leur sont contiguës de l'autre. Ainsi, quand ces tranches sont ensuite abandonnées à elles-mêmes, elles doivent revenir vers leur position primitive, en excitant, par leurs oscillations, un ébranlement longitudinal qui doit se propager dans la corde entière. Parmi les divers modes d'oscillations qui peuvent être produits de cette manière, le plus simple est celui que représente la *fig. 12*. Toutes les tranches qui composent la corde ont un mouvement simultané, qui se dirige alternativement vers l'une et l'autre extrémité. Quand elles vont de A vers B, elles se contractent en B et s'allongent en A; c'est le contraire, quand le mouvement revient de B vers A dans l'oscillation suivante. Dans l'un et l'autre cas, le milieu de la corde n'éprouve ni condensations, ni dilatations; mais c'est là que le mouvement de translation des particules est le plus rapide. Au contraire, ce mouvement est nul aux deux extrémités fixes. Le second mode de vibrations longitudinales est celui que représente la *fig. 13*. La corde se divise en deux parties égales et consonnantes entre elles, qui ont des mou-

vements alternatifs, constamment opposés en direction, et séparés par un nœud de vibration *N* qui reste immobile. Enfin, on peut concevoir d'autres modes de vibrations où la corde se partagerait en trois parties, comme dans la *fig. 14*, ou en un plus grand nombre. Pour produire ces sons, il faut frotter la corde longitudinalement, avec un archet de violon très-incliné sur la direction de sa longueur, et que l'on applique sur une des parties qui doivent se mettre en mouvement, dans le mode de division que l'on veut imprimer à la corde; ou bien on peut frotter ces parties avec le doigt, ou avec quelque autre corps flexible enduit de poudre de colophane. Mais cela ne suffit pas encore pour produire, à volonté, tel ou tel mode particulier de division; car une même tranche de la corde peut devenir vibrante, dans une infinité de cas divers. Il faut donc particulariser, par quelque autre indice, celui de tous les modes que l'on veut produire; on y parvient en touchant légèrement avec le doigt une des parties qui doivent rester en repos. Les sons obtenus de cette manière ont entre eux les mêmes rapports que ceux des vibrations transversales; c'est-à-dire que, pour des cordes de même nature, également tendues, ils sont réciproquement proportionnels aux longueurs des parties vibrantes, et par conséquent si la corde se divise successivement en 1, 2, 3... *n* parties, ils suivent la série des nombres naturels 1, 2, 3... *n*. Mais ils sont excessivement plus aigus que ceux des oscillations transversales, parce que l'élasticité propre de la matière, qui tend à ramener les particules à leur position primitive d'équilibre, est beaucoup plus puissante que ne l'est, dans les vibrations transversales, la tension produite par un poids. C'est pourquoi il faut employer des cordes très-longues, pour abaisser les sons à un degré de gravité tel qu'on puisse les apprécier exactement.

Ces vibrations longitudinales des cordes ont une analogie évidente avec les contractions et les dilatations alternatives dont nous avons reconnu l'existence dans les ondes aériennes par lesquelles le son est transmis; et, comme nous le verrons bientôt, elles offrent une représentation exacte de la manière

suisant laquelle les colonnes d'air vibrent dans les instrumens à vent.

Ce genre de vibrations n'a, je crois, encore été étudié que par Chladni; il y a employé des cordes qui avaient jusqu'à quarante-huit pieds de longueur.

CHAPITRE IV.

Approximations usitées en musique pour exprimer les intervalles des sons. Nécessité d'altérer la justesse de ces intervalles dans les instrumens à sons fixes; règles de ce tempérament.

LES besoins de la musique ont fait insérer entre les intervalles de la gamme un certain nombre de divisions plus petites, qu'il est nécessaire au physicien de connaître, parce que, sans cela, il ne pourrait ni évaluer ni énoncer d'une manière intelligible les diverses espèces de sons très-multipliées que présentent les vibrations des corps.

Rappelons d'abord les sons qui composent la gamme, et joignons-y leurs valeurs exprimées par les nombres de vibrations qui les donnent.

Noms des sons . . . <i>ut</i> ₁	<i>ré</i> ₁	<i>mi</i> ₁	<i>fa</i> ₁	<i>sol</i> ₁	<i>la</i> ₁	<i>si</i> ₁	<i>ut</i> ₂
Longueurs des cordes qui les donnent. 1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$
Nombre de leurs vibrations en temps égal. 1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.
Valeur des mêmes nombres en décimales. 1	1,125	1,25	1,333	1,5	1,667	1,875	2.

Les sept sons d'une même gamme étant ainsi définis, si l'on multiplie, ou si l'on divise successivement par 2, 4, 8, 16, etc. les nombres de vibrations qui les donnent, on définira de même les sons de toutes les autres gammes comprises dans les octaves plus aiguës ou plus graves. On aura ainsi une série

indéfinie, dans laquelle on pourra se proposer de placer tout son quelconque, dont le nombre de vibrations sera donné.

Soit par exemple le son 18, c'est-à-dire celui dont la corde fait 18 vibrations pendant que ut_1 en fait une; comme ce nombre est plus grand que 2, il appartient à quelqu'une des octaves supérieures; je le divise donc successivement par 2, autant de fois qu'il le faut pour qu'il rentre dans la première octave, c'est-à-dire, pour qu'il s'abaisse entre 1 et 2; une première division le réduit ainsi à 9, une seconde à $\frac{9}{2}$, une troisième à $\frac{9}{4}$, qui est encore plus grand que 2; enfin une quatrième l'amène à $\frac{9}{8}$ qui est compris entre 1 et 2, et se trouve justement égal à $ré$; j'en conclus que le son 18 est égal à $\frac{9}{8}$, multiplié par la quatrième puissance de 2, et qu'ainsi il est le $ré$ de la quatrième octave au-dessus de celle que nous prenons pour point de départ, c'est-à-dire $ré_5$.

Si le nombre donné de vibrations était moindre que 1, il répondrait à un son compris dans les octaves plus graves que la première; et, pour le ramener à celle-ci par le calcul, il faudrait le multiplier par 2 une ou plusieurs fois de suite, jusqu'à ce qu'il revînt entre 1 et 2. Prenons pour exemple le son dont le nombre de vibrations est $\frac{1}{12}$; multiplié par 2, une fois, il devient $\frac{1}{6}$; deux fois, il devient $\frac{1}{3}$; une troisième, il devient $\frac{2}{3}$, qui est encore au-dessous de 1; enfin multiplié une quatrième fois, il devient $\frac{4}{3}$, qui est justement égal à fa ; j'en conclus que le son proposé est le fa de la quatrième octave grave au-dessous de celle que nous prenons pour terme de départ, et en conséquence nous le représenterons par fa_{-4} .

Mais il n'arrivera pas toujours que le nombre proposé tombe ainsi exactement sur quelqu'un des termes de la série. Alors le son qu'il désigne sera intermédiaire entre les deux termes dont il approche le plus. Considérons, par exemple, le son dont le nombre de vibrations serait $\frac{5}{5}$ ou 1, 2. Ce nombre étant compris entre 1 et 2, on voit qu'il est compris dans la première octave; mais il ne coïncide rigoureusement avec aucun des sons de la gamme; seulement sa valeur exprimée en décimales montre qu'il est un peu plus grave que mi_1 .

La multiplicité des cas semblables a fait insérer, entre les

sons primitifs de la gamme, des subdivisions, sinon suffisantes pour représenter en rigueur tous les sons possibles, ce qui exigerait qu'elles fussent infiniment multipliées, du moins assez rapprochées pour que les sons intercalés entre elles ne s'en écartent plus que d'un intervalle assez petit pour pouvoir être, en général, négligé dans la pratique ordinaire. Ces subdivisions se nomment des *dièses* et des *bémols*.

On dit qu'une note est *diésée* quand sa valeur primitive dans la gamme est multipliée par $\frac{25}{24}$, ce qui la rend un peu plus aiguë; et l'on dit qu'elle est *bémolisée*, quand elle est rendue plus grave dans la même proportion, au moyen du facteur inverse $\frac{24}{25}$. Par exemple, ut_1 étant exprimé par 1, ut_1 dièse sera $\frac{25}{24}$; et ut_1 bémol sera $\frac{24}{25}$. De même, mi_1 étant exprimé par $\frac{5}{4}$, mi_1 dièse sera $\frac{125}{96}$ et mi_1 bémol sera $\frac{120}{96}$ ou $\frac{5}{3}$; c'est précisément le son que nous nous étions proposé de placer dans notre dernier exemple, et que sa valeur 1,2 réduite en décimales indiquait être un peu plus grave que mi . On indique le dièse par le signe \ast , et le bémol par le signe b . Dans les morceaux de musique, ces signes se placent sur la ligne où s'écrit la note à laquelle ils s'appliquent. Mais, lorsqu'on les emploie en physique pour modifier des notes isolées, on les place à la droite de la note, et un peu au-dessus d'elle, comme un exposant. Ainsi on dira :

$$ut_1^{\ast} = \frac{25}{24}; ut_1^b = \frac{24}{25}; mi_1^{\ast} = \frac{125}{96}; mi_1^b = \frac{5}{3}.$$

Si l'on veut réaliser les sons ainsi indiqués, il faudra, comme nous l'avons fait pour les notes naturelles, prendre sur la corde sonore des longueurs réciproques aux nombres de leurs vibrations. Ainsi, cette longueur étant supposée 1 pour le son ut , elle sera $\frac{24}{25}$ ou 0,96 pour ut^{\ast} , $\frac{5}{6}$ ou 0,8333 pour mi^b , et ainsi du reste. La tension et la nature de la corde sont toujours censées constantes dans les comparaisons.

Le tableau suivant offre l'indication de tous les sons qui composent une même gamme ainsi subdivisée :

NOMBRE des vibrations en temps égal.	RÉDUCTION de ces nombres en décimales.	DÉNOMINATIONS USITÉES pour désigner le rapport de chaque son avec le premier son <i>ut</i> .
$ut_1 = 1$	1,00000	<i>ut-ut</i> unisson.
$ut^* = \frac{25}{24}$	1,04166	<i>ut ut^*</i> semi-ton mineur.
$re^b = \frac{27}{25}$	1,08000	<i>ut re^b</i> semi-ton majeur.
$ré = \frac{9}{8}$	1,12500	<i>ut ré</i> seconde majeure.
$re^* = \frac{75}{64}$	1,17187	<i>ut re^*</i> seconde superflue.
$mi^b = \frac{6}{5}$	1,20000	<i>ut mi^b</i> tierce mineure.
$mi = \frac{5}{4}$	1,25000	<i>ut mi</i> tierce majeure.
$mi^* = \frac{125}{96}$	1,30208	<i>ut mi^*</i>
$fa^b = \frac{32}{25}$	1,28000	<i>ut fa^b</i> quarte diminuée.
$fa = \frac{4}{3}$	1,33333	<i>ut fa</i> quarte.
$fa^* = \frac{25}{18}$	1,38889	<i>ut fa^*</i> quarte superflue.
$sol^b = \frac{36}{25}$	1,44000	<i>ut sol^b</i> quinte diminuée.
$sol = \frac{2}{1}$	1,50000	<i>ut sol</i> quinte.
$sol^* = \frac{25}{16}$	1,56250	<i>ut sol^*</i> quinte superflue.
$la^b = \frac{8}{5}$	1,60000	<i>ut la^b</i> sixte mineure.
$la = \frac{5}{3}$	1,66667	<i>ut la</i> sixte majeure.
$la^* = \frac{125}{72}$	1,73611	<i>ut la^*</i> sixte superflue.
$si^b = \frac{9}{5}$	1,80000	<i>ut si^b</i> septième mineure.
$si = \frac{15}{8}$	1,87500	<i>ut si</i> septième majeure.
$si^* = \frac{125}{64}$	1,95313	<i>ut si^*</i>
$ut^b = \frac{48}{25}$	1,92000	<i>ut ut^b</i> octave diminuée.
$ut_2 = 2$	2,00000	<i>ut_1-ut_2</i> octave.

Au moyen de ces intercalations, un son quelconque, dont le nombre de vibrations sera donné relativement à ut_1 , pourra être placé, soit dans l'octave primitive, soit dans quelque une des octaves plus aiguës ou plus graves, avec une erreur toujours moindre que l'intervalle compris entre un des sons principaux de la gamme et son dièse ou son bémol.

Pour donner un exemple de ce classement, imaginons que le son proposé soit celui dont le nombre de vibrations est $\frac{125}{3}$,

ou 41,66667 ; en comparant ce nombre aux termes de la série 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64... , qui exprime la suite des ut_1 , ut_2 , ut_3 ... des diverses octaves, nous voyons qu'il tombe entre 32 et 64, par conséquent dans la sixième. Pour le rapporter à l' ut de cette octave, il faut le diviser par 32, ce qui donne pour quotient 1,30208. En comparant ce résultat à notre tableau, nous voyons qu'il est précisément égal à mi dièse : ainsi le son proposé est le mi dièse de la sixième octave au-dessus de ut_1 , c'est-à-dire mi_6^* . Si nous avons trouvé un quotient un peu plus fort ou un peu plus faible, mais néanmoins trop peu différent de mi^* , pour pouvoir être ramené, avec plus d'exactitude, à la division subséquente, nous aurions pu indiquer encore cette circonstance par le moyen du signe + ou du signe —, placé à côté de mi^* , de cette manière, mi_6^*+ , mi_6^*- . Cette indication est souvent nécessaire dans les recherches d'acoustique.

Réciproquement on voit qu'un son énoncé de cette manière peut aisément se traduire en nombres ; car, si l'on nous donne par exemple si^b_{-3} ; nous voyons d'abord par le signe si^b que le nombre des vibrations de ce son est $\frac{3}{8}$ relativement à l' ut de l'octave dont il fait partie. Ensuite, l'indice inférieur — 3 montre que cette octave est la troisième au-dessous de ut_1 , pour laquelle $ut_{-3} = \frac{1}{8}$. Le nombre de vibrations du son proposé sera donc $\frac{3}{8}$ de $\frac{1}{8}$ ou $\frac{3}{40}$.

Ayant ainsi fixé, dans la série indéfinie des sons, un certain nombre de termes entre lesquels nous pouvons classer par intercalation tous les sons possibles, il nous faut examiner à quoi les intervalles de ces termes répondent dans la série de nos sensations. Ceci nous conduit à expliquer ce que l'on appelle en général les *intervalles musicaux*.

Nous avons dit plus haut, que lorsqu'un son, sol_1 par exemple, faisait $\frac{3}{2}$ vibrations pendant qu'un autre ut_1 en faisait une seule, sol_1 s'appelait la *quinte aiguë* de ut_1 ; il n'y a là qu'une définition, et un énoncé de caractère précis, mais sans aucun rapport avec la sensation même que ce sons excite. Néanmoins on conçoit que cette sensation n'est pas identique dans les deux cas, puisque nous distinguons les

deux sons. La différence que nous trouvons entre eux, et que prouve l'acte même qu'il nous faut faire pour passer de l'un à l'autre, constitue ce que l'on peut appeler l'*intervalle sensible* des deux sons, intervalle qui est évidemment plus grand ou moindre, selon que les nombres absolus de vibrations qui les donnent s'éloignent plus ou moins de l'égalité. Aussi, lorsque ces nombres sont égaux pour deux sons, quelle que soit d'ailleurs la rapidité absolue des vibrations qui les produisent, notre oreille reconnaît l'unisson exact. Si, au lieu d'être égaux, ces deux nombres sont dans le rapport de 2 à 1, nous avons la sensation de l'octave; si leur rapport est de $\frac{3}{2}$ à 1, ou de 3 à 2, nous avons la sensation de la quinte; et cela, quelle que soit l'acuité ou la gravité absolue de l'octave où l'on prend les deux sons. Ces expériences prouvent que l'*intervalle sensible* des sons dépend *uniquement du rapport des* nombres de vibrations qui les donnent. Ainsi on peut, sinon le *mesurer*, du moins le *définir* par ce rapport, avec la certitude que, lorsque celui-ci se trouvera le même, l'intervalle sensible sera le même aussi.

J'ai indiqué de cette manière, dans le tableau de la page 382, les intervalles compris entre les sons successifs de la gamme et le premier son *ut*. Voici maintenant la valeur et les dénominations des intervalles consécutifs que ces sons forment entre eux.

INTERVALLES compris entre les sons de la gamme comparés consécutivement.	RAPPORTS qui les caractérisent.	Leurs DÉNOMINATIONS usitées.
<i>ré—ut</i>	$\frac{9}{8}$	ton majeur.
<i>mi ré</i>	$\frac{10}{9}$	ton mineur.
<i>fa mi</i>	$\frac{16}{15}$	semi-ton majeur.
<i>sol fa</i>	$\frac{9}{8}$	ton majeur.
<i>la sol</i>	$\frac{10}{9}$	ton mineur.
<i>si la</i>	$\frac{9}{8}$	ton majeur.
<i>ut—si</i>	$\frac{16}{15}$	semi-ton majeur.

Les dénominations rapportées ici, de même que celles que nous avons indiquées plus haut pour les autres intervalles, ne doivent pas être considérées comme exprimant des rapports de sensations, mais seulement des différences indicatives de plus grand et de moindre. Ainsi l'intervalle *ré ut* étant caractérisé par $\frac{9}{8}$ tandis que l'intervalle *mi ré* l'est par $\frac{10}{9}$ qui est une fraction moins différente de 1, on peut dire, avec certitude, que le premier est plus grand que l'autre, ce qui justifie les dénominations de *ton majeur* et *ton mineur* qu'on leur a données. Mais il ne faut pas du tout conclure de là, que le rapport de ces intervalles soit égal au rapport des fractions qui les expriment; car il n'y a rien dans les considérations précédentes qui nous autorise à tirer cette conclusion; et nous ne tarderons pas à voir qu'elle serait inexacte. Pareillement, de ce que le rapport *fa mi* ou $\frac{16}{15}$ est appelé en musique un *semi-ton majeur*, nous n'en devons pas conclure qu'il est physiquement la moitié de l'intervalle *ré ut*, ce qui serait également faux. Nous voyons seulement, par son expression numérique, qu'il est moindre que la totalité de cet intervalle. Mais ceci nous conduit naturellement à chercher s'il ne serait pas possible d'effectuer avec rigueur cette comparaison.

On peut d'abord former et assigner des intervalles sensibles qui soient exactement doubles, triples, ou en général multiples d'un premier intervalle donné. Il suffit, à cet effet, de multiplier, une, deux, ou plusieurs fois par lui-même, le rapport numérique par lequel cet intervalle est défini. Par exemple, nous savons que le son *sol*₁ est désigné par $\frac{3}{2}$, quand *ut*₁ l'est par 1; et il est en même temps la quinte d'*ut*₁. Si l'on veut doubler cet intervalle, il n'y a qu'à former la quinte de *sol*₁, qui sera $\frac{3}{2}$ de $\frac{3}{2}$, ou $\frac{9}{4}$; et ce produit caractérisera le double intervalle cherché. Cet intervalle est réalisé dans la série des sons par *ut*₁ et *ré*₂, puisque *ut*₁ étant 1, *ré*₂ est $\frac{9}{4}$.

Si l'on voulait obtenir un triple intervalle de quinte, il faudrait multiplier encore une fois $\frac{9}{4}$ par $\frac{3}{2}$, ce qui donnerait $\frac{27}{8}$ ou $\frac{10}{3} \cdot \frac{81}{80}$. Ce résultat est presque égal à l'intervalle

ut_1, la_2 dont la valeur est $\frac{1}{3}$. Il est toutefois plus grand, à cause du facteur $\frac{81}{64}$ qui surpasse l'unité; mais la différence est petite, parce que $\frac{81}{64}$ diffère très-peu de 1. Ce facteur $\frac{81}{64}$ s'appelle en musique *un comma majeur*; et l'on dit qu'une note est haussée ou baissée d'un tel comma, quand la valeur du son primitif qu'elle exprime est multipliée ou divisée par $\frac{81}{64}$.

Sachant ainsi opérer la répétition des intervalles égaux, par la multiplication successive des fractions qui les expriment, concevons un intervalle tel, qu'étant répété douze fois de suite, il embrasse exactement l'octave entière. Cela exigera que la fraction caractéristique de cet intervalle, étant multipliée douze fois de suite par elle même, donne pour résultat 2, valeur de l'intervalle d'octave, et soit, par conséquent, la racine douzième de 2. Un tel intervalle donnera, dans l'octave; autant de subdivisions que l'on en emploie dans la musique pratique, où l'on compte chaque ton majeur ou mineur comme valant deux semi-tons de son espèce, ce qui compose l'octave de douze semi-tons tant majeurs que mineurs, et conséquemment inégaux entre eux. Mais toute cette inégalité disparaîtra dans notre subdivision nouvelle, où *le douzième d'octave* formera un vrai *semi-ton moyen*, dont la répétition successive, comparée aux intervalles vrais de la gamme, nous indiquera leurs inégalités. Le calcul de ce semi-ton s'effectue aisément à l'aide des tables de logarithmes, en partant de la condition énoncée tout-à-l'heure; et on le trouve exprimé par le nombre 1,059463; c'est-à-dire que le son qui le donne fait 1 vibration et $\frac{59463}{1000000}$ pendant que le son *ut*, en fait une; d'où il suit que, si ce son *ut* est donné par une corde d'une longueur 1, notre douzième d'octave le sera par une longueur égale à $\frac{1}{1,059463}$ ou 0,943874, réciproquement au nombre absolu des vibrations exécutées en temps égal; ce qui montre comment le son correspondant à cet intervalle peut être effectivement réalisé. On peut évaluer de même, par les logarithmes, les valeurs successives de ses diverses puissances, correspondantes aux intervalles doubles, triples, qui résultent de sa répétition; et l'on peut également en déduire les

longueurs des cordes qui donneraient les divers sons que désignent ces intervalles répétés. Comme ces résultats sont fréquemment applicables, je les ai exposés dans le tableau suivant.

NOMBRE DES VIBRATIONS des différens sons qui composent la gamme moyenne, divisée en douze semi-tons moyens.	LONGUEURS DES CORDES qui donneraient ces sons.
$ut_1 = 1,000000$	1,000000
ut^{\ast} ou $re^b = 1,059463$	0,943874
$ré = 1,122462$	0,890899
re^{\ast} ou $mi^b = 1,189207$	0,840896
$mi = 1,125992$	0,793701
$fa = 1,334840$	0,749154
fa^{\ast} ou $sol^b = 1,414213$	0,707107
$sol = 1,498306$	0,667420
sol^{\ast} ou $la^b = 1,587400$	0,629961
$la = 1,681793$	0,594604
la^{\ast} ou $si^b = 1,781796$	0,561230
$si = 1,887745$	0,529730
$ut_2 = 2,000000$	0,500000

En comparant les valeurs des intervalles moyens contenus dans ce tableau et celles des intervalles correspondans rapportés dans le tableau de la page 385, on découvre aussitôt les différences qui les distinguent. Par exemple, on trouve que l'intervalle vrai $ut_1 ré_1$, exprimé par $\frac{9}{8}$ ou 1,125, excède l'intervalle moyen $ut_1 ré_1$, exprimé par 1,122, tandis qu'au contraire la quarte vraie $ut_1 fa_1 = 1,333$ est un peu moindre que la quarte moyenne $ut_1 fa_1 = 1,33484$. Mais c'est à ce plus ou à ce moins, que se borne la comparaison que nous pouvons établir d'après ces nombres. Pour aller plus loin, il faudrait savoir déterminer combien chaque intervalle vrai contient précisément d'intervalles moyens; ou, plus généralement, connaissant le rapport des nombres de vibrations simultanées, correspondantes à deux sons quelconques, rapport qui caractérise leur intervalle, il faut apprendre à l'exprimer en inter-

valles moyens. Ce problème peut se résoudre en toute rigueur dans le cas où l'intervalle proposé est une répétition exacte de l'intervalle moyen ; car alors le nombre qui l'exprime doit être une puissance exacte de 1,059463 ; tel est, par exemple, l'octave 2, qui en est en effet la douzième puissance. Mais, hors ce cas, nécessairement très-particulier, la question ne peut être résolue que par approximation (1). Ce calcul s'effectue encore très-aisément au moyen des tables de logarithmes ; et c'est ainsi qu'on a obtenu les résultats compris dans le tableau suivant, où les intervalles des sons de la gamme sont exprimés par les nombres de semi-tons moyens qu'ils contiennent.

Intervalles vrais.	NOMBRE	Intervalles vrais.	NOMBRE
	de semi-tons moyens qu'ils contiennent.		de semi-tons moyens qu'ils contiennent.
<i>ut- ut</i>	0,000000	<i>ré ut</i>	2,039100 ton majeur.
<i>ut ré</i>	2,039100	<i>mi ré</i>	1,824037 ton mineur.
<i>ut mi</i>	3,863145	<i>fa mi</i>	1,117313 demi-ton maj.
<i>ut fa</i>	4,980456	<i>sol fa</i>	2,039100 ton majeur.
<i>ut sol</i>	7,019550	<i>la sol</i>	1,824037 ton mineur.
<i>ut la</i>	8,843587	<i>si la</i>	2,039100 ton majeur.
<i>ut si</i>	10,882710	<i>ut si</i>	1,117313 demi-ton maj.
<i>ut₁ ut₂</i>	12,000000		
Somme totale 12,000000			

Dièse *ut ut** + 0,706724

Bémol *ut ut*^b — 0,706724

(1) Ce problème revient en général à ceci ; connaissant le nombre qui exprime un intervalle musical donné, trouver la puissance parfaite ou imparfaite à laquelle il faut élever 1,059463 pour produire ce nombre. L'indice de la puissance exprimera le nombre de semi-tons moyens que contient l'intervalle proposé. Pour l'obtenir, il faut diviser le logarithme du rapport qui exprime cet intervalle par le logarithme de 1,059463, lequel est égal à 0,0250858, dans les tables ordinaires.

Exemple : la valeur de la quarte *ut fa* est $\frac{4}{3}$, et le logarithme de $\frac{4}{3}$ est 0,1249387 ; divisant ce logarithme par 0,0250858, le quotient sera 4,980456. C'est le nombre de semi-tons moyens contenus dans la quarte vraie *ut fa*.

Si l'on forme une gamme complète, ayant, outre ses notes naturelles, leurs dièses et leurs bémols, et que cette gamme se trouve répétée toute entière dans plusieurs octaves consécutives plus aiguës et plus graves, on aura sans doute ainsi une série nombreuse, et dont les termes seront assez rapprochés pour qu'on puisse trouver à y placer beaucoup de sons; néanmoins, dans le moindre morceau de musique, la succession des intervalles par lesquels le chant passe, conduira presque toujours à des sons qui ne pourront ni être exactement placés dans la série, ni être rapportés à aucun de ses termes d'assez près pour que l'erreur puisse être tolérée. Cet inconvénient devient inévitable si l'on veut rapporter à la même série les sons contenus dans des morceaux de musique différens, qui partent de notes fondamentales diverses. Dans ce cas, si l'on ne veut pas multiplier à l'infini les subdivisions de la série à laquelle on veut rapporter tous les sons, il faut au moins en espacer les termes de manière qu'un son quelconque, amené par la mélodie, s'y place avec une erreur aussi faible que possible. Pour cela, le parti le plus simple, c'est d'accorder toute la série par semi-tons moyens, conformément aux rapports que nous avons assignés plus haut, et de rapporter chaque son proposé à celui de ses semi-tons qui diffère le moins de sa valeur. C'est aussi ce que l'on fait dans tous les instrumens à sons fixes, tels que le piano, l'orgue, la harpe. Ces instrumens n'ont d'ordinaire que douze touches par octave, dont sept résonnent les notes principales de la gamme, et les cinq autres, distribuées entre celles de ces notes qui diffèrent d'un ton entier, produisent une sorte de semi-ton neutre qui sert de dièse à celle qui précède, et de bémol à celle qui suit. Or, quand ces instrumens sont accordés par les meilleurs accordeurs, d'après les seules lumières que donne la pratique journalière, et le besoin d'obtenir une exécution à-peu-près tolérable pour tous les morceaux que l'on peut jouer, si l'on compare, un à un, leurs sons avec le monocorde vertical à poids constant, on trouve que la série de ces sons est précisément espacée par semi-tons moyens, et cela avec une justesse dont on croirait à peine qu'un simple organe des

sens puisse être capable. Cette répartition d'erreur se nomme en musique *le tempérament*. Il y a diversès manières de l'opérer, qui ont toutes leurs partisans : mais l'expérience que je viens de rapporter prouve que *le tempérament égal* est celui qui convient le mieux à des instrumens que l'on veut disposer pour pouvoir jouer indifféremment toutes sortes de morceaux. On voit aussi, par ce qui précède, que le tempérament est propre aux instrumens qui n'ont qu'un nombre limité de sons; car pour ceux qui, comme le violon et la voix, en peuvent réaliser une infinité, ils peuvent toujours reproduire exactement chaque son assigné, sans l'altérer en aucune manière; et ainsi ils n'ont pas besoin de tempérer lorsqu'ils jouent seuls ou avec des instrumens de même nature qu'eux. Mais il n'en est plus de même lorsqu'ils accompagnent des instrumens à sons fixes; et alors, pour ne pas faire, par leur justesse, une discordance désagréable, ils sont obligés de parler comme eux.

CHAPITRE V.

Exposition des divers procédés que l'on peut employer pour mettre les corps solides dans l'état de vibration sonore, et pour constater la nature des mouvemens qu'ils exécutent lorsqu'ils se trouvent dans cet état.

Nous avons vu, dès le commencement de ce livre, que tout corps solide qui rend actuellement un son soutenu et appréciable, vibre avec beaucoup de rapidité pendant tout le temps que le son dure; mais tous les modes d'ébranlement qu'on peut imprimer à un corps solide ne sont pas propres à le mettre dans cet état vibratoire. C'est ainsi, par exemple, que l'on ne tire pas un son net et soutenu d'une table de bois, en la frappant sur sa surface avec une règle de bois ou de métal; chaque choc pareil produit seulement un bruit confus qui ne dure qu'un moment. Cependant on peut obtenir d'une semblable table des sons soutenus, et même d'une nature agréable à l'oreille, en l'ébranlant par d'autres procédés. Il devient donc dès à présent indispensable d'exposer ici généralement en quoi ces procédés

consistent, et de caractériser, s'il est possible, les circonstances qui les font réussir.

Lorsque le corps solide que l'on veut faire vibrer est terminé en quelque partie par des bords minces, on peut ordinairement lui faire rendre des sons, soit en passant transversalement sur ces bords un archet enduit de colophane, soit en frottant longitudinalement leur contour avec une étoffe de feutre, ou un morceau de peau lisse imbibé d'eau. Les doigts mouillés suffisent même souvent pour produire cet effet, comme chacun peut s'en assurer, en frottant ainsi les bords d'une coupe de verre, ou même d'un simple verre à boire, pourvu qu'il ne soit pas trop épais. Dans ces divers cas, et généralement dans tous ceux où le corps solide est mis de même en vibration par un mode d'ébranlement qui s'applique immédiatement à quelqu'une de ses parties, on remarque que la condition essentielle, pour faire éclater le son, n'est pas d'imprimer à tout le corps un mouvement commun, quelque grand qu'il puisse être; mais d'exciter isolément une vive agitation dans quelques parties, ou même dans un petit nombre de molécules, lesquelles, en revenant vers leur situation primitive, par l'effet de leur réaction élastique propre, exécutent des oscillations très-rapides qui agitent les molécules voisines, lesquelles en agitent d'autres à leur tour; de sorte que le mouvement se propage ainsi dans toute la masse, selon les rapports d'intensité et de période nécessités par la liaison des parties qui la constituent.

Mais on peut aussi mettre un corps solide en vibration sonore sans lui appliquer aucun mode d'ébranlement immédiat, au moins en apparence, pourvu qu'on le mette seulement en communication, par contact, avec un autre corps que l'on sollicite immédiatement. Par exemple, si, sur les bords d'une coupe de verre, et perpendiculairement à la direction de sa surface, on fixe, avec de la cire d'Espagne, un petit tube très-fin de verre ou de métal, long de huit ou dix centimètres, lorsque l'on frotte longitudinalement ce tube entre les doigts mouillés, on lui imprime ainsi un état de vibration qui se transmet au vase, et qui lui fait rendre exactement ou

presque exactement le même son qu'on en aurait tiré si on l'eût ébranlé immédiatement avec un archet. On peut également faire vibrer une plaque de verre, de bois, de métal, ou tout autre corps solide quelconque, en fixant, sur quelque point de sa surface, un petit tube de verre sur lequel on agit immédiatement par friction longitudinale. Ce procédé, devenu aujourd'hui d'une application continuelle, pour les expériences sur les vibrations sonores des corps solides, a été imaginé par un jeune physicien de Grenoble, nommé M. Blanc. Son effet se conçoit avec facilité en considérant que les tranches du tube additionnel, qui sont contiguës au corps solide, doivent, lorsque la propagation de l'ébranlement primitif est arrivée jusqu'à elles, devenir une cause d'ébranlement local pour le point de la surface de ce corps auquel elles sont appliquées; qu'ainsi elles doivent agiter, par leurs pulsations, l'élément du corps placé en ce point, et lui imprimer des vibrations périodiques comme celles dont elles sont agitées elles-mêmes; de sorte que leur action ainsi envisagée rentre au fond dans le mode d'ébranlement immédiat que nous avons considéré d'abord.

On peut aussi substituer, au tube additionnel, une lame de verre que l'on frotte transversalement avec un archet. Lorsque cette lame a une épaisseur et une longueur suffisante, elle vibre, et fait vibrer le corps auquel elle est appliquée.

Nous examinerons bientôt, par l'expérience, l'espèce et les qualités des sons qui, à l'aide de ces procédés divers, peuvent être obtenus des différens corps solides, selon leur nature, leur forme et la manière dont ils sont ébranlés. Pour le moment, je les présente ici comme de simples faits préliminaires, qu'il faut connaître pour pouvoir agir sur les corps solides de manière à en tirer des sons qui puissent être musicalement comparés.

Par le même motif, je dois encore exposer ici un caractère expérimental qui s'applique à tous les mouvemens vibratoires des corps solides, et qui facilite singulièrement l'intelligence des phénomènes compliqués qu'ils produisent. C'est qu'on peut en général ranger ces mouvemens en deux classes, l'une dans laquelle les surfaces des corps qui vibrent sont agitées

perpendiculairement à leur plan tangent, l'autre, au contraire, dans laquelle elles sont agitées suivant ce plan. A la vérité, on peut concevoir encore un cas plus général, qui est celui où les deux sens de mouvemens, tangentiel et normal, existeraient simultanément dans un même corps et se modifieraient l'un l'autre; mais l'analyse expérimentale des phénomènes, dans le cas d'un sens unique, est déjà trop difficile pour qu'on puisse espérer de suivre, par l'observation seule, la complication des mouvemens plus composés. Tout ce que l'on peut se proposer, et il y a beaucoup d'utilité à le faire, c'est de chercher à reconnaître, dans les deux cas de vibrations les plus simples, des données qui guident par la suite les spéculations des géomètres, et auxquelles ils puissent appliquer le calcul, seul fil capable de nous conduire dans le labyrinthe de ces faits.

Mais, comment prouver l'existence des deux espèces de mouvemens que nous venons d'indiquer, et même, en les admettant, comment en reconnaître l'existence actuelle? On atteint ce double but d'une manière fort simple. Si le mouvement de la surface est normal, il n'y a qu'à placer successivement chaque portion de cette surface dans une situation horizontale, et y répandre une petite quantité de sable fin et sec. Alors les grains de ce sable qui reposent sur des parties mobiles sont continuellement lancés dans une direction verticale, et sautillent sur la surface vibrante avec une vivacité extraordinaire. Et, comme la surface qui les lance se courbe en vibrant, et se plie, pour ainsi dire, en plusieurs portions, de courbures alternativement contraires, l'impulsion qu'elle leur donne est toujours un peu oblique, et les porte paraboliquement vers les lignes droites ou courbes qui limitent les alternatives de flexion. En conséquence, si l'on soutient le son pendant quelques instans, tous les petits grains de sable viennent se réfugier sur ces lignes, ne pouvant trouver de repos par-tout ailleurs; de sorte qu'ils en indiquent visiblement les configurations. Ce moyen ingénieux a été imaginé par Galilée, comme on peut le voir dans la première journée de ses Dialogues sur le mouvement. Mais il était resté dans l'oubli jusqu'à l'époque où M. Chladny en renouvela, pour ainsi dire la découverte, en l'appliquant à un grand

nombre d'expériences sur les vibrations des plaques élastiques, desquelles nous aurons bientôt occasion de parler.

Un procédé précisément analogue sert pour reconnaître les cas où la surface du corps qui vibre a un mouvement tangentiel. Alors, si l'on répand du sable sur cette surface, on voit bien encore tous les petits grains venir se réfugier sur un certain nombre de lignes nodales droites ou courbes, où ils restent en repos; mais ils courent à ces lignes de repos sans quitter le moins du monde la surface vibrante, sur laquelle ils ne font réellement que glisser. Ce mode de mouvement est si évident et si distinct du mouvement normal, qu'il est impossible de s'y méprendre. Car, sur une lame de verre de deux mètres, que l'on tient par le milieu et dont une moitié est frottée longitudinalement entre deux morceaux de drap mouillé, le même grain de sable est quelquefois transporté successivement à une distance de sept ou huit décimètres. Ce phénomène, important par lui-même et par l'utilité dont il peut être dans l'étude des mouvemens vibratoires, a été remarqué pour la première fois par M. Félix Savart, qui s'en est servi pour rendre sensibles, et pour analyser, un grand nombre de particularités de ces mouvemens qui étaient restées jusqu'alors inaperçues.

Nous étant ainsi formé des procédés pour reconnaître et caractériser les modes de vibration dans les corps solides, nous allons entrer dans l'examen de ces vibrations mêmes. Pour simplifier l'énoncé des phénomènes, je désignerai, comme l'a fait M. Savart, les diverses espèces d'état vibratoire par les dénominations de normal et de tangentiel, selon le sens des agitations imprimées aux grains de sable par les surfaces des corps vibrans. Mais je dois prévenir qu'en employant ces dénominations, je n'entends les appliquer qu'aux molécules matérielles qui composent les surfaces des corps ébranlés, sans vouloir, pour cela, inférer que la même espèce de mouvement s'étende à toutes les particules qui composent l'intérieur de ces corps; conséquence qui serait très-souvent fautive, et qui ne peut être établie que par des preuves expérimentales dans le cas où elle a réellement lieu.

CHAPITRE VI.

Vibrations des verges solides, droites ou courbes.

LES verges solides *droites*, par exemple les tiges d'acier ou de verre, peuvent vibrer comme les cordes, transversalement et longitudinalement : mais les lois de leurs vibrations transversales diffèrent beaucoup de celles des cordes, parce que, dans ces dernières, la tension n'agit que dans le sens de la longueur, tandis que, dans les lames solides, et en général dans les surfaces rigides, la force de ressort agit sur la courbure même. Il n'en est pas ainsi du mouvement longitudinal, où la réaction élastique des particules matérielles agit de même dans les cordes et dans les tiges, du moins en supposant les unes et les autres infiniment minces. Ces considérations préliminaires étant établies, nous allons examiner successivement les deux modes de vibration dont les verges droites sont susceptibles, en commençant par les vibrations transversales.

Remarquons d'abord qu'en vertu de la constitution solide de la verge, sa seule rigidité suffit pour la tenir tendue. Ainsi, il n'est plus nécessaire qu'elle soit fixée invariablement à ses deux bouts, comme les cordes, pour être mise en vibration. L'un de ces bouts peut être fixé, et l'autre libre; ou ou bien l'un peut être simplement appuyé contre un plan solide, l'autre étant fixé ou libre, etc. Toutes ces combinaisons de circonstances, que l'on est maître de faire varier à volonté, donnent lieu à autant de sortes diverses de mouvement, que l'analyse calcule, et qui sont parfaitement réalisées par l'observation.

Pour faire les expériences, il faut se servir de verges droites, cylindriques ou planes, mais homogènes et uniformément épaisses. Quand un des bouts doit être fixé, on le serre entre les mâchoires d'un étau. S'il doit être simplement appuyé contre un obstacle, on le presse contre un plan solide. Pour mettre la verge en vibration, on la frotte transversale-

ment avec un archet légèrement enduit de colophane; et, si l'on veut produire des nœuds de vibration comme dans les cordes, on les détermine en pressant légèrement, avec le doigt, un des points que l'on veut réduire à l'immobilité. Lorsque les lames que l'on fait ainsi vibrer sont planes, on peut rendre sensibles aux yeux les subdivisions spontanées qu'elles éprouvent dans les modes de vibration successifs par lesquels elles rendent différens sons. Il suffit pour cela de répandre sur leur surface du sable fin et sec. Tous les grains agités par le mouvement vibratoire, fuient les parties mobiles et vont se réfugier dans les nœuds de vibration où il ne se fait point de mouvement.

Chacune des dispositions précédentes peut, comme dans les cordes vibrantes, donner lieu à plusieurs espèces de vibrations, selon que la lame ne forme qu'une seule courbure vers l'axe rectiligne, ou le coupe en plusieurs points, *fig.* 15-19. Mais le rapport des sons avec le nombre des courbures est autre que dans les cordes vibrantes, à cause de l'action différente de la force élastique; et les sons haussent beaucoup plus rapidement à mesure que la verge se subdivise. La théorie détermine ces rapports, et l'expérience s'accorde exactement à les confirmer. On peut voir le détail de cette comparaison dans le *Traité général*; je me bornerai ici à énoncer les résultats principaux. Lorsque l'on compare entre elles des verges de même matière, et dont l'épaisseur et la longueur seules sont différentes, le nombre des vibrations, dans des modes semblables, est proportionnel aux épaisseurs des lames et réciproque aux carrés de leurs longueurs. Si les longueurs sont égales, la proportion de l'épaisseur reste seule, et il en résulte que les lames les plus épaisses rendent les sons les plus aigus, ce qui tient à ce que la force du ressort croît, avec l'épaisseur, plus rapidement que la masse, ce qui doit accélérer les vibrations. Dans les verges de matière et de figure semblables, le rapport des épaisseurs étant le même que celui des longueurs, les nombres qui expriment les sons se trouvent en raison inverse des dimensions homologues; par conséquent, en raison inverse des racines cubiques des poids; car alors les

pois sont comme les cubes des dimensions. Enfin, quand les lames sont mises en vibration transversalement, comme nous l'avons supposé, et par les procédés que nous avons décrits, leur largeur n'influe pas sur le son qu'elles rendent.

Les verges élastiques *droites* peuvent encore, comme les cordes, vibrer dans le sens de leur longueur. Pour produire, avec la plus grande énergie possible, les sons qui correspondent à ce genre de vibrations, il faut serrer la verge entre les doigts en l'enveloppant d'un morceau de drap mouillé, et la frotter ainsi dans le sens de sa longueur. Cela exige qu'on la touche encore par quelque autre point pour la soutenir; l'endroit où ce contact s'opère devient un nœud de vibrations. Généralement les diverses subdivisions de la verge en parties aliquotes s'obtiennent de même que dans toutes les expériences précédentes, en touchant un ou plusieurs des points que l'on veut rendre immobiles, et appliquant la friction vers le milieu d'une des parties qu'on veut faire vibrer. Les valeurs numériques des sons suivent la même série que ceux des vibrations longitudinales des cordes, c'est-à-dire, sont réciproquement proportionnelles aux longueurs; et l'acuité des sons est pareillement excessive, lorsqu'on les compare à ceux que produisent les vibrations transversales, pour d'égales longueurs. C'est pourquoi il faut employer des verges très-longues pour pouvoir les apprécier. Du reste, les circonstances du mouvement initial peuvent être variées de la même manière. Le son fondamental le plus grave s'obtient en tenant la verge entre les doigts à son milieu, et frottant une de ses moitiés vers son extrémité libre. Si l'on désigne par 1 le nombre de vibrations qui caractérise ce premier son, les nombres analogues pour tous les sons que l'on peut tirer de la même verge seront : 1 2 3 4.. n ., de sorte que si l'on appelle ut_1 , le son fondamental, les autres seront ut_2 , sol_2 , ut_3 , mi_3 , ut_4 , etc. Une verge en verre ou en métal, de deux mètres de longueur, donne les six premiers sons, depuis ut_1 jusqu'à ut_4 , avec un degré d'acuité assez modéré pour qu'ils soient parfaitement appréciables. Mais, lorsque l'on emploie des verges de verre, il faut avoir soin de ne pas leur imprimer des vibrations trop fortes, sans quoi elles se brisent avec la

plus grande facilité, et cela arrive sur-tout quand, après avoir promené le drap mouillé dans un sens, on le ramène subitement dans le sens opposé. Vraisemblablement la rupture résulte de ce que les dilatations, ou les compressions successives des particules du verre, deviennent plus grandes que ne le comporte leur cohésion; cet inconvénient s'évite en soudant, à l'une des extrémités de la verge et sur le prolongement de sa longueur, un petit tube sur lequel on opère la friction. Ce petit tube, par ses pulsations, excite la verge à vibrer, sans pouvoir, à cause de son peu de masse, altérer sensiblement les modes de mouvemens qui lui sont propres; de sorte qu'il ne reste plus qu'à toucher celle-ci, dans les points que l'on veut rendre immobiles, pour en obtenir les divers genres de vibration auxquels elle peut se prêter.

Nous venons de voir que la série des sons successifs est la même pour les verges rigides et pour les cordes, lorsque les uns et les autres exécutent des vibrations longitudinales; cela semble, au premier coup d'œil, une conséquence naturelle et nécessaire de leur constitution commune. Dans la verge, de même que dans la corde, si elles sont toutes deux cylindriques, on peut concevoir le mouvement longitudinal comme imprimé d'abord à une seule tranche, qui le transmet ensuite à toutes les autres, en vertu de sa réaction élastique, qui la ramène vers son point de repos. Selon cette manière d'envisager le phénomène, si la verge et la corde sont l'une et l'autre bien cylindriques, leur grosseur ne devra avoir aucune influence sur les sons qu'elles rendent par l'effet des vibrations longitudinales, puisqu'il paraît simple de croire que toutes les parties d'une même tranche sont transportées ensemble et parallèlement les unes aux autres, dans chaque vibration. Cette constance des sons, indépendamment de l'épaisseur, est en effet confirmée par l'expérience. Mais le parallélisme des tranches paraît ne pas avoir lieu, du moins dans les limites d'épaisseur qu'il faut donner aux verges pour conserver leur rigidité. C'est ce que semblent indiquer le nombre et les dispositions des lignes nodales qui se forment sur leur surface, et que l'on peut rendre sensibles à l'aide du sable; car ces lignes ne sont

nullement correspondantes à celles que supposerait le parallélisme des tranches appliqué à la succession des sons observés. Cette remarque importante a été faite pour la première fois par M. Savart.

Parmi tous les modes de vibrations longitudinales qu'une même lame rigide peut éprouver, il en est un que l'on pourrait appeler spontané, parce que chaque lame le prend comme d'elle-même. On l'obtient, comme M. Savart l'a fait voir, en tenant légèrement la lame par son milieu entre les doigts, et la frappant à ses bouts dans le sens de sa longueur avec une clef ou tout autre corps solide. Alors, si l'on a répandu d'avance du sable sur sa surface, il se forme une certaine série de nœuds, toujours la même pour la même plaque, soit qu'on la frappe à l'un ou à l'autre de ses bouts. Mais, ce qui est encore bien plus remarquable, retournez la lame en sorte que sa surface supérieure devienne l'inférieure, et réciproquement; puis, recouvrez de sable cette nouvelle surface, et recommencez à frapper la lame à ses bouts. Le sable prendra bien, de nouveau, un mode d'arrangement déterminé et constant par quelque bout qu'on frappe; mais la distribution des lignes nodales sera tout autre qu'elle n'était pour la première surface; et cela, soit que la lame frappée soit de verre, de bois, de métal ou de tout autre corps solide. L'in outre, si son épaisseur est au moins de 2 ou 3 millimètres, les lignes nodales des deux surfaces seront alternatives; celles d'une surface correspondant aux milieux des parties vibrantes de l'autre. Ainsi de pareilles lames, quoique homogènes pour toutes nos épreuves, semblent avoir leurs deux surfaces dans un état dissemblable, et offrir, pour ainsi dire, un endroit et un envers que la diversité de leur mode de subdivision fait apercevoir.

Cet état spontané de subdivision que prend chaque verge ou plutôt chaque surface, varie selon le point par lequel on touche la verge pour la soutenir entre les doigts. Dans chaque cas, on n'entend qu'un seul son appréciable qui correspond à la division principale établie dans la verge par le point de contact. Cependant la multiplicité des lignes no-

dales indique qu'il se produit en même temps d'autres sons dont les vibrations sont plus rapides que celles du son apprécié. Peut-être ne serait-il pas invraisemblable d'imaginer que les sons inappréciés correspondent à autant de termes de la série de ceux que la verge peut produire, et qu'ils sont imperceptibles à l'oreille à cause de leur acuité excessive, ou de leur faiblesse, ou enfin parce qu'ils se marient au son fondamental de manière à ne produire avec lui qu'une seule sensation.

L'analogie des sons rendus par les verges cylindriques rigides, avec ceux que l'on tire des colonnes cylindriques d'air contenues dans les tuyaux des instrumens à vent, a permis de conclure, d'après le son des premières, le temps que le son emploie à se propager dans toute leur longueur à travers la substance dont elles sont formées. M. Chladni a déterminé ainsi la vitesse du son dans un grand nombre de substances solides. Ses résultats sont tout-à-fait conformes à ceux que M. Laplace a tirés de la théorie. Ils s'accordent aussi avec les observations que j'ai rapportées précédemment, sur la transmission directe du son à travers le métal de fonte. Enfin, M. Savart a eu l'occasion de les confirmer pour le cas des tiges de verre. Tout cela prouve que l'on peut compter sur leur justesse; et il est heureux qu'on ait eu ainsi la possibilité d'en obtenir de nouvelles preuves; car la complication précédemment inconnue des mouvemens que les verges rigides exécutent dans leurs vibrations longitudinales, pouvait jeter des doutes fondés sur l'analogie que l'on avait supposée entre ces vibrations et celles des colonnes aériennes, analogie sur laquelle on s'était appuyé, pour y calculer la vitesse du son dans les matières solides qui les composaient.

Enfin les verges *droites* sont encore susceptibles d'un autre mode de vibrations, que M. Chladni a nommées *tournantes*, et qu'il serait peut-être plus juste d'appeler *spirales*. Lorsque nous avons exposé les effets de la torsion sur les fils élastiques, nous avons vu que, si l'on torde un pareil fil d'un certain nombre de degrés, il tend à revenir à sa position primitive, et qu'il y revient en effet par une suite d'oscillations, dès qu'on l'abandonne à lui-même. De plus, nous

avons trouvé que, pour des tensions et des longueurs égales, les vitesses des oscillations croissent comme les carrés des diamètres des fils. Si donc, au lieu d'un fil très-mince, nous prenons une verge cylindrique assez grosse et assez roide pour se soutenir d'elle-même quand elle sera arrêtée par un de ses points, les oscillations résultantes de la torsion pourront devenir assez rapides pour produire un son. C'est ainsi que se produisent les vibrations spirales.

Nous n'avons jusqu'ici considéré que les verges rigides droites. Mais si l'on veut en employer de courbes, on conçoit que leur forme influera sur la nature des mouvemens dont elles sont susceptibles, et par suite sur les sons qu'elles feront entendre. C'est aussi ce que l'on peut voir dans le *Traité général*. Je me bornerai ici à un seul exemple, celui des verges courbes, nommées *diapasons*, qui servent à régler le ton des instrumens de musique. On en voit la forme *fig. 20*. Les deux branches AC, A'C', sont un peu plus écartées, à leur base CC', qu'elles ne le sont à leurs extrémités A et A'. On introduit entre elles un cylindre métallique FF, qui peut entrer librement en CC', mais qui ne peut sortir en AA' qu'en forçant les deux extrémités libres de la fourche à s'écarter l'une de l'autre. Lorsqu'il est sorti, elles reviennent sur elles-mêmes avec vitesse, et se mettent ainsi en vibration sonore. Quand on les ébranle toujours de la même manière, le son qu'elles rendent est le même aussi, et fournit par conséquent un type invariable sur lequel on peut régler le ton d'un instrument quelconque, en accordant à son unisson celle des touches, ou des notes de l'instrument, qui doit tenir la même place dans les octaves. Les fourches destinées à cet usage ont à leur base un prolongement M qui forme une sorte de pied sur lequel elles peuvent se tenir droites; et cela permet, lorsqu'on les a mises en vibration, de les poser sur la caisse de l'instrument, ou en général sur une table sonore qui en renforce le son par ses vibrations correspondantes. Dans ce cas, lorsque le pied de la fourche est un peu large, on la voit sautiller sur la table sonore par la réaction de ses mouvemens; et, lorsque ces chocs réitérés se suc-

cèdent avec assez de vitesse, ce qui dépend du ton que le diapason exprime, il en résulte un son secondaire appréciable, toujours plus grave que le son principal. Le diapason simple, tel que je viens de le décrire, ne peut donner qu'une note; mais on forme des diapasons composés de plusieurs fourches montées à côté les unes des autres sur une même table sonore, et graduées de manière à donner les douze demi-tons qui doivent composer une octave toute entière, selon le système de tempérament dont on veut faire choix. Alors, quand on veut accorder un instrument, on commence par mettre à l'unisson du diapason tous les sons de l'octave qui doit y correspondre; après quoi toutes les autres notes se dérivent de celles-là par l'accord d'octave, qui est extrêmement facile à saisir. De cette manière, on évite toute la peine qu'il faudrait prendre pour réaliser immédiatement le tempérament sur l'instrument qu'on veut accorder. Il est vrai que cette peine est bien réduite lorsqu'on veut se servir d'un monocorde vertical, où l'on peut prendre de même rigoureusement chaque ton, d'après une échelle graduée; mais les amateurs de musique ne sont pas tous en état de calculer les nombres de cette échelle pour chaque système de tempérament, au lieu que rien ne leur est si facile que de répéter les sons donnés par le diapason. Il est digne de remarque que ces appareils, lorsqu'ils sont construits par les accordeurs les plus habiles, sont exactement réglés sur le tempérament égal, comme on peut s'en assurer par le monocorde. En les employant, il faut avoir soin de faire vibrer chaque fourche isolément, et d'arrêter ses vibrations, en la touchant, quand on a accordé la note qu'elle représente. Car les vibrations simultanées de plusieurs notes voisines produiraient d'horribles discordances, et occasionneraient des battements par leur coïncidence accidentelle, comme nous l'avons expliqué page 379. Le diapason composé offre même un moyen très-simple de vérifier ce phénomène.

On a fait usage de la vibration des verges élastiques pour la construction d'un instrument de musique appelé le *trochléon*. Je l'ai décrit en détail dans le *Traité général*, et il est d'autant plus intéressant qu'il réunit l'application la plus complète de tous les résultats relatifs à ce genre de vibrations.

CHAPITRE VII.

Vibrations des corps rigides ou flexibles, agités dans toutes leurs dimensions.

LES vibrations des cordes et des verges droites sont les seules, parmi celles des corps rigides, que l'on ait pu jusqu'à présent soumettre au calcul, de manière à en tirer les lois des mouvemens et les rapports des sons; c'est pourquoi nous les avons expliquées en détail. Pour les autres cas où les corps doivent être considérés avec toutes leurs dimensions, l'expérience seule peut nous guider; et elle a fait connaître un petit nombre de résultats généraux que nous allons rapporter ici.

Généralement, lorsqu'un système rigide de forme quelconque exécute des vibrations soit transversales, soit longitudinales, desquelles résulte un son soutenu, ce système se partage en un certain nombre de parties qui exécutent leurs vibrations séparément, sans se gêner les unes les autres, et qui sont douées à chaque instant de mouvemens alternatifs. De là il résulte que les points par lesquels ces parties se joignent, ne participent ni au mouvement de l'une ni au mouvement de l'autre, et restent par conséquent immobiles; ce que l'on peut rendre sensible pour les surfaces horizontales, en y versant du sable fin et sec, qui s'accumule dans les *lignes nodales*. La possibilité de ce partage et de cette alternative de mouvemens soumis à une période commune, paraît être la condition essentielle de laquelle dépendent toutes les manières de vibrer que chaque système rigide peut admettre, selon les circonstances initiales où on le place; et, si on ne peut les prévoir d'avance, du moins, lorsqu'on les a une fois produites, on peut les reproduire encore en plaçant des obstacles légers sur les lignes nodales, et passant un archet sur une des parties qui doivent entrer en vibration. Mais, malgré ces précautions, on est quelquefois trompé dans son attente, parce que les mêmes portions de lignes nodales peuvent appartenir à plusieurs modes de vibrations différens; de sorte que, pour obtenir particulièrement celui qu'on désire, il faut, comme dans les vibrations

des cordes, rendre son indication plus complète en multipliant la désignation des points qui doivent rester en repos.

Le plus simple des systèmes rigides que l'on puisse étudier de cette manière, c'est, après les verges, les surfaces planes; on a même, dans ce cas, l'avantage de trouver encore quelque secours dans le calcul, parce que les mouvemens de ces surfaces sont assujettis à une équation différentielle, que M. Poisson a le premier démontrée, et qui donne une relation générale à laquelle ils doivent toujours satisfaire. Pour ce genre d'expérience, il faut se procurer des plaques de verre ou de métal de diverses formes, et, autant qu'il est possible, d'égale épaisseur et de densité uniforme. Par cette raison, le verre de vitre est préférable aux plaques de glace qui, étant plus épaisses, admettent de plus grandes inégalités de constitution intime; et même les lames de verre mince ne sont pas toujours exemptes de ce défaut. Quelles que soient les plaques sur lesquelles on opère, pour leur donner un appui qui leur permette de résister, en laissant à leurs mouvemens toute la liberté possible, on les pince entre les doigts, en établissant le contact sur quelque une des lignes que l'on veut laisser en repos; ou mieux encore, comme l'a fait M. Savart, on adapte à l'un de leurs points une petite tige de bois très-mince que l'on fixe avec du mastic dur ou de la cire d'Espagne, et on les tient par cette tige comme par une espèce de manche, *fig.* 21. Alors, pour déterminer le mouvement, on les frotte avec un archet sur leurs bords qui, par conséquent, doivent être préalablement adoucis et usés à l'émeri. Pour rendre les lignes nodales sensibles, on répand sur la plaque du sable fin et sec, comme je l'ai dit plus haut.

Dans les plaques carrées de verre, de métal, en général de constitution homogène, la *fig.* 22 est celle qui donne le son le plus grave: elle est formée de deux lignes droites menées par le centre de la plaque parallèlement à ses côtés. On l'obtient en serrant la lame au centre, si elle n'est pas tenue par une tige, et la mettant en mouvement près d'un angle. Les rayons de cette figure peuvent quelquefois se changer en quatre courbes qui joignent les milieux des côtés de la plaque.

Le son le plus grave, après le précédent, est donné par

la *fig.* 23; alors les lignes nodales passent par les diagonales. Pour l'obtenir, il faut encore serrer la plaque à son centre, si elle est libre, et appliquer l'archet au milieu d'un des côtés. De cette manière, il est impossible qu'il se fasse en ce milieu une ligne de repos, comme dans la figure précédente, et cette ligne va s'établir aux angles, symétriquement, de part et d'autre du point ébranlé. Le son ainsi obtenu est la quinte aiguë du premier.

Dans les plaques circulaires, le son que l'on obtient avec le plus de facilité est tel que la plaque se divise en quatre secteurs égaux, séparés par deux diamètres rectangulaires, *fig.* 24. On détermine ce mode de vibration en touchant du doigt un quelconque des points du contour de la plaque par où l'on veut qu'un des diamètres passe, et l'on applique l'archet à 45° de ce point.

En variant les points d'application de l'archet, et la forme des plaques, on obtient beaucoup d'autres figures, par exemple des systèmes de droites parallèles, *fig.* 25, et aussi des cercles et des hyperboles. Mais ce qui précède suffit pour faire comprendre la possibilité de ces résultats. Si l'on désire plus de détails, on les trouvera dans le *Traité général*.

Tout ceci s'applique seulement aux plaques de constitution homogène; mais si l'on trouvait une plaque dont l'élasticité en différens sens fût inégale, il est évident que les modes de vibrations, et par conséquent les figures nodales, devraient changer. C'est ce que M. Savart a fort ingénieusement réalisé en substituant aux plaques de verre ou de métal des plaques de bois dont le plan était parallèle à la direction longitudinale de leurs fibres. Les vibrations de ces plaques diffèrent des premières par plusieurs particularités qui tiennent évidemment à ce que leur réaction élastique est beaucoup plus grande dans le sens de leurs fibres que dans le sens transversal. Par exemple, si la forme des plaques est circulaire, la division en quatre secteurs égaux s'y obtient de même que dans les plaques homogènes, et tient le même rang dans la série des sons successifs. Mais la direction des diamètres n'y est plus libre comme dans les plaques homogènes; l'un d'eux est toujours dirigé dans le sens des fibres, et cette situation

est tellement forcée qu'il n'est pas du tout besoin de poser le doigt en cet endroit du contour de la plaque pour déterminer la formation de la ligne nodale ; elle se forme d'elle-même par le seul jeu de l'élasticité inégale. En outre , ce mode de subdivision ne répond pas au plus grave des sons que les plaques puissent prendre ; car M. Savart en tire deux autres inférieurs ; l'un présente la division de la plaque en deux demi-cercles séparés par un diamètre unique, qui peut être indifféremment dirigé dans tous les sens ; l'autre , plus grave encore , ne présente plus qu'un point nodal unique situé au centre de la plaque, et dans lequel le sable se condense. Il ne serait pourtant pas impossible que ce dernier son dépendît de la réaction de la tige qui sert de support à la plaque, et que le mode de vibration qui le produit appartînt au système total de la tige et de la plaque , et non pas à la plaque seule.

On a aussi fait quelques recherches sur les sons qui peuvent être produits par des membranes extensibles, tendues dans un plan, comme celles qui forment les tambours de toute espèce. Mais on a jusqu'ici obtenu peu de résultats certains sur cet objet. La difficulté est de mesurer exactement la tension , de la rendre égale dans tous les sens, et d'ébranler la membrane d'une manière toujours semblable. Il faut remarquer qu'alors l'élasticité agit sur les fibres de la membrane, par extensibilité et non par ressort, c'est-à-dire qu'elle agit dans le sens de la surface pour la contracter ou l'étendre, et non dans le sens de sa courbure pour la redresser ou l'infléchir.

Si l'on n'a pas encore été plus loin dans la théorie des vibrations des surfaces planes , on conçoit qu'à plus forte raison , on ne sait point déterminer théoriquement les vibrations des corps élastiques de forme plus composée. Tout ce que l'on connaît jusqu'à présent sur cet objet, se réduit aux conditions de symétrie que nous avons établies au commencement de ce chapitre. Dans cette multitude de phénomènes aussi divers que le sont les formes des corps qui les produisent, on peut distinguer les vibrations des vases dont les surfaces intérieures et extérieures sont de révolution autour d'un même axe , parce que ce genre de vibrations est em-

ployé dans les cloches et dans l'instrument de musique nommé *harmonica*. J'ai exposé les détails de ce dernier, dans le *Traité général*.

Tous les corps vibrans font entendre à-la-fois, outre leurs sons fondamentaux, une série infinie de sons d'une intensité graduellement décroissante. Ce phénomène est pareil à celui des sons harmoniques des cordes, mais la loi de la série des harmoniques est différente pour les différentes formes de corps. Ne serait-ce pas cette différence qui constituerait le caractère particulier du son produit par chaque forme de corps, ce que l'on appelle le *timbre*, et qui fait, par exemple, que le son d'une corde et celui d'un vase ne produisent pas en nous la même sensation? Ne serait-ce pas la dégradation d'intensité des harmoniques de chaque série, qui nous ferait trouver agréables, dans leur ensemble, des accords que nous ne supporterions pas s'ils étaient produits par des sons égaux; et le timbre particulier de chaque substance du bois et du métal, par exemple, ne viendrait-il pas de l'excès d'intensité donné à tel ou tel harmonique?

CHAPITRE VIII.

Des Instrumens à vent.

LES instrumens à vent sont généralement composés de tuyaux droits ou courbes, dans lesquels l'air est mis en vibration, suivant le sens de leur longueur, par divers procédés. Ces vibrations transmises à l'air extérieur y produisent un son qui devient appréciable lorsqu'elles sont assez rapides. Ainsi, dans les instrumens à vent, ce n'est pas le tuyau lui-même, mais la colonne d'air renfermée, qui est le corps sonore, et leur théorie est tout-à-fait pareille à celles des vibrations longitudinales des cordes dont nous avons parlé page 581.

Pour ébranler la colonne d'air renfermée dans un tuyau, de manière à lui faire produire un son, il ne faut pas la pousser ou la presser toute entière; ce qui ne ferait que la transporter parallèlement à elle-même, ou la condenser dans un plus

petit espace; il faut exciter en un de ses points, à une de ses extrémités, par exemple, une succession rapide de condensations et de dilatations alternatives, telles que celles qui résulteraient des allées et venues d'un corps solide mis en vibration. Ces mouvemens alternatifs, transmis à toute la colonne d'air, la déterminent à osciller dans le sens de sa longueur, et y excitent des ondes sonores, pareilles à celles que nous avons décrites en traitant de la propagation du son.

Le moyen le plus simple de produire cet ébranlement consiste à souffler dans le tuyau, de manière à ce qu'une lame mince d'air, mise en mouvement avec rapidité, vienne se briser contre le tranchant de ses bords; c'est ainsi, par exemple, que l'on siffle dans une clef forée. En général, ce que l'on appelle *sifflet*, n'est qu'un tuyau cylindrique, *fig. 26*, taillé en biseau à son orifice, au-devant duquel est placé un canal étroit qui sert à souffler de l'air contre le taillant de ce biseau. A mesure que le tuyau est plus long, le son ainsi produit devient plus grave. On emploie une disposition analogue dans les tuyaux d'orgue, que l'on appelle *tuyaux à bouche*, et qui sont représentées *fig. 27* : ils sont composés d'un *corps* cylindrique BBHH, ouvert ou fermé par un bout HH. A l'autre bout est une ouverture latérale LLL, que l'on appelle la *bouche*, parce que c'est elle qui fait *parler* le tuyau. La partie B' L' des parois qui est au-dessous de cette ouverture est aplatie et rentrée en dedans, de manière à former un angle d'environ $22^{\circ}\frac{1}{2}$ avec l'axe du système. On la nomme la *lèvre inférieure*. La partie opposée BL, située au-dessus de la bouche, est rentrée de même; on la nomme la *lèvre supérieure*. C'est contre elle que vient se briser la lame d'air qui met la colonne en vibration. Pour cela on adapte fixement, à l'origine du tuyau, un cône creux *bbc*, que l'on nomme le *piéd*, parce qu'il sert de piéd au tuyau quand il est placé verticalement. Ce cône est ouvert à sa pointe *c* pour recevoir le vent des soufflets, et il est fermé à sa base par une lame métallique *bb*, qui laisse seulement près de la lèvre inférieure un petit intervalle longitudinal FF, que l'on appelle la *lumière*, et qui sert au passage de l'air. Le bord de la lame qui aboutit à

cet intervalle, est taillé à tranchant vif, et a reçu, par cette raison, le nom de *biseau*. L'appareil étant arrangé, on souffle de l'air dans le pied du tuyau; cet air s'échappe par la lumière IF en formant une lame mince qui va se briser contre la lèvre supérieure BL. Si la direction de cette lèvre est convenablement disposée par rapport à la lame d'air, l'air du tuyau se met en vibration sonore; mais si elle est trop rentrée en-dedans ou trop retirée en-dehors, le tuyau parle mal, ou ne parle pas du tout. En conséquence, on modifie peu-à-peu l'inclinaison de la lèvre, jusqu'à ce que le tuyau rende un son net et pur. L'ouverture plus ou moins grande de la bouche est aussi un élément essentiel à considérer. Si le bas de la lèvre BL est trop éloigné de la lumière, la bouche sera trop large pour la quantité d'air que les soufflets donnent, et le tuyau parlera mal, ou même ne parlera pas du tout. Si, au contraire, la lèvre BL descend trop bas, l'ouverture de la bouche sera trop étroite et le tuyau *octaviera*; c'est-à-dire qu'il ne rendra pas le son fondamental qui convient à sa longueur, et qui est toujours le plus plein de ceux qu'il peut rendre; mais il en fera entendre quelque autre plus élevé. On conçoit qu'il est plus facile de remédier à cet inconvénient qu'à l'autre, puisqu'il suffit de rehausser la lèvre supérieure pour l'amener au degré convenable. Aussi commence-t-on toujours par la faire plus basse qu'elle ne doit être, et on la coupe peu-à-peu jusqu'à ce que le tuyau, mis en place, donne le son fondamental qu'on en attend. L'ouverture de la bouche, celle de la lumière et la longueur des lèvres sont assujetties à des proportions que l'expérience a fait connaître, et qui influent sur la beauté des sons. Il y a aussi des rapports à observer entre la longueur et la grosseur des tuyaux, pour qu'ils parlent le mieux possible. En général, la lame mince d'air dirigée parallèlement à la colonne contenue dans le tuyau, semble produire sur elle le même effet que le frottement dans les vibrations longitudinales des cordes. Pour qu'elle détermine des vibrations régulièrement continuées, il faut qu'elle frappe la lèvre supérieure avec un certain degré de force proportionné à la masse d'air qu'elle doit ébranler, et d'autant plus considérable que le tuyau est

plus large. Le seul souffle de la poitrine suffit pour les petits tuyaux. C'est ainsi, par exemple, que l'on joue de la flûte-traversière. Dans cet instrument, c'est avec les lèvres que l'on dirige le souffle, de manière qu'il aille frapper obliquement le bord tranchant d'un trou circulaire que l'on appelle l'*embouchure*; aussi ne réussit-on à faire résonner une pareille flûte qu'après s'y être quelque temps exercé. Mais on y parviendrait à coup sûr en dirigeant convenablement la lame d'air par des moyens mécaniques; et cela se trouvait réalisé dans le flûteur automate de Vaucanson. C'est aussi là l'objet de la configuration particulière que l'on donne à la bouche des tuyaux d'orgue. Ils tirent le vent d'une caisse hermétiquement fermée, où l'air est condensé par des soufflets, et qui communique à chaque tuyau par une soupape que fait ouvrir la *touche* à laquelle ce tuyau correspond. Cet appareil se nomme une *soufflerie*, et le système des soupapes et de la caisse, sur laquelle les tuyaux s'ajustent, se nomme un *sommier*. Quand on veut étudier à fond la théorie des instrumens à vent, et analyser par des expériences exactes les curieux phénomènes qu'ils présentent, il faut nécessairement se procurer un semblable appareil construit sur de petites dimensions, tel, par exemple, qu'on les emploie dans les orgues portatifs. Il faut y joindre un assortiment de tuyaux de dimensions et de longueurs diverses, faits en bois, en métal, ou même en simple carton, avec quelques *pieds* en bois sur lesquels ils puissent s'ajuster successivement, comme on le voit *fig. 28*. Alors on pourra étudier les effets isolés de ces tuyaux et leurs rapports, en les plaçant sur le sommier, tantôt isolément, tantôt plusieurs à-la-fois. A mesure que l'on aura tiré un son de l'un d'eux, on le fixera en cherchant son unisson sur un petit orgue portatif ou sur un monocorde bien exact, et l'on pourra ainsi fort aisément suivre toute la série des résultats. L'orgue est surtout avantageux pour cet objet, à cause de la permanence de ses sons qui en rend la comparaison plus sûre, et qui permet d'en observer plus long-temps les caractères. Pour pouvoir graduer à volonté la force du vent que l'on emploie à faire parler chaque tuyau, on peut soulever la feuille supérieure du soufflet par un contre-poids que l'on augmente et diminue

à volonté, soit en y ajoutant de nouveaux poids ou en pressant dessus avec la main ou en le soulevant par un mouvement de bascule. La *fig. 28* représente la disposition la plus simple de ce régulateur.

Outre les tuyaux à bouche que nous venons de décrire, on en emploie aussi dans les orgues qui n'ont aucune ouverture latérale. Mais alors il y a dans l'intérieur, à l'origine du tuyau, un appareil vibratoire que l'on appelle *une anche*, et qui est mis immédiatement en vibration sonore par le courant d'air. Ces tuyaux, dont nous étudierons plus tard le mécanisme, sont nécessairement ouverts à leur extrémité pour laisser échapper l'air; mais cette condition n'est pas nécessaire pour les tuyaux à bouche. Ils peuvent être ouverts ou fermés : seulement ces deux dispositions donnent des sons différens dans la même longueur.

Il est facile de prouver que, dans ces tuyaux, c'est bien réellement l'air qui est le corps sonore. Pour cela, il faut en construire plusieurs, égaux en longueur et en diamètre, mais différens quant à la matière de leurs parois; puis on les ajuste successivement sur un même pied qui porte avec lui sa bouche et sa lumière, et qui ne sert absolument que pour pouvoir introduire la lame d'air qui détermine les vibrations, *fig. 28*. Alors, en soufflant par le trou *c*, on obtient toujours le même son et la même série de sons, quelle que soit la matière du tuyau, qu'il soit de bois, ou de cuivre, ou de plomb, ou de papier, pourvu que ses parois résistent; mais il faut avoir soin que, dans tous les cas, la distance de la lumière, à l'extrémité du tuyau, soit parfaitement la même, sans quoi la colonne d'air aurait des longueurs inégales, et les sons seraient différens. Je ne parle ici que du ton des sons, qui, en effet, ne dépend pas de la nature du tuyau; car pour cette autre qualité physique, dont nous avons parlé plus haut, et que l'on nomme le timbre, elle en dépend sans aucun doute. C'est par elle que le son d'un tuyau de verre se distingue parfaitement de celui que rend un tuyau de plomb ou de bois. Il est très-difficile d'en assigner la cause; mais il est cependant probable qu'elle tient au frottement de l'air contre la surface intérieure du tuyau, ou peut-être à une faible

vibration du tuyau lui-même, qui modifie les variations de la densité dans les différentes parties de chaque onde sonore.

Après avoir montré comment on peut tirer des sons des tuyaux à bouche ; après avoir prouvé que , dans ces expériences, c'est réellement l'air qui vibre et qui rend des sons, il nous reste à examiner la manière dont ces vibrations peuvent s'opérer d'après la nature et les propriétés physiques de l'air.

Considérons d'abord un tuyau cylindrique AB, *fig.* 29, en partie ouvert à son origine A, et fermé à son extrémité BB. Un tel tuyau, dans le jeu des orgues, se nomme un *bourdon*. Lorsqu'on y mettra l'air en vibration sonore, comme nous venons de l'expliquer tout à l'heure, la lame mince d'air, qui imprime le mouvement en A, agitera sans doute les premières couches aériennes suivant des lois compliquées ; mais nous verrons bientôt, par des expériences très-précises, que cette complication ne s'étend qu'à une petite distance de l'orifice A, après laquelle les mouvemens des différentes couches aériennes deviennent parfaitement réguliers et semblables ; du moins lorsque le son qui en résulte est lui-même constant et uniforme. C'est pourquoi, afin de simplifier le problème, nous considérerons d'abord le courant d'air qui sert de moteur, comme agissant uniquement sur une première couche infiniment mince, au-delà de laquelle le mouvement se communique avec régularité jusqu'à l'extrémité fermée du tuyau. Nous admettrons en outre que ce courant se renouvelle sans cesse en A avec une vitesse et une densité invariables ; circonstance qui, d'après l'observation, est nécessaire pour obtenir un son soutenu et uniforme. Ainsi, dans tous les modes d'oscillations que pourra prendre la colonne d'air vibrante, la lame mince d'air qui affleure son orifice, et que l'on peut considérer comme sa première couche, ne fera qu'entrer un peu dans le tuyau, et en sortir tour à tour, sans éprouver ni condensation ni dilatation.

Des ébranlemens pareils', répétés périodiquement avec une succession très-rapide, devront, comme les vibrations d'un corps sonore, exciter dans la colonne d'air des ondula-

tions d'une longueur constante α , mais alternativement condensantes et raréfiantes, qui, partant de l'orifice, se propageront vers le fond du tuyau avec la vitesse ordinaire du son. Arrivées à l'extrémité fermée B, elles se réfléchiront sur elles-mêmes dans le sens BA, et continueront à se propager dans cette nouvelle direction, exactement comme elles l'auraient fait si la colonne d'air se fût continuée au-delà du fond B. De plus, ces deux séries d'ondulations directes et rétrogrades, n'excitant dans la colonne d'air que des agitations très-petites, leurs effets se superposeront sans se confondre, et l'état des couches d'air sera le même que si elles étaient sollicitées à chaque instant par la somme de ces deux impulsions. Pour en suivre les effets, considérons d'abord la première onde, que nous supposerons produite par condensation, et saisissons-la, par la pensée, au moment où son milieu atteint précisément le fond du tuyau. Alors le commencement O de cette onde, *fig. 30*, déjà ramené par la réflexion, coïncide en M avec sa fin O₁; et si, pour plus de simplicité, nous supposons d'abord ses deux moitiés exactement symétriques, les condensations des couches d'air M m μ , dans lesquelles elles se superposent, se trouvent partout exactement doublées. Ainsi leur intensité est nulle en M aux extrémités de l'onde, et de là elle va en augmentant jusqu'au fond du tuyau. Mais il n'en est pas de même des vitesses de translation. Celles-ci étant égales, et rendues contraires par la réflexion, dans les deux moitiés de l'onde, se détruisent exactement sur toute l'étendue BM. Cet état d'équilibre ne dure qu'un instant; la deuxième onde directe O₁ O₂, et l'onde réfléchie OBO₁, continuant leur marche, la couche aérienne M, située à la distance $\frac{1}{2} \alpha$ du fond B, éprouve à-la-fois les dilatations apportées par l'une, et les condensations ramenées par l'autre. Ces influences sont égales si toutes les ondes sont pareilles, comme cela semble résulter de la constance de l'impulsion primitive et de la permanence du son; alors leurs effets opposés se détruisent exactement, de sorte que la couche dont il s'agit reste dans son état de densité naturel. En suivant de même les progrès successifs des différentes ondes, suppo-

sées toutes d'une longueur constante α , et alternativement condensantes et raréfiantes, on verra que la couche aérienne M conserve toujours cet état invariable de densité. Mais pour cela elle ne reste pas immobile; car l'action directe de l'onde raréfiante $O_1 O_2$ l'entraînera dans le même sens que l'action réfléchie de l'onde condensante OO_1 , et il en sera toujours de même par la suite. Ces deux forces étant toujours égales et conspirantes, le seul instant d'immobilité de la couche sera celui où elles sont nulles; c'est-à-dire celui où les extrémités des deux ondes coïncideront. Et cela arrivera périodiquement à des époques équidistantes, $T, 2T, 3T$, etc., dans lesquelles l'intervalle constant T sera le temps nécessaire pour la propagation entière d'une onde de la longueur α .

Considérons maintenant une autre couche aérienne N_1 , dont la distance au fond B soit α , c'est-à-dire égale à la longueur totale des ondes. Cette couche sera d'abord ébranlée par la première onde condensante directe OO_1 ; puis elle le sera par la deuxième onde raréfiante $O_1 O_2$, qui agira encore sur elle isolément, car elle est traversée par la dernière extrémité O_2 de cette onde lorsqu'elle commence à ressentir la réflexion de la première. A cet instant la couche N_1 se trouvera dans sa position primitive d'équilibre, et dans son état de densité initial. Or, je dis qu'à compter de cette époque, si les ondes qui se succèdent ont toujours une longueur constante, la couche N_1 n'éprouvera plus jamais aucun déplacement, car elle subira toujours à-la-fois l'action opposée de deux ondes de même nature, condensantes ou raréfiantes, mais dont l'une sera directe et l'autre sera réfléchie. Elle restera donc immobile entre les deux forces de translation de ces ondes, mais elle subira la somme des condensations ou des raréfactions qu'elles apportent. Il en sera de même des couches aériennes N_2, N_3, \dots situées aux distances $2\alpha, 3\alpha, \dots$ du fond B ; et cela aura lieu aussi pour la couche d'air contiguë à ce fond lui-même, parce que le mouvement de translation, produit par chaque point de l'onde directe, s'y trouve détruit immédiatement par la réflexion,

En étendant successivement ces considérations à toutes les parties de la colonne d'air comprises entre le fond du tuyau et son orifice, on verra que, lorsque la superposition des deux systèmes d'ondes directes et réfléchies sera complète, cette colonne se trouvera constamment partagée en un certain nombre de parties vibrantes, d'une longueur α , dont les extrémités seront fixes, et les directions de mouvemens alternativement contraires. C'est ce que représente la *fig. 31*, où les mouvemens des couches successives sont désignés par des flèches placées au-dessous : en sorte qu'il y aura, par exemple, à une même époque, condensation en B, raréfaction en N_1 , condensation en N_2 , raréfaction en N_3 , et ainsi de suite dans toute l'étendue de la colonne d'air mise en vibration. Sur quoi il faudra bien se rappeler que les condensations ne doivent pas être uniquement limitées aux points B, N_2 , N_4 ... ni les raréfactions aux points N_1 , N_3 ...; mais que le passage d'un de ces états à l'autre sera progressif, en sorte qu'entre ces extrêmes, en M_1 , M_2 , M_3 , par exemple, il se trouvera des particules qui ne seront ni raréfiées ni condensées; et ce seront là les endroits où le mouvement de translation alternatif en avant et en arrière sera le plus considérable.

Or, d'après ce que nous avons déjà remarqué, ce dernier état doit être précisément celui de la mince lame d'air qui imprime le mouvement à toute la colonne, en effleurant l'orifice du tuyau. Il faudra donc que la longueur des ondulations soit proportionnée de manière à ne point faire varier la densité de cette lame; alors ses mouvemens seront tels que l'exige son rang parmi les autres couches, et elle ne troublera point leur continuité. Elle ne fera, pour ainsi dire, que répercuter contre l'air extérieur toutes les vibrations que la colonne exécute dans le tuyau. De là naîtront, dans l'air environnant, de nouvelles ondes sonores de la même longueur α , qui, se propageant au dehors du tuyau, transporteront partout avec elles la sensation du son correspondant à leur longueur.

D'après cette théorie, les divers modes de vibrations ré-

gulières, que la colonne d'air contenue dans le tuyau pourra prendre, seront toujours assujettis à deux conditions uniques, savoir : que le fond bouché du tuyau soit un nœud de vibration où les particules aériennes restent immobiles ; et que l'orifice ouvert devienne le milieu d'une onde où il ne se fasse point de variations sensibles de densité. Ces deux conditions, dérivées du principe unique de la constance des ondes, peuvent être remplies d'une infinité de manières, d'où résultent autant de modes de vibrations que la théorie indique, et que l'expérience confirme avec la plus parfaite précision.

Le plus simple de ces modes est celui dans lequel l'étendue des ondes est double de celle du tuyau, en sorte que la moitié d'une onde occupe toute sa longueur, *fig. 32*. Alors la colonne d'air oscille sans se diviser, de A vers B, et de B vers A. La densité en A est constante comme elle doit l'être ; mais, de là, jusqu'au fond B, les contractions ou les dilatactions vont continuellement en croissant ; les premières ayant lieu quand la colonne s'avance de A vers B, et les autres quand elle revient de B vers A. Si, au contraire, on considère le mouvement de translation des particules, on devra concevoir qu'il est toujours nul en B, au fond bouché du tuyau, où elles sont arrêtées par sa résistance, et que de là l'étendue des excursions va en augmentant jusqu'à l'orifice ouvert A, dans lequel une petite portion presque insensible du courant d'air qui fait vibrer la colonne entre et sort alternativement.

Il ne reste donc qu'à déterminer la durée de ce genre de vibrations ; et c'est ce qui est bien facile. Car, lorsqu'une onde sonore se propage dans une colonne d'air cylindrique, et ébranle successivement chacune de ses couches, nous avons vu que sa marche est exactement égale à la vitesse du son. Donc, dans nos tuyaux, si l'allée et le retour formaient une longueur totale de 1024 pieds, l'onde sonore égale à cette longueur mettrait précisément une seconde à s'y propager ; et ainsi il n'y passerait, en une seconde, qu'une seule onde pareille. Il en passerait deux si le double du tuyau n'était que de 512 pieds, moitié de 1024 ; et en général, s'il avait une

longueur quelconque l , il en passerait un nombre égal à 1024 divisé par le double de l , ce que nous représenterons par l'expression fractionnaire

$$\frac{1024}{2l}.$$

Quand la longueur du tuyau sera donnée, il ne faudra que la substituer au lieu de l , et effectuer la division. Le quotient exprimera le nombre de vibrations exécutées en une seconde de temps, par la colonne aérienne, pour le mode de vibrations que nous avons considéré, et dans lequel la longueur des ondes sonores est $2l$. Le son qui en proviendra est, comme on va bientôt le voir, le plus grave de tous ceux que le tuyau peut rendre.

Après ce mode de mouvement où il n'y a pas de nœud, le plus simple est celui qui produirait dans le tuyau un seul nœud immobile N_1 , N_1 , *fig. 33*, outre celui qui doit toujours exister au fond B . Dans ce cas, BN_1 est égal à la longueur totale des ondes sonores, et AN_1 est la moitié de cette longueur. La somme de ces deux quantités doit donc former la longueur totale du tuyau l ; ainsi l'onde BN_1 est les deux tiers de cette longueur ou $\frac{2}{3}l$; et conséquemment le nombre de ces ondes qui se succèdent en une seconde est égal à 1024 divisé par $\frac{2}{3}l$ ou

$$\frac{3 \cdot 1024}{2l}.$$

Les vibrations produites par ce mode de mouvement sont, comme on voit, trois fois plus rapides que les premières. Si le premier son est exprimé par 1 et désigné par ut_1 , le second sera exprimé par 3; ce sera donc l'octave de la quinte du son fondamental, ou sol_2 .

Supposons maintenant, *fig. 34*, deux nœuds de vibrations N_1N_1, N_2N_2 , où les particules aériennes soient immobiles. Dans ce cas, les distances BN_1, N_1N_2 devront être égales entre elles et à la longueur des ondes; la dernière division vers l'orifice devra, comme précédemment, être la moitié de cette longueur; il faudra donc que la somme de ces quantités, com-

posée de cinq demi-ondes, forme la longueur totale du tuyau l ; ainsi la longueur de chaque onde sera $\frac{2}{5}l$; et conséquemment le nombre de ces ondes qui se succèdent en une seconde, sera 1024 divisé par $\frac{2}{5}l$; ou

$$\frac{5 \cdot 1024}{2 l}$$

Les vibrations qui en résultent sont donc cinq fois plus rapides que les premières. Si le son fondamental donné par le premier mode est toujours exprimé par $ut_1 = 1$, celui-ci sera exprimé par 5, et répondra à mi_3 .

En continuant cette manière de raisonner, on trouvera que, si le son fondamental donné par le premier mode de vibration est représenté par 1, tous les autres sons que le tuyau peut rendre, formeront la suite de nombres impairs

$$1, 3, 5, 7, \dots \text{ etc.}$$

et, d'après la manière dont nous les avons successivement fait naître, on voit qu'il n'y aura entre eux aucun intermédiaire possible.

Si l'on veut substituer aux rapports des nombres de vibrations les expressions musicales qui leur correspondent, il n'y a qu'à représenter le premier son par ut_1 ; et alors tous ceux que peut rendre un tuyau ouvert par un bout et fermé par l'autre, formeront la série suivante.

$$\begin{aligned} 1 &= ut_1 \\ 3 &= sol_2 \\ 5 &= mi_3 \\ 7 &= la_3^* + \\ 9 &= ré_4 \\ 11 &= fa_4^* - \\ 13 &= la_4^b + \\ 15 &= si_4 \\ &\text{etc.} \end{aligned}$$

Cette succession peut se vérifier par l'expérience, et elle se réalise en effet avec une grande exactitude. Pour cela il faut placer un pareil tuyau sur le sommier portatif décrit page 413, et chercher les divers sons qu'il peut rendre, en forçant gra-

duellement le vent qu'on lui donne, pour obliger la colonne d'air à se subdiviser en un nombre de parties de plus en plus considérable. On peut aussi atteindre le même but en soufflant directement dans le pied du tuyau, avec une énergie progressivement graduée. Lorsqu'on est parvenu ainsi à en tirer un son soutenu, il faut le comparer, par unisson, à l'uné des touches d'un orgue bien accordé, où chercher cet unisson sur un monocorde divisé, ce qui détermine également le nombre de vibrations auquel il répond. Quel que soit le procédé que l'on adopte, on trouvera toujours que tous les sons que l'on peut tirer du tuyau, sont représentés par des termes de la série des nombres impairs, comme l'indique la théorie. Mais, pour pousser un peu loin cette épreuve, il ne faut pas employer des tuyaux réellement destinés à des orgues ou construits sur les proportions de grosseurs et de longueurs généralement adoptées pour cet instrument. Car, de tels tuyaux n'étant destinés que pour rendre chacun un seul son, qui est le plus grave de ceux qui conviennent à leur longueur, les artistes qui les fabriquent choisissent les dimensions que l'expérience fait connaître comme les plus convenables, pour que ce son-là soit plein et stable, et que le tuyau puisse très-difficilement s'en écarter. Aussi a-t-on beaucoup de peine à obtenir d'un pareil tuyau ses différens sons; et ce n'est qu'en forçant beaucoup le vent, que l'on contraint la colonne d'air qu'il renferme à se subdiviser dans ses vibrations. C'est pourquoi, lorsqu'on veut rendre la série des sons successifs bien sensible et prolongée, il faut employer des tuyaux beaucoup plus grêles que ceux dont les organistes font usage. Il est vrai qu'alors il devient plus difficile d'obtenir le son fondamental de chacun de ces tuyaux, la colonne d'air qu'ils contiennent ayant une extrême facilité à se rompre, à cause de sa grande longueur comparativement à sa largeur; mais on y parvient en modérant beaucoup la force du souffle; ce que l'on peut faire, soit en soutenant le soufflet si l'on emploie une soufflerie, soit en modérant soi-même l'impulsion si l'on souffle avec la poitrine. Dans tous les cas, si l'on n'obtient pas toujours le son le plus grave de tous ceux que le tuyau peut rendre, on obtiendra au

moins un des plus graves; et, en tirant successivement ceux qui le suivent, et les fixant à mesure sur un orgue ou sur le monocorde, puis comparant leurs valeurs, on verra qu'en effet ils suivent la série des nombres impairs; et l'on pourra, par cette série même, reconnaître si l'on a effectivement tiré le son fondamental, ou si l'on a commencé par un des termes plus élevés de la série.

Je me suis aussi servi, avec succès, de tuyaux du même calibre que ceux des orgues, en modifiant seulement la grandeur de leur embouchure, au moyen d'une petite lame de cuivre très-mince et plane, que je fais avancer par une coulisse dans le plan et sur le prolongement de leur lèvre supérieure, *fig. 35*. Je commence par faire parler ce tuyau dans son état naturel, la lame étant tout-à-fait retirée en arrière; puis, la soufflerie agissant toujours avec la même force, je fais saillir un peu la lame en avant; alors le tuyau commence à parler plus mal; puis il cesse de parler tout-à-fait; mais, en continuant d'avancer peu-à-peu la lame, on trouve un point où il recommence à parler de nouveau très-distinctement, et le son qu'il rend alors est exactement représenté par le nombre 3, si le premier l'est par 1. En continuant d'avancer la lame, le son 3 devient sans éclat, puis nul, et enfin l'on entend partir le son 5. On peut continuer ainsi tant qu'il reste une ouverture de bouche suffisante pour que le tuyau parle. A la vérité la saillie de la lame, en rétrécissant sa bouche, augmente d'autant la longueur de la colonne d'air renfermée dans le tuyau; mais, à moins qu'on ne s'élève à des subdivisions très-nombreuses, cet allongement sera peu de chose comparativement à la longueur individuelle des subdivisions comprises entre deux nœuds consécutifs, sur-tout si l'on emploie des tuyaux d'une longueur suffisante, comme de trois ou quatre pieds.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que de la comparaison des sons successifs qu'un même tuyau peut rendre; mais le ton absolu de chacun de ces sons est aussi exactement déterminé par notre théorie, d'après la longueur du tuyau et le mode de vibration, de sorte qu'on peut le réaliser d'avance sur le monocorde, et voir si en effet chaque tuyau s'y conforme selon

sa longueur. En faisant cette comparaison, on trouve que le son du tuyau est toujours un peu plus grave que la théorie ne l'indique. La différence tient au mode d'embouchure, comme nous le verrons plus loin.

Dans les modes d'oscillations que nous venons de décrire, il existe entre les nœuds de vibrations N_1, N_2, \dots d'autres points MM_1, \dots , *fig* 36, où les variations de densité sont tout-à-fait nulles, les couches aériennes qui s'y trouvent ne faisant qu'aller et venir en avant et en arrière. Supposons donc qu'en un de ces points tel que M , on perce un trou latéral qui permette à l'air du tuyau de communiquer librement avec l'atmosphère; cette communication ne portera aucun obstacle aux oscillations de la colonne intérieure en avant et en arrière, puisque la densité en M est constamment égale à celle de l'air du dehors. On pourra donc alternativement ouvrir et boucher cette ouverture, sans que le son en soit nullement altéré. C'est en effet ce que l'expérience confirme; et elle montre aussi que cette propriété est particulière aux points MM_1, \dots , comme il était facile de le prévoir.

Il y a plus, ce phénomène est indépendant de la grandeur de l'ouverture M . On peut l'étendre à tout le contour du tuyau, et séparer entièrement la partie MB , depuis le point M jusqu'au fond solide, le son n'en est nullement altéré; mais alors la première partie AM , comprise depuis la couche M jusqu'à l'embouchure, forme un tuyau entièrement ouvert à ses deux extrémités. Cette expérience nous apprend donc comment l'air vibre dans un pareil tuyau, *fig* 37; elle nous montre que les ondulations parvenues à son extrémité M la plus éloignée de l'embouchure, sont répercutées par l'air extérieur, non plus comme elles le seraient par un fond solide, mais de manière que cet air ne fasse qu'entrer et sortir en M à une petite profondeur, sans éprouver aucune variation sensible de densité. Ces allées et venues successives forment donc, au bout ouvert M , une sorte de contre-courant, dont les battements répondent à ceux de la lame d'air que l'on souffle en A . Les ondulations ainsi excitées à l'un et l'autre bout, se propagent de même, et se superposent, dans toutes les couches

d'air intermédiaires entre A et M. La seule condition nécessaire pour la continuité du mouvement de la colonne AM, sera donc que ces deux séries d'ondulations soient égales en longueur, comme le sont les ondes directes et rétrogrades dans un tuyau bouché à son fond, et qu'en outre, par l'effet de leur superposition, la densité puisse être constante à chaque orifice.

D'après cela, dans un pareil tuyau, le mode de vibration le plus simple sera celui où les deux orifices seront séparés par un seul nœud de vibration N_1 , *fig.* 38, dans lequel les molécules d'air seront immobiles. Alors les mouvemens de translation en A et en M devront toujours se faire au même instant dans des directions contraires, et produire des ondulations d'une longueur égale à celle du tuyau. Considérons d'abord les deux premières de ces ondulations; et, pour fixer les idées, supposons-les condensantes. En se propageant de part et d'autre vers l'orifice opposé, elles se rencontreront au milieu du tuyau en N_1N_1 ; et la couche située en ce point, les recevant toujours toutes deux au même instant, restera constamment immobile; mais elle éprouvera à-la-fois la somme des condensations ou des dilatations qu'elles apportent. Chaque ondulation continuant à se propager, celle qui est partie de A atteindra l'orifice M au moment où celle qui est partie de M atteindra l'orifice A. A cet instant, les variations de densité seront nulles dans les couches A et M, correspondantes aux extrémités de chaque onde, et de là elles iront en croissant vers le milieu du tuyau, où elles seront les plus grandes possibles, puisque ce point répondra alors au milieu des deux ondes. A partir de cette époque, les deux ondulations continuant à se propager, la condensation diminuera en N_1N_1 ; en même temps les couches extrêmes A et M, qui étaient entrées dans le tuyau à une petite profondeur, reculeront en arrière, par l'effet de leur mouvement oscillatoire. Ce retour fera naître près de chaque orifice une nouvelle ondulation rarefiante, qui suivra la première qui en était émanée. Ainsi le commencement de cette nouvelle onde atteindra le milieu du tuyau quand la fin de la première onde le quittera. Par l'effet de leur superposition, il arrivera qu'à cet instant les

condensations et les vitesses seront nulles dans toute l'étendue du tuyau ; après quoi l'onde raréfiante continuant à se propager, fera succéder les dilatations aux condensations. Celle-ci sera suivie d'une troisième ondulation qui sera de nouveau condensante ; et il en sera ainsi indéfiniment tant que l'on continuera d'entretenir en A le courant d'air continu qui imprime le premier ébranlement.

Il est bien facile de trouver le ton qui résultera de ce mode de vibration ; car, puisque la longueur des ondes est égale à celle du tuyau que nous avons désignée par l , le nombre des vibrations par seconde sera

$$\frac{1024}{l}.$$

On voit donc que le son qui en résulte est l'octave aiguë de celui que nous avons trouvé tout-à-l'heure pour un tuyau bouché, d'une longueur égale ; car il répond à un nombre double de vibrations. Ce sera là le son le plus grave que le tuyau pourra rendre, avec ses deux orifices ouverts.

C'est en effet ce que l'expérience confirme, du moins lorsque l'on opère sur des tuyaux assez longs pour que l'on puisse y négliger la petite irrégularité du mouvement des premières couches d'air situées en A, lesquelles, au lieu d'être ébranlées pleinement sur toute l'étendue de cet orifice, ne le sont que par une petite ouverture. Cet effet même peut se corriger par le calcul ; mais il devient insensible au-delà d'une certaine longueur des tuyaux.

Après le mode de vibrations que nous venons de considérer, le plus simple sera celui dans lequel il existe, entre les orifices, deux nœuds de vibrations N_1N_2 , *fig.* 39, dans lesquels les particules aériennes sont immobiles. L'intervalle de ces deux nœuds est évidemment égal à la longueur totale d'une onde, et de plus ils devront être également éloignés des deux orifices, puisque les ondes émanées de ces points sont égales ; alors N_1N_2 étant égale à la longueur d'une onde entière, MN_1 et AN_2 en occupent chacun une moitié. La somme totale, égale à deux ondes entières, devra donc former la longueur du

tuyau l ; ainsi la longueur de chaque onde sera $\frac{1}{2} l$, et il s'en succédera par seconde un nombre qui aura pour expression

$$\frac{2 \cdot 1024}{l}$$

Le son qui en résultera sera donc l'octave aiguë du son fondamental, de sorte que, si celui-ci est pris pour unité, et exprimé par ut_1 , l'autre, qui a pour valeur 2, le sera par ut_2 .

En continuant ce raisonnement, pour le cas de trois nœuds, quatre nœuds, et ainsi de suite, on trouve que la série des sons qui en résultent, le premier étant pris pour unité, comprend la série indéfinie des nombres naturels

$$1, 2, 3, 4, 5, \dots \text{etc.}$$

Ce seront donc là tous les sons que peut rendre un tuyau ouvert par les deux bouts; car, d'après la manière successive dont nous les avons fait naître, il est évident qu'il n'en saurait exister d'intermédiaire entre eux. Si l'on veut les exprimer par leurs dénominations musicales, en appelant le premier ut_1 , la traduction de la série donnera,

1 = ut_1	17 = $ré_5^b -$
2 = ut_2	18 = $ré_5$
3 = sol_2	19 = $mi_5^b -$
4 = ut_3	20 = mi_5
5 = mi_3	21 = $mi_5^* +$
6 = sol_3	22 = $fa_5^* -$
7 = $la_3^* +$	23 = $sol_5^b -$
8 = ut_4	24 = sol_5
9 = $ré_4$	25 = $sol_5^* -$
10 = mi_4	26 = $la_5^b +$
11 = $fa_4^* -$	27 = $la_5 -$
12 = sol_4	28 = $la_5^* +$
13 = $la_4^b +$	29 = $si_5^b +$
14 = $la_4^* +$	30 = si_5
15 = si_4	31 = $si_5^* -$
16 = ut_5	32 = ut_6

et ainsi du reste. Cette série de sons peut se vérifier par l'expérience, comme nous l'avons fait pour les bourdons, page 422.

et elle se réalise avec la plus grande fidélité. Elle s'applique généralement à tous les instrumens à tuyaux cylindriques, droits ou courbes, dont les deux bouts sont ouverts; par exemple, au cor, à la trompette, et même au serpent et aux flûtes, en supposant que l'on bouche les trous latéraux de ces deux instrumens.

Il y a une remarque curieuse à faire pour le son exprimé par 7; c'est que la plupart des musiciens qui sonnent du cor ou de la trompette, ne savent pas le donner. Car, après avoir obtenu le son le plus grave ut_1 , ils tirent aisément les sons $ut_2 = 2$, $sol_2 = 3$, $ut_3 = 4$, $mi_3 = 5$, et $sol_3 = 6$; après quoi l'instrument saute, comme par force, à la triple octave exprimée par 8, sans qu'ils puissent obtenir le son intermédiaire 7. Daniel Bernouilli prétend que cela tient à la difficulté de diviser une quantité en sept parties égales; mais alors il devrait être encore bien plus difficile d'obtenir le son correspondant au nombre 12, lequel, cependant, s'obtient sans peine. Je partage bien plutôt l'opinion de ce célèbre physicien, quand il dit que cette difficulté tient aussi au défaut d'exercice du musicien, qui n'a jamais besoin de tirer de son instrument le son exprimé par 7, parce qu'il n'est pas usité dans la musique, étant intermédiaire entre la_3^* et si_3 ; et la preuve que cette habitude est nécessaire pour obtenir à volonté tel son ou tel autre, c'est qu'elle l'est même pour les sons les plus faciles à produire, tels, par exemple, que ut_1 , ut_2 , sol_2 , ut_3 et mi_3 . C'est ce dont on peut se convaincre aisément en adaptant une embouchure à un tuyau de verre, ou de carton, et essayant de souffler avec la bouche dans le pied du tuyau, pour en tirer des sons. Car d'abord, on les entendra passer brusquement d'un ton à un autre, en sautant par-dessus plusieurs intermédiaires, selon le plus ou moins de force avec laquelle on souffle. Mais, quand on se sera aperçu de cet effet, on acquerra bientôt l'expérience nécessaire pour monter ou descendre d'un ton à un autre graduellement; et, lorsqu'on sera dans un de ces tons, on aura, pour ainsi dire, le sentiment du degré de force qu'il faut donner pour passer à un autre immédiatement supérieur ou inférieur,

comme je m'en suis assuré moi-même. Il est donc vraisemblable qu'avec beaucoup d'exercice, et en se faisant donner assidûment le son 7 par un monocorde, ou par un tuyau d'orgue, on parviendrait à l'obtenir également, et à donner avec précision la quantité de vent qu'il exige; car il y a pour cela des conditions indispensables, que l'expérience seule apprend à remplir sans qu'on y fasse attention. Le musicien a très-bien le sentiment de ces degrés pour les tons 6 et 8, qu'il emploie à chaque instant dans la musique, comme étant la quinte et l'octave du son 4, et il est tout simple qu'il tombe, comme par précipice, dans l'un ou dans l'autre, quand il essaie par hasard de produire le son 7, auquel il n'est point exercé. On aura plus de facilité pour l'obtenir, si, au lieu de souffler dans le tuyau avec la bouche, on le place sur un sommier portatif, auquel communique une soufflerie dont on puisse modérer la force. Dans une expérience de ce genre, que j'ai faite avec M. Hamel, nous sommes parvenus à obtenir le son 7 bien distinct et soutenu. Mais il nous a fallu nous aider encore d'un autre artifice, qui était d'approcher plus ou moins le doigt de la bouche du tuyau, quand nous avons produit les sons 6 ou 8, de manière à régler, pour ainsi dire, la direction de la lame d'air qui sortait de la lumière, et à la faire rentrer dans le tuyau. Alors, après quelques instans de bourdonnement et comme d'incertitude, on entendait sortir avec éclat le son 7, qui nous était bien facile à reconnaître, parce que son unisson sur un orgue qui nous servait de comparateur, répondait à un fa_4 , dont nous avons soin de faire parler de temps en temps la touche, pour acquérir le sentiment du mode de vibration que nous voulions exécuter.

En général, la table précédente montre que les tuyaux dont les deux bouts sont ouverts, ne peuvent, dans leurs octaves les plus graves, donner que des sons très-éloignés les uns des autres; par exemple, les deux premiers ut_1 , ut_2 diffèrent entre eux d'une octave entière. Mais, à mesure que le ton s'élève, c'est-à-dire à mesure que la colonne d'air se divise en un plus grand nombre de parties, les sons que l'on peut obtenir sont plus rapprochés. En s'élevant encore davantage, on commence à trouver même des intervalles chromatiques, tels que les dièses

et les bémols. Enfin, dans les sons plus éloignés du son fondamental, ces intercalations mêmes ne suffisent plus pour représenter tous les sons de l'instrument. On comprend ainsi comment le musicien qui donne du cor ne peut tirer naturellement que des tons absolus parmi les sons graves, quoiqu'il puisse ensuite moduler des demi-tons parmi les sons élevés. Il peut même modifier assez l'embouchure de son instrument, par le mouvement des lèvres, pour abaisser le son 7 qui est au-dessus du la_3^* , jusqu'à le faire accorder avec la vraie valeur de cette note dans la gamme. Il opère de plus grands changements encore en bouchant en partie avec la main l'orifice ouvert du tuyau. C'est ainsi, par exemple, que l'on ramène les sons 11 et 13 à leurs valeurs usitées. Par la réunion de ces artifices, qui modifient le courant d'air à son entrée et à sa sortie, avec un degré de promptitude et de précision que le sentiment seul donne, on va jusqu'à insérer entre les sons naturels des premières octaves, des intervalles chromatiques, et à faire entendre, même dans la première, les demi-tons que l'instrument seul refuserait. Mais ces grandes modifications demandent beaucoup d'habileté et d'exercice pour être produites avec justesse, et elles n'appartiennent pas au commun des musiciens.

Ici, comme pour les tuyaux bouchés par un bout, les expressions théoriques ne déterminent pas seulement les rapports des nombres de vibrations successifs. Elles donnent les valeurs absolues de ces nombres pour chaque longueur de tuyau assignée; et l'on peut de même les vérifier par l'expérience, en cherchant l'unisson du tuyau sur un monocorde vertical chargé d'un poids constant et connu; or, en opérant ainsi, on trouve que le son du tuyau est toujours un peu plus grave que la théorie ne le donnerait d'après sa longueur.

Pour découvrir la cause de cette différence, Daniel Bernouilli a imaginé d'enfoncer dans le tuyau un piston mobile, et de chercher les différentes positions où le son de la colonne d'air comprise entre ce piston et la bouche du tuyau redevenait le même que celui de la colonne entière. Il est évident que ces positions répondent à autant de nœuds, où les particules d'air restent immobiles pendant le mouvement de la

colonne, de sorte que leurs distances expriment les longueurs des parties consonnantes entre elles, dans lesquelles la colonne se divise spontanément. Or, en faisant cette expérience, on trouve que toutes les subdivisions, excepté la plus voisine de l'embouchure, sont égales entre elles, et conformes à ce que la théorie indique pour le son qu'elles produisent; mais la plus voisine de l'embouchure, quoique consonnante aussi avec les autres, est toujours plus courte; et, comme celle-ci n'est ébranlée que partiellement, tandis que les autres le sont dans toute leur section transversale, Daniel Bernouilli a conclu que sa moindre longueur était due à cette cause; et, en effet, il a trouvé que, lorsque l'ouverture de l'embouchure était différente, le raccourcissement de la première division variait.

Je me suis assuré que cette influence des embouchures partielles est inégale dans les différens gaz, sous la même pression et à la même température. Dans le gaz hydrogène, par exemple, elle est considérablement plus forte que pour l'air atmosphérique, ce qui rend la première division vers l'embouchure partielle excessivement plus courte que les autres, avec lesquelles elle est pourtant consonnante; d'où il suit que, lorsqu'on fait parler un même tuyau successivement avec ces deux gaz, les colonnes vibrantes n'ont réellement pas la même longueur dans les deux cas. Il faut avoir égard à cette circonstance, quand on veut comparer les sons rendus par différens gaz. Selon la théorie, ces sons, à longueurs égales, doivent être réciproques aux racines carrées des densités des gaz, sous d'égales pressions et à une même température. Mais on ne trouve pas ce résultat en faisant parler un même tuyau d'orgue avec différens gaz, par la raison que je viens d'indiquer. Par exemple, pour le gaz hydrogène vibrant dans un tuyau ouvert d'environ un pied de longueur, mais d'une embouchure pareille à celle des tuyaux bouchés ordinaires, le mode d'insufflation a tant d'influence pour rapprocher le nœud de l'embouchure partielle, qu'il en résulte un abaissement de ton de près d'une septième mineure, au-dessous de celui que la théorie indiquerait en supposant les deux divisions de la colonne gazeuse égales entre elles. On conçoit d'ailleurs que l'intensité de cet abaissement doit varier avec la proportion que l'on

donne à la bouche du tuyau, relativement à sa longueur et à sa grosseur. Aussi tous les physiciens qui ont tenté des expériences sur les sons des différens gaz, sans avoir égard à cette cause, ont-ils trouvé des proportions d'abaissement différentes, et qui n'offraient entre elles aucun rapport qu'ils pussent saisir.

On voit qu'à l'exception de cette particularité, qui a lieu dans le mouvement des premières couches auxquelles le mode d'ébranlement s'applique, le genre de considérations exposé dans ce chapitre permet de suivre avec facilité toute la succession des sons que l'air fait entendre en vibrant longitudinalement dans des tuyaux cylindriques ouverts ou fermés à leur extrémité. Cet accord semble donc indiquer que, dans le mode d'insufflation adopté pour les tuyaux d'orgue, les mouvemens de vibration, par lesquels les sons de ces tuyaux se produisent, sont réellement tels que nous les avons décrits, et consistent réellement dans la propagation successive d'une infinité d'ondes aériennes qui se suivent ou reviennent les unes sur les autres conformément aux lois que nous avons exposées. Toutefois, en soumettant la formation des mouvemens d'une colonne d'air à un nouvel examen mathématique, qui embrasse tous les modes de vibrations possibles, M. Poisson a découvert que la même série de sons peut être produite par des lois de mouvement beaucoup plus générales que celles que nous avons employées. Ainsi il a trouvé que le son de la première division, située du côté de l'embouchure, peut non-seulement être plus grave qu'il ne serait pour une longueur égale comprise entre deux autres subdivisions du reste de la colonne; mais il a reconnu qu'à l'aide de modes d'ébranlemens convenables, ce son peut s'abaisser ainsi indéfiniment. M. Poisson a remarqué en outre que la densité des parties vibrantes de la colonne d'air ne doit pas, dans les parties ouvertes de cette colonne, être rigoureusement égale à la densité des couches d'air environnantes, mais qu'elle doit y éprouver une certaine compression, puisqu'elle leur transmet son mouvement vibratoire; et il a déduit de là que chaque onde sonore, en rentrant dans le tuyau après s'être réfléchi sur l'air libre, doit se trouver affaiblie dans l'amplitude d'excursion de ses particules, quoique la période de leur mouvement reste la même; de sorte qu'après

quelques allées et venues de ce genre, et il s'en fait quelquefois plusieurs milliers dans une seconde, l'intensité de l'onde, et par conséquent celle du son qui en résulte, doivent se trouver excessivement affaiblies. Cette considération explique très-bien pourquoi il faut entretenir le mouvement de vibration de la colonne d'air, en soufflant continuellement à son orifice, pour que le son se soutienne sans interruption; ce qui ne devrait pas être nécessaire à cause de l'élasticité parfaite de l'air, si quelque cause continuellement agissante n'atténuait progressivement et rapidement l'intensité des ondes. L'autre remarque, celle de l'abaissement indéfini du ton dans la première division des tuyaux, se trouve aussi parfaitement confirmée par des expériences très-curieuses de M. Chanteau, qui, en augmentant beaucoup la grosseur des tuyaux, relativement à leur longueur, en diminuant la grandeur de leur bouche, et en variant la direction de la lame d'air qui met en mouvement la masse d'air intérieure, est parvenu à en tirer des sons d'une gravité extraordinaire.

Dans les tuyaux, soit bouchés, soit ouverts, comme dans les cordes vibrantes, plusieurs vibrations différentes peuvent coexister ensemble, et se superposer, pour ainsi dire, dans la même colonne d'air; car, lorsqu'on produit un son quelconque représenté par n , on entend souvent résonner avec lui quelque'un des sons plus graves qui répondent à des nombres moindres que n . Cela devient sur-tout sensible dans les passages d'un mode de vibration à un autre, lorsqu'on les produit graduellement par des ouvertures de bouche variables, comme je l'ai expliqué page 423.

Des Tuyaux à diamètre inégal.

Les tuyaux cylindriques offrent le cas le plus simple de la propagation des ondes sonores; mais on peut aussi former ces ondes dans des tuyaux de diamètre variable, par exemple, coniques ou hyperboliques, en y adaptant des embouchures pareilles à celles des tuyaux cylindriques. Si, alors, on analyse le mouvement de la colonne aérienne, par le moyen de pistons mobiles, on trouve qu'elle se divise encore en parties

consonnantes entre elles, séparées par des couches fixes, dont la situation est déterminée par l'opposition des mouvemens des parties contiguës. Mais il y a cette différence, avec les tuyaux cylindriques, que les longueurs de ces divisions ne sont plus nécessairement égales entre elles, et dépendent de la forme du tuyau.

On emploie aussi dans l'orgue une espèce particulière de tuyaux à bouche, que l'on nomme *tuyaux à cheminée*, fig. 40. Ils sont composés d'un tuyau de bourdon, au fond duquel on a percé une petite ouverture circulaire à laquelle s'adapte un tuyau AB de même diamètre, ouvert à ses deux bouts, et très-court comparativement au premier. Le ton de ces tuyaux composés est intermédiaire entre celui des tuyaux tout-à-fait bouchés et tout-à-fait ouverts, mais leur timbre est un peu différent; et on les emploie à cause de cette qualité, afin de jeter plus de variété dans les jeux.

La forme conique ou hyperbolique des tuyaux est souvent employée lorsque l'on veut renforcer le son dans un point, ou suivant une direction déterminée. C'est ainsi que les personnes qui ont l'ouïe dure empruntent, pour mieux entendre, le secours d'un tuyau conique, que l'on appelle *cornet acoustique*, dont elles placent le sommet dans leur oreille; et, dans les cas où l'on veut faire parvenir la voix à une grande distance, ou en augmenter la force, comme dans les commandemens à la mer, on parle dans des tuyaux, soit coniques, soit hyperboliques, dont on tourne l'ouverture évasée vers le lieu où l'on veut porter le son. L'effet de ces instrumens a été pendant long-temps inexplicé; mais les recherches mathématiques de M. Poisson en ont très-vraisemblablement révélé le secret, en montrant que, lorsqu'une colonne d'air limitée par des parois solides est ébranlée à une de ses extrémités, l'amplitude d'excursion des particules aériennes situées à l'autre extrémité peut, en vertu de la forme du tube, devenir beaucoup plus grande dans un certain sens, par exemple, suivant l'axe du tube, qu'elle n'aurait pu être, si l'ébranlement eût été direct; ce qui donne à ces particules la faculté d'agir beaucoup plus énergiquement par leurs pulsations sur

la masse d'air environnante, dans le sens suivant lequel l'accroissement extraordinaire de vitesse leur a été imprimé.

Des flûtes et instrumens à vent percés de trous latéraux.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que des tuyaux de diverses longueurs, ouverts ou bouchés, mais dont les parois étaient continues. On fait aussi des instrumens très-harmonieux avec des tuyaux cylindriques percés de trous latéraux, dans lesquels on souffle par une embouchure; ce sont de véritables tuyaux d'orgue où la bouche du musicien sert de soufflet. Comme je ne dois les considérer que sous le rapport théorique, un seul d'entre eux me servira d'exemple, et je choisirai la flûte traversière, parce qu'elle est plus connue.

Cette flûte, représentée *fig. 41*, est composée d'un cylindre creux de bois, d'ivoire ou de cristal, entièrement ouvert par une de ses extrémités, et percé seulement à l'autre d'un trou latéral qui sert d'embouchure. Les bords de ce trou sont taillés en biseau; et, en les plaçant contre la bouche et serrant les lèvres, on souffle obliquement une lame d'air contre leur tranchant. Par ce moyen, la colonne d'air contenue dans le tuyau se met en vibration sonore. Si l'on bouche d'abord avec les doigts tous les autres trous percés dans les parois du tuyau, il rentrera dans le cas des tuyaux cylindriques ouverts des deux côtés. L'on en tirera donc d'abord un son fondamental, le plus grave de tous; et ensuite en soufflant plus fort, ou en variant la manière de souffler, on obtiendra une suite d'autres sons de plus en plus aigus, qui, en prenant le premier pour unité, formeront la série des nombres naturels

1, 2, 3, 4, 5.....

Mais on en tirera encore d'autres sons intermédiaires, en découvrant successivement un ou plusieurs des trous latéraux que nous supposons tout-à-l'heure fermés; car, chacun d'eux étant ouvert, élève le son fondamental d'une quantité relative à sa grandeur et à sa distance de l'embouchure, comme on peut s'en assurer par l'expérience, en agrandissant successivement leurs dimensions.

Il y a des instrumens à vent, tels que le serpent et le cor,

qui sont formés de tuyaux courbes. Mais cette courbure n'influe en rien sur le son qu'on en tire ; elle ne sert que pour replier le tuyau sur lui-même, et lui donner beaucoup de longueur sous peu de volume. Du reste, la série des sons est absolument la même que pour des tuyaux rectilignes de forme et de longueur pareilles.

De la manière d'accorder les tuyaux à bouche.

Procédés pour les mettre en ton.

Lorsqu'on a construit les tuyaux d'orgue sur les dimensions indiquées par la théorie et l'expérience, il est presque impossible qu'ils se trouvent, du premier coup, rigoureusement au ton juste qu'on veut leur donner. Il faut donc les y amener par quelque procédé correctif : nous allons expliquer ceux qui sont en usage, et qui sont fondés sur les modifications que le son acquiert quand on change la longueur ou la forme des tuyaux. Ces procédés diffèrent selon la nature du tuyau et la matière dont il est fait. Supposons-le d'abord de bois, de carton, ou de toute autre matière qui ne se prête pas à l'extension : alors, si le fond doit être fermé comme dans les bourdons, *fig. 42*, on y met un bouchon de bois cylindrique, bien juste, revêtu de peau dont la pluche est en dehors, et on l'enfonce ou on le retire graduellement jusqu'à ce qu'il se trouve au ton demandé. Si le tuyau doit être ouvert à son extrémité, *fig. 43*, on y ajuste une petite lame de plomb inclinée à son axe, et que l'on abaisse ou que l'on relève plus ou moins, jusqu'à ce que l'on ait atteint l'accord. Cette lame modifie le son, parce qu'elle bouche en partie le tuyau ; car, si elle était tout-à-fait abaissée et capable de couvrir toute sa surface, elle le changerait évidemment en un bourdon, ce qui abaisserait son ton d'une octave entière.

Venons maintenant aux tuyaux faits de plomb ou d'étain. Pour ceux-là, s'ils doivent être ouverts, on les règle au moyen de l'instrument représenté *fig. 44* ; c'est une tige solide, terminée à l'un de ses bouts par un cône plein CC, à l'autre par une sorte d'entonnoir creux EE. Les tuyaux sont-ils trop graves, on y enfonce le cône CC pour évaser leur extrémité ouverte ; sont-ils trop aigus, on les resserre avec l'enton-

noir EE. Il est visible, en effet, que le rétrécissement de leur orifice les rapproche des bourdons, et que l'évasement les en éloigne. Quant aux bourdons eux-mêmes, on ne peut pas leur appliquer ce procédé; on ne peut pas non plus rendre leur fond mobile, puisqu'il est soudé à l'extrémité de leur corps. C'est pourquoi on y supplée par un autre moyen, d'autant plus curieux à connaître, que l'expérience seule a pu y conduire. A la surface extérieure du tuyau, et à côté de la lèvre sur laquelle le vent frappe, on adapte deux lames de plomb LL, *fig. 45*, qui s'ouvrent en dehors et qui ressemblent à deux oreilles : aussi les appelle-t-on de ce nom. En les tenant tout-à-fait ouvertes en dehors et couchées sur la surface du tuyau, on a le son naturel que ce tuyau doit rendre suivant sa longueur; mais, en les rapprochant peu-à-peu, le son baisse progressivement, et d'une quantité quelquefois fort considérable. On voit que ce phénomène tient à l'influence des embouchures; mais il ne serait pas facile de le calculer. On emploie le même appareil pour les tuyaux à cheminée, auxquels les autres procédés de correction ne sont pas non plus applicables; car la petitesse de la cheminée ne permettrait pas de songer à les accorder en l'élargissant.

En général, tout ce qui peut arrêter ou retarder d'une manière quelconque les vibrations de l'air, soit dans l'intérieur des tuyaux, soit au dehors, modifie les sons qu'on en tire. Ainsi les tuyaux sont influencés par leur voisinage même; car si, dans un orgue bien accordé, on en isole quelques-uns, en ôtant ceux qui les avoisinent, leur ton change, et ils ne gardent plus l'accord.

Des instrumens à anches.

L'anche, représentée *fig. 46*, est un appareil vibratoire qui se met en mouvement par un courant d'air, et qui excite ainsi dans ce fluide des sons dont on accroît beaucoup la force en faisant vibrer l'anche dans un tuyau d'une grosseur et d'une longueur convenables. Cet appareil est essentiellement composé d'une languette AL, formée d'une feuille mince de laiton fixée en A sur une pièce cylindrique AR, de bois ou de métal, creusée en rigole suivant AR. On intr-

duit ce système par le bout A, dans un trou demi-circulaire d'un diamètre égal, percé au centre d'un bouchon T qui ferme exactement le tuyau SVT. Alors, si l'on souffle par l'orifice S, qui est rétréci à dessein pour cet objet, le courant d'air est forcé d'enfiler la rigole pour s'échapper. Toutefois, comme la rigole est fort petite, comparativement au diamètre du tuyau SVT, il arrive, si l'on souffle assez fort, que l'air, en se pressant pour y entrer, pousse la languette AL contre la rigole, et la ferme. Mais, lorsque la portion d'air qui a enfilé la rigole a épuisé sa force d'impulsion contre l'air extérieur, celui-ci réagit presque aussitôt; et sa réaction se joignant à l'élasticité propre de la languette, la relève; alors l'air intérieur passe de nouveau, presse la languette, et ce jeu alternatif se continue aussi long-temps que l'on introduit de nouvel air par l'orifice S avec assez de vitesse. Si l'on met cet orifice sur le canal d'un soufflet d'orgue, les alternatives deviennent assez rapides pour produire un son, ordinairement rauque et assez désagréable, du moins quand la disposition de l'appareil est réduite à ce degré de simplicité. Le ton plus ou moins élevé de ce son dépend spécialement de la longueur de la languette, depuis le point où elle est attachée. Il dépend aussi de son élasticité, de son poids, et de sa courbure plus ou moins concave en dehors; car, un quelconque de ces élémens étant changé, le ton dans lequel l'anche résonnait change aussi.

Il importe de remarquer que ce n'est pas la languette elle-même, qui, par ses vibrations propres, ferme et ouvre tour-à-tour la rigole; c'est l'air qui l'y pousse et qui la ramène; le son dépend de ces chocs et de ces retours plus ou moins rapides. Si le point d'attache est fixe, ainsi que la longueur de la languette, l'air aura besoin d'une force d'autant plus grande pour l'amener contre la rigole, qu'elle en sera plus éloignée. Ainsi, l'augmentation de cet éloignement devra rendre les battemens plus rares, et par conséquent rendre plus grave le son qui en résulte. C'est, en effet, ce que l'on observe constamment. Au contraire, on rendra le son plus aigu si l'on raccourcit la partie libre de la languette, toutes les autres choses restant les mêmes, parce que son extrémité aura moins de chemin à faire pour s'approcher de la rigole, et

moins à faire aussi en s'en éloignant. Ces variations de longueur s'opèrent au moyen d'une tige de fil de fer recourbée *Ff*, qui est adaptée à la languette, et qui la serre contre la rigole par son ressort. En tirant ou enfonçant cette pièce, que l'on appelle *une rasette*, on met le point d'attache de la languette plus près ou plus loin de son extrémité libre, et le son monte ou descend, mais non pas dans la proportion du carré des longueurs, comme je m'en suis assuré par l'expérience; ce qui achève de prouver que le jeu de l'anche ne doit pas être assimilé à celui des lames élastiques libres par un bout, fixées par l'autre, et vibrant spontanément. Du reste, le ton de l'anche est tellement déterminé par la rapidité des battemens dont elle est susceptible, qu'il reste le même, quelle que soit la nature du gaz par lequel on la fait parler.

Le courant d'air qui fait vibrer les anches n'agit pas sur elles seulement quand il enfile la rigole, il modifie encore leurs mouvemens par la rapidité plus ou moins grande avec laquelle il s'écoule et fait place à de nouvel air. Par une suite nécessaire de cette réaction réciproque, il arrive que la configuration des tuyaux qu'on ajuste sur les anches influe extrêmement sur la qualité des sons qu'on en tire. Ceux qui rendent les sons les plus éclatans, sont les tuyaux coniques qui vont en s'évasant vers l'air extérieur, *fig. 47*. Si le cône est renversé, *fig. 48*, le son devient sourd. Mais si deux cônes pareils, opposés base à base, sont ajustés à l'extrémité d'un long tuyau conique, *fig. 49*, ce système donne au son de la rondeur et de la force. En général, pour que les vibrations de l'anche soient régulières et harmonieuses, il faut qu'elles puissent convenir avec le mouvement de l'air dans le tuyau où l'anche parle. La nécessité de cette condition est sur-tout sensible dans les tuyaux longs et minces, comme ceux des haut-bois et de la clarinette. Aussi ces instrumens sont-ils percés de trous latéraux qui, unis au pincement des lèvres, permettent au musicien d'établir l'accord dont il s'agit.

Les anches telles que je viens de les décrire ont toujours un son rauque et criard, dont l'àpreté est due au battement de la languette contre la matière solide de la rigole; mais, par une modification aussi simple qu'ingénieuse, M. Grenié,

habile amateur de musique, est parvenu à leur ôter tous ces défauts, et à leur donner, en échange, des qualités qu'elles n'avaient pas.

Pour cela il fait la rigole AR, *fig. 50*, en bois ou en cuivre, mais à arêtes vives et en forme de parallépipède. La languette est une lame de laiton parfaitement plane, et coupée en forme de rectangle de manière à remplir exactement, ou plutôt presque exactement, la face évidée de la rigole. Une rasette extrêmement ferme et solide *rr*, arrête cette languette à la longueur convenable, et fixe invariablement le point à partir duquel elle doit vibrer. Maintenant, lorsque cette anche est montée sur le porte-vent BCS, si l'on souffle par le trou S, l'air comprimé ne trouvant pas, ou presque pas d'issue entre la languette et les parois de la rigole, pousse la languette et l'y fait entrer. Après qu'il a passé une petite quantité d'air, l'élasticité naturelle de la languette la ramène à sa position primitive; de sorte qu'elle ferme de nouveau le passage à l'air; mais la vitesse qu'elle a acquise en revenant ainsi sur elle-même, lui fait aussitôt dépasser ce point, et elle s'écarte dans le sens opposé, en poussant l'air devant elle jusqu'à ce que la résistance qu'elle éprouve, jointe à l'effort de l'élasticité, l'arrête et la ramène de nouveau à sa position primitive, d'où l'air la pousse une seconde fois dans le tuyau. Voilà le mode de mouvement le plus général que l'on puisse concevoir; et M. Grenié a bien voulu me fournir l'occasion de le vérifier par l'expérience, en disposant une de ses anches dans un porte-vent de verre, de manière qu'on pouvait la voir vibrer. On comprend que de pareilles oscillations, lorsqu'elles deviennent suffisamment rapides, doivent produire un son, de même que les battemens des anches ordinaires, avec la différence importante que le son aura un timbre incomparablement plus doux, plus harmonieux, plus égal, puisque la lame de cuivre, au lieu de battre contre du bois, du cuivre, ou de la peau, dont la résistance est toujours brusque et irrégulière, ne fait ici que refouler sur lui-même un fluide parfaitement homogène, compressible et élastique, tel que l'air. Aussi les anches de M. Grenié n'ont plus rien de ce ton rude et criard qui fait le désagrément des anches ordinaires, et qui ne dis-

paraît pas même tout-à-fait dans les instrumens où l'anche est modifiée par le jeu des lèvres. Leur son, dans les octaves les plus aiguës, comme les plus graves, est aussi doux, aussi pur que celui des tuyaux à bouche; et l'on voit bien que cela doit être, d'après la manière dont l'air y est mis en vibration.

Un autre point important de la construction de M. Grenié, c'est la fermeté des languettes et celle des rasettes par lesquelles elles sont retenues. La force de chaque languette est combinée avec la largeur de la rigole qu'elle couvre, de manière que le courant d'air qui la presse ne puisse jamais lui donner plusieurs inflexions autour de son axe; et, comme la fixité de la rasette rend sa longueur invariable, il en résulte que, quelle que soit la force du vent qui la presse, elle ne peut jamais changer de ton. L'accroissement du vent n'a donc d'autre effet que de rendre les excursions de la languette plus grandes, de renfler ainsi le son; et le musicien règle à son gré ce renflement au moyen d'une pédale qui fait mouvoir un soufflet à ressort. De cette manière, on peut à volonté produire des sons forts ou faibles, et passer d'un de ces extrêmes à l'autre par un *crescendo* aussi régulier, aussi soutenu que celui de la voix ou des instrumens dans lesquels le son est modifié par le jeu des lèvres. L'air qui a fait vibrer les anches s'échappe par des tuyaux ouverts, évasés en cône et terminés en demi-sphère, *fig. 51*. Ce renflement, comme je l'ai déjà annoncé, donne au son de la rondeur et de la force. Ici, comme avec les anches ordinaires, il y a, pour chaque longueur de languette, une longueur de tuyau qui est la plus favorable, et que l'expérience fait connaître. Si l'on s'en écarte trop, l'anche parle mal ou ne parle pas du tout. M. Grenié a construit sur ce modèle des tuyaux d'anches qui sonnent le seize-pieds ouvert, avec une netteté, une force et une régularité véritablement remarquables. Dans ce cas, la languette est une règle de cuivre, dont la longueur est 0^m,240, la largeur 0^m,055, l'épaisseur 0^m,005. Ses vibrations sont si énergiques, qu'elles font frémir le tuyau qui lui sert de prolongement, le porte-vent sur lequel elle est montée, le plancher même, et tous les corps élastiques qui sont dans le voisinage.

Sachant, d'après cette théorie, que le son des tuyaux d'an-

ches est immédiatement excité par les battemens de leurs languettes, et la rapidité de ces battemens étant réglée par les dimensions des lames qui les exécutent, on voit que le ton du son qui en résulte est complètement déterminé par ces circonstances, indépendamment de la nature du milieu où l'anche vibre, et qu'ainsi il doit être le même dans tous les gaz. C'est en effet ce que l'expérience confirme. Pour m'en assurer, j'ai vissé le porte-vent d'une anche libre à un robinet à large canal, adapté au sommet d'une cloche de verre; et j'ai enveloppé le tuyau de sortie avec une vessie que j'avais comprimée pour en chasser l'air. Puis, ayant placé la cloche sur une cuve pleine d'eau, *fig. 52*, je l'ai enfoncée graduellement, pour que l'air passât par le robinet dans le tuyau de l'anche, et la fit parler. J'ai observé le ton qu'elle rendait dans cette circonstance; puis, ayant ôté la vessie pour laisser échapper tout l'air qui y était passé, je l'ai remise en place, et j'ai rempli la cloche avec du gaz hydrogène, qui, de cette manière, ne se trouvait mêlé qu'avec la très-petite portion d'air atmosphérique que le tuyau de l'anche contenait. Alors, plongeant de nouveau la cloche dans l'eau, j'ai fait parler l'anche avec le gaz hydrogène; mais le ton du son est resté exactement le même qu'auparavant. Pour bien faire cette expérience, il faut employer une anche libre, telle que celles de M. Grenié, parce que ce sont les seules dont la construction soit assez parfaite pour conserver la constance de leur ton, quelle que soit la rapidité du courant d'air qui les traverse.

La théorie que je viens d'exposer ici sur le jeu des anches, s'est trouvée récemment confirmée par les effets d'une machine nouvelle que M. Caignard Latour a imaginée, et à laquelle il a donné le nom de Sirène. Le principe essentiel de cette machine, représentée *fig. 53*, consiste à faire sortir un courant d'air continu par un petit orifice, au-devant duquel on dispose un plateau circulaire mobile sur son centre, et dont le mouvement de rotation s'opère soit par l'action du courant même, soit par l'application immédiate de quelque agent mécanique. Le plateau, dans la partie de sa surface qui vient se présenter successivement devant l'orifice, est percé d'un certain nombre d'ouvertures, dirigées obliquement à son

plan, afin que l'impulsion du courant d'air, en les traversant, se décompose de manière à faire tourner le disque comme un volant ordinaire. Elles sont en outre rangées sur un même cercle concentrique à l'axe, et espacées entre elles à des distances aussi égales qu'il est possible. Par l'effet du mouvement du plateau, ces ouvertures viennent se présenter successivement devant l'orifice par lequel le courant d'air s'échappe, et elles lui offrent alors un passage. Mais leur présence sur la direction de chaque filet d'air ne dure qu'un instant, et ce filet se trouve aussitôt arrêté par l'arrivée de l'intervalle plein, qui suit chaque ouverture. Ces alternatives de plein et de vide, qui se succèdent avec rapidité, produisent donc sur le courant d'air précisément les mêmes intermittences que la vibration de la languette des anches, quand elle ouvre et ferme successivement la rigole par laquelle l'air s'écoule. Aussi en résulte-t-il de même un son dont le degré d'acuité dépend, comme pour les anches, du nombre d'intermittences qui se succèdent par seconde ; mais avec cet avantage que, dans la Sirène, le mouvement du plateau peut être mesuré, et ses tons comptés par quelque procédé mécanique, d'où l'on peut conclure le nombre des intermittences qui ont lieu en une seconde, d'après le nombre connu des ouvertures, et comparer ce nombre au ton du son réellement produit ; au lieu que, dans les anches, le nombre de vibrations n'est pas mesurable. Quelques essais faits, par M. Caignard, de cette manière, lui ont donné des nombres de vibrations conformes à la théorie. Il a trouvé de plus qu'un courant d'eau transmis dans la Sirène, au lieu d'un courant d'air, y produisait exactement le même son, quand le nombre des intermittences par seconde, était le même ; ce qui dépend du même principe qui produit la constance de ton des anches quand on y souffle différens gaz.

CHAPITRE IX.

Sur la Communication des mouvemens vibratoires.

En rassemblant et généralisant les faits que nous avons exposés dans les chapitres qui précèdent, on doit concevoir

que tous les corps, quelle que soit leur nature, s'ils sont convenablement ébranlés, peuvent prendre des mouvemens de vibrations dont la rapidité, la force et la permanence, dépendront du mode d'agrégation qui unit les particules du corps vibrant, de son élasticité plus ou moins parfaite, et enfin de la configuration de ses diverses parties. Aussi, en examinant les instrumens de musique des diverses nations du monde, on voit que presque toutes les matières connues ont été employées à leur construction.

Non-seulement cet état vibratoire, qui produit dans l'air des ondes sonores, peut être imprimé à tous les corps, par l'effet d'un ébranlement immédiat, mais on peut encore l'y exciter par communication, en les mettant en contact avec des corps vibrans qui leur fassent partager leurs oscillations. C'est ainsi que la boîte de bois sec et élastique qui forme la caisse du violon, du piano, de la harpe, de la basse, frémit et résonne sous l'influence harmonique des cordes de ces instrumens; et, selon que sa contexture la rend plus ou moins docile à cette influence, elle renforce avec plus ou moins d'énergie, de plénitude et de justesse, le faible son que les cordes seules avaient primitivement excité. Pour rendre ce phénomène bien sensible, il faut prendre un diapason de fer, tel que celui qui est représenté *fig.* 20, et qui sert à fixer le ton sur lequel les pianos doivent être accordés; puis, après l'avoir fait vibrer plusieurs fois isolément, et avoir reconnu le degré d'intensité du son qu'il excite, posez-le, en l'appuyant, sur la caisse du piano dans laquelle toutes les cordes métalliques sont renfermées. Aussitôt le son éclatera, dans le même ton juste, mais avec une force qu'il était loin d'avoir d'abord. Si vous voulez rendre l'augmentation plus frappante encore, ne posez le diapason sur la caisse qu'après que sa résonnance propre s'est affaiblie presque jusqu'à n'être plus sensible isolément; aussitôt vous l'entendrez de nouveau; et le son ainsi reproduit sera même plus fort que celui du diapason seul, lorsqu'il commençait à vibrer dans l'air. Il est évident qu'alors le mouvement vibratoire du diapason se communique, par l'air, et par la matière solide de la caisse, à toutes celles des cordes métalliques qui peuvent l'admettre dans leur longueur

totale ou dans leurs subdivisions; comme aussi il se transmet à la substance même de la caisse; car, en posant la main sur les tables qui les composent, on les sent frémir.

Mais, de quelle nature est ce mouvement communiqué ainsi aux tables sonores, soit par une corde tendue sur leur surface, soit par l'application d'un corps vibrant tel que le diapason? Pour le savoir, M. Savart a imaginé l'expérience suivante, représentée *fig. 54*. Sur une règle de bois très-épaisse, on tend une corde de violon, que l'on fait passer par-dessus un chevalet de bois pareil à ceux des violons ordinaires; mais, au lieu d'appliquer les pieds de ce chevalet sur la planche même où sont fixés les points d'attache, on les fait porter sur une plaque de plomb circulaire, dont la surface inférieure est séparée de la planche par deux petits tasseaux de bois ou de liège. Ces dispositions faites, on répand sur la plaque du sable fin et sec, et l'on tire le son de la corde, à l'aide d'un archet. Aussitôt le sable s'agite comme dans les expériences de M. Chladny, et finit de même par s'arranger en une figure déterminée. Si l'on change le son de la corde, en la relâchant ou en la serrant davantage, la figure formée par le sable change; et les variations de ton les plus légères ont ainsi des variations de figures qui les accompagnent. On voit que, dans cette expérience, la surface de la plaque métallique sur laquelle le chevalet pose, entre toute entière en mouvement sous l'influence des pulsations qu'elle reçoit de ce corps; alors son mouvement doit être périodique comme ces pulsations, et de même période qu'elles. En conséquence, elle se divise pour obéir à cette condition; et les lignes nodales qui se forment sur sa surface sont, dans chaque cas, celles qui la divisent convenablement pour le mode de vibration auquel elle est obligée de se conformer. Ainsi, elle exécute des excursions synchrones à celles de la corde dont le mouvement primitif a excité le sien; et vraisemblablement le mouvement de celle-ci est influencé à son tour par le mode de vibration que prend non-seulement la plaque, mais la règle de bois qui la supporte, et que prennent même les appuis sur lesquels leur ensemble repose. La corde, la plaque, la règle et les appuis deviennent ainsi un système lié, dont les vibrations sont consonnantes entre elles, quoiqu'elles s'exécutent diverse-

ment. Le ton grave ou aigu du son que ce système fait entendre, dépendant de la rapidité actuelle des vibrations, est primitivement déterminé par la tension que l'on a donnée à la corde, et son intensité dépend de la somme des impulsions imprimées à l'air ambiant par toutes les parties vibrantes du système.

Cette vibration totale de la plaque, par l'effet du mouvement communiqué, est un résultat d'une grande importance dans la question qui nous occupe ; car il montre avec évidence le mode d'ébranlement que les tables sonores des instrumens de musique reçoivent de l'influence des cordes qui y sont attachées. Ces tables vibrent donc aussi à la manière des plaques, c'est-à-dire en se divisant en diverses parties vibrantes, déterminées par le son qu'il faut qu'elles exécutent, et dont l'étendue ainsi que la configuration dépend de leur forme et de l'énergie de l'élasticité dont sont douées leurs diverses parties. M. Savart a vérifié ces résultats de la manière la plus décisive avec un violon à tables planes, sur lesquelles il répandait du sable fin et sec ; car, lorsque l'on passait un archet sur une des cordes, les tables frémissaient aussitôt dans toute leur surface, et se subdivisaient spontanément en diverses parties séparées par des lignes nodales où le sable venait se réfugier, et dont la configuration variait avec le ton du son que la corde avait fait entendre. D'après cela, on conçoit combien le choix d'un bois à fibres mobiles et facilement excitable, doit avoir d'influence sur la bonté des instrumens ; mais on ne peut s'assurer de ces qualités que par l'expérience. Il faut en général employer des bois sonores, secs, élastiques, à fibres bien égales, et essayer, par des épreuves pareilles à celles que nous venons de décrire, s'ils sont également sonores dans toutes leurs parties. Et encore, après tout cela, il faut que les cordes dont on fait usage y soient convenablement appropriées ; telle corde résonne mal sur un violon, qui résonnera bien sur un autre. Il paraît aussi que le temps contribue à perfectionner les tables sonores, et que leurs fibres deviennent plus promptes à s'émouvoir quand elles l'ont été souvent. Ces différences sont tellement sensibles pour des oreilles exercées, qu'un habile joueur de violon peut, les yeux fermés, distinguer ceux de ces instrumens qui viennent

d'un luthier célèbre, comme Amati ou Guarnerius, uniquement d'après la qualité du son qu'ils rendent; et vainement essaierait-on de les imiter, si l'on n'a pas à sa disposition des matériaux aussi parfaits. Un *Amati* peut être démonté vingt fois sans rien perdre de son mérite. Si, après l'avoir mis dans cet état, on en copie toutes les pièces avec la fidélité la plus scrupuleuse, on pourra obtenir ainsi un instrument d'une forme exactement pareille; mais si on les remonte l'un et l'autre, et qu'on les éprouve, le premier sera toujours un excellent violon, et le nouveau pourra être fort médiocre, ou même fort mauvais.

La communication des vibrations, dans les instrumens de musique, ne se fait pas seulement, d'une manière directe, des cordes ébranlées aux tables sur lesquelles on les attache, elle se fait encore par l'intermédiaire de tous les corps solides qui constituent le corps même de l'instrument. C'est encore ce que M. Savart a mis dans une évidence parfaite, par une infinité d'expériences ingénieuses. Par exemple, on prend deux plaques circulaires de bois, d'égales dimensions et de même nature, de telle sorte qu'elles donnent toutes deux le même son, par le même mode de vibration, lorsqu'elles sont ébranlées isolément. On unit ces deux plaques l'une à l'autre en fixant à leur centre, et perpendiculairement à leur plan, une petite tige de bois qu'on y fait adhérer avec un peu de cire d'Espagne ou de mastic solide. Alors, prenant cette tige entre les doigts, de manière que les deux plaques soient horizontales, on répand sur leurs surfaces supérieures du sable fin et sec; puis on fait vibrer l'une d'elles en passant un archet de violon sur son bord. Cette plaque se divise d'une certaine manière, dépendante du son qu'elle fait entendre, et que le sable indique en se réfugiant dans ses lignes nodales. Or, l'autre plaque qui n'a point été ébranlée directement, et qui n'a reçu le mouvement que par communication à travers la tige commune, se divise aussi spontanément et de la même manière que l'autre, comme le montre la disposition du sable sur sa surface; et si, au lieu d'être consonnante à la première, elle en diffère en épaisseur ou en diamètre, elle prend un mode de subdivision tel qu'elle puisse rendre le même son,

eu égard à la diversité de ses élémens. M. Savart a trouvé que cette transmission n'est pas limitée à deux plaques et à une seule tige, mais qu'elle peut s'opérer également à travers un nombre de plaques et de tiges quelconque, disposées les unes au-dessous des autres. Le mouvement primitivement imprimé à une seule, se propage à toutes les autres avec la même facilité.

Une circonstance remarquable, qui a été constatée par M. Savart, c'est que les sons d'un pareil système de plaques diffèrent un peu du son individuel que rendrait chacune d'elles, si elle exécutait isolément le même mode de vibration; et il a trouvé que cette modification des sons propres a lieu généralement dans le mouvement des corps que leur liaison oblige à vibrer simultanément.

Cette communication du mouvement entre les différens corps qui composent un même système, s'opère tantôt par des vibrations transversales, tantôt par des vibrations longitudinales, comme l'atteste le mode d'impulsion imprimé au sable que l'on répand sur leur surface. Pour en donner un exemple complet, considérons, comme l'a fait M. Savart, le cas où le système est composé d'un nombre quelconque de verges de verre planes, assemblées à angles droits les unes sur les autres, comme je représente la *fig. 55*. Alors, si l'on met la première verge **AB** en vibration, soit transversale, soit longitudinale, le mouvement est transmis par communication successive à toutes les autres verges, en éprouvant autant de transmutations alternatives. Par exemple, si la première verge du système est d'abord ébranlée transversalement à l'aide d'un archet, elle devient le siège de vibrations transversales. Ces vibrations, frappant le bout de la seconde verge par des pulsations dirigées parallèlement à sa longueur, y produisent le même effet que produirait un cylindre solide qui la choquerait ainsi par un de ses bouts, c'est-à-dire qu'elles y excitent des vibrations longitudinales. Celles-ci, arrivant à la troisième verge, la frappent perpendiculairement à sa longueur, et y excitent un mouvement transversal, lequel ébranle à son tour longitudinalement la verge suivante; et quel que soit le nombre des verges, l'ébranlement primitif se

transmet ainsi successivement à toutes en changeant alternativement de nature. Si cet ébranlement, que nous avons supposé transversal dans la première verge, était au contraire longitudinal, la propagation alternative s'opérerait encore de la même manière; mais alors le mouvement de la première verge étant longitudinal, celui de la seconde serait transversal, celui de la troisième longitudinal, et ainsi de suite indéfiniment. Ces transmutations successives de mouvement s'opèrent avec une constance et une régularité parfaites; car, si l'on forme un système où toutes les verges de rang impair soient de même nature et de dimensions égales, celles de rang pair étant aussi égales entre elles, quoique différentes des premières, on trouve, par l'inspection des lignes nodales et par les mouvemens du sable, que toutes les verges d'une même série prennent exactement le même mode de vibration, et rendent ainsi un son pareil. En outre, d'après ce qui a été reconnu plus haut, celles de ces verges qui vibrent longitudinalement doivent, par la nature de leurs mouvemens, avoir sur leurs deux faces des dispositions de lignes nodales dissemblables. Or, en effet, cette dissemblance de lignes nodales a lieu réellement sur chacune d'elles, comme on peut s'en assurer en recommençant l'épreuve du sable sur le même système retourné verticalement; et, de plus, cette opposition se répète alternativement d'une verge à l'autre dans toute la série, de manière que le même système de lignes nodales se produit toujours sur les faces qui se regardent; d'où il suit que les faces qui sont tournées vers une même partie de l'espace présentent des systèmes alternativement différens. Du reste, quel que soit le nombre des étages ainsi superposés, si le mode d'ébranlement imprimé à la première verge est toujours le même, le mode de vibration de la dernière est le même aussi, quel que soit le nombre d'alternatives qui les séparent; de sorte que son mouvement se trouve uniquement réglé par ses relations avec la verge qui lui est appliquée immédiatement.

Cette expérience de M. Savart est très-importante, en ce qu'elle montre avec évidence que le mouvement ne perd

rien de sa périodicité primitive par les transformations successives; mais, de là résulte aussitôt une question de mécanique très-difficile : c'est de savoir comment les vibrations longitudinales qui, en général, dans les lames libres, sont excessivement plus rapides que les transversales à égales longueurs, peuvent cependant se modifier, dans cette circonstance, de manière à produire des ébranlemens secondaires, aussi lents que le mouvement transversal l'exige, et que l'atteste la nature du son produit : et comment les vibrations transversales, à leur tour, peuvent-elles se modifier de manière à reproduire, par leur choc, la rapidité ordinaire aux vibrations longitudinales? L'inspection des lignes nodales est le seul mode qui puisse faire connaître, sinon le mode mécanique, au moins le résultat définitif de cette transmutation. Or, en les observant, M. Savart a vu que les intervalles des nœuds s'agrandissent sur celles des verges qui vibrent longitudinalement et se rapprochent sur les autres; de manière que le mouvement longitudinal des premières se trouve être celui qui conviendrait à des verges libres beaucoup plus longues, et que le mouvement transversal des autres est le même qui conviendrait à des verges libres plus courtes; d'où résulte une compensation telle, que les deux périodes de ces deux genres d'oscillations soient isochrones, et par conséquent consonnantes entre elles. Car, en général, c'est un fait constaté par M. Savart, que, lorsqu'une lame élastique de bois, de verre, ou de métal, est fixée à un corps solide, dont la masse est assez considérable pour qu'elle ne puisse pas en modifier sensiblement le son propre, elle s'arrange de manière à exécuter des vibrations isochrones à celles que ce son exige; et si elle est disposée, par exemple, de telle sorte qu'elle doive faire des vibrations longitudinales, quand le corps auquel elle adhère en exécute de transversales, les lignes nodales qui se forment sur ses deux surfaces ont exactement les figures et les intervalles qu'elles auraient sur une verge de même largeur et de même nature, dont la longueur serait telle, qu'elle rendrait elle-même, étant libre, le son actuellement produit. De cette expérience et de plusieurs autres analogues, M. Savart conclut,

avec beaucoup de vraisemblance, qu'en général, lorsqu'un système de corps solides, liés entre eux invariablement, vient à prendre un mouvement vibratoire qui produit un son soutenu et appréciable, toutes les parties de ce système exécutent des vibrations simultanées dont la période est parfaitement la même, et desquelles résultent en conséquence des sons parfaitement égaux. Cette remarque explique très-bien comment, dans certaines circonstances, l'addition de nouvelles masses, appliquées sur les corps vibrans, ralentit quelquefois leur mouvement, et d'autres fois l'accélère, ce qui abaisse le son ou l'élève; le premier cas ayant lieu quand la masse additionnelle est seulement emportée par le corps vibrant comme une matière inerte; le second, lorsqu'elle se met aussi en vibration par elle-même, et qu'elle réagit ainsi sur le corps qui l'avait d'abord excitée.

Je ne puis mieux terminer ces remarques sur les vibrations communiquées par les corps solides, qu'en rapportant une curieuse expérience de M. Breguet, qui en met les effets dans la plus complète comme la plus remarquable évidence. M. Breguet a construit des montres qu'il appelle *doubles* parce qu'elles renferment, dans une même boîte de dimension ordinaire, deux mouvemens complets, tout-à-fait indépendans l'un de l'autre, mais fixés sur la même platine métallique. Chacun de ces mouvemens conduit des aiguilles d'heures, de minutes, de secondes, dont la marche lui est uniquement soumise. Or, quoique cette marche ne soit jamais rigoureusement la même pour les deux systèmes, quand chacun agit seul, néanmoins, lorsqu'on les fait agir ensemble, s'ils diffèrent peu dans leur marche, ils finissent bientôt par s'accorder parfaitement en vertu de leur influence réciproque, qui se communique de l'un à l'autre par la platine solide à laquelle ils sont fixés tous deux. Une de ces montres doubles, suivie pendant trois mois à l'Observatoire royal, a offert ainsi, entre ses deux mouvemens, un accord tel que les deux aiguilles de secondes ont toujours battu exactement la même seconde, sans se quitter durant tout cet intervalle de temps; quoique, en vertu des petites inégalités inévitables que les

meilleurs chronomètres éprouvent, la marche commune du double système ait éprouvé de légères variations ; et, ce qui achève de prouver que cet accord merveilleux est causé par l'influence mutuelle des petites vibrations, qui se transmettent d'un système à l'autre par la platine métallique qui les porte, c'est que les deux systèmes se maîtrisent l'un l'autre d'autant plus énergiquement qu'ils sont plus rapprochés sur cette plaque : à mesure qu'on les rapproche, on peut détruire, par leur réaction mutuelle, une différence plus grande entre leurs marches isolées. M. Breguet pense qu'une telle combinaison de deux mouvemens est plus stable dans son uniformité qu'un mouvement unique, et qu'elle doit mieux résister aux causes perturbatrices étrangères.

L'air lui-même, malgré son peu de masse, devient capable de communiquer ainsi ses propres vibrations, lorsqu'il est en contact avec des corps susceptibles de les admettre et de les exécuter avec lui. Nous avons rapporté à ce genre de communication le frémissement des cordes isolées, près desquelles on fait vibrer une autre corde dont elles puissent suivre les oscillations, soit en vibrant tout entières, soit en se divisant d'elles-mêmes en parties aliquotes. L'orgue produit aussi des effets pareils, mais bien plus intenses, sur les corps élastiques qui offrent de larges surfaces aux ondulations de l'air. Si l'on place un de ces instrumens dans une chambre, il arrive presque toujours que quelques-uns de ses tuyaux sont en harmonie avec une ou plusieurs vitres des fenêtres, ou même, parfois, avec la fenêtre entière. Alors la fenêtre frémit et résonne dès qu'on fait parler ces tuyaux-là ; et le son propagé qui en résulte est souvent beaucoup plus intense que le son principal.

On peut tirer parti de ces propriétés pour augmenter l'effet des orchestres dans les salles de spectacle ; et cette précaution, au rapport de J.-J. Rousseau, n'est pas négligée dans les théâtres d'Italie. Le lieu où les musiciens sont placés est, en quelque façon, lui-même un grand instrument. Le plancher est en communication, par le plus petit nombre de points possible, avec la masse solide de l'édifice, qu'il serait trop

difficile de faire vibrer; il la touche seulement par des bâtis légers qui le tiennent suspendu en l'air. Au-dessous de ce plancher, il y a une voûte creuse, de même étendue horizontale, qui reste constamment vide. L'air que cette cavité renferme est mis en vibration par les instrumens de l'orchestre, et, comme un grand porte-voix, renvoie leurs sons en les rendant plus forts et plus nombreux. Comme il y a très-peu de distance entre chaque point d'où le son se réfléchit dans la cavité, et celui dont il émane, il arrive que les ondes réfléchies et les ondes directes parviennent aux auditeurs à des instans si peu différens, qu'ils n'y aperçoivent point d'intervalle sensible; mais, selon que la cavité résonnante est plus ou moins profonde, et d'une forme plus ou moins bien appropriée à la configuration de la salle, celle-ci en devient plus ou moins sonore. Au reste, de tous les défauts qui peuvent assourdir une salle de spectacle, ou en général un édifice destiné à des assemblées publiques, le pire, et assurément un des moins rares, c'est l'existence de grandes cavités pratiquées mal à propos dans ses parois, et où les ondes sonores vont s'engouffrer sans pouvoir se distribuer au reste des auditeurs, si ce n'est par des échos tardifs et incommodes, qui ne font qu'affaiblir encore davantage les sons directs.

Il paraît que les anciens avaient, pour renforcer et répandre les sons, des procédés qu'ils tenaient de l'expérience, et de la nécessité où ils étaient d'avoir recours à de semblables artifices pour faire entendre leurs acteurs dans des théâtres immenses et entièrement découverts. Il y avait, dit-on, de grands vases d'airain placés dans diverses parties de l'enceinte, et dont la résonnance fortifiait le son au point de le rendre par-tout sensible et distinct. Vitruve atteste ce fait, et indique la manière dont les vases étaient placés. Mais il est impossible de concevoir comment il en pouvait résulter un pareil effet. En général, nos connaissances sont très-peu avancées pour tout ce qui concerne l'intensité des sons; et il est fort à désirer que cette partie encore toute neuve de la physique, soit étudiée et développée par quelque habile expérimentateur.

Il y a encore une autre espèce de résonnance qui tient en

quelque sorte à la nature de notre organe, et qui consiste dans la rondeur et l'éclat qu'un son acquiert lorsqu'il est soutenu par son octave ou sa quinte. Je ne veux pas parler ici du son résultant qui se produit toujours dans un pareil concours de deux sons, et qui naturellement doit contribuer à les faire mieux sentir; il s'agit de phénomènes d'une toute autre nature. Par exemple, si l'on a, dans un tuyau convenable, une anche libre qui sonne le seize-pieds ouvert, et qu'on la fasse vibrer seule, on entendra un son grave, mais sourd, qui formera presque l'extrême de ceux que nous pouvons apprécier: mais, mettez à côté de cette anche l'octave au-dessus, qui a cependant elle-même un ton encore très-grave, et faites-les résonner ensemble; vous obtiendrez, avec la même gravité, une force, une rondeur et un éclat qui vous surprendront. Aussi, dans les jeux d'orgue, ces tuyaux si graves, comme le seize-pieds et le trente-deux pieds, ne s'emploient jamais seuls; car à peine on pourrait les entendre. Ils y sont toujours accompagnés de leurs accords supérieurs. Ceci peut tenir, au moins en partie, à un fait que M. Hamel a découvert, et dont il m'a rendu témoin; c'est que, lorsque plusieurs sons vibrent en même temps, outre le son résultant grave qui peut se calculer par la théorie, on entend encore d'autres sons plus élevés, qui forment avec les premiers une série ascendante; de sorte qu'ils sont sur-tout sensibles dans les basses, où les premiers se perdent, et qu'ils se perdent dans les tons élevés, où les premiers acquièrent le plus d'énergie.

CHAPITRE X.

Organes de l'Ouïe et de la Voix.

LORSQUE, à force de combinaisons et d'expériences, nous sommes parvenus à découvrir les lois communes d'une classe de phénomènes naturels, s'il existe dans les êtres organisés quelques appareils destinés à rendre ces phénomènes sensibles, il est d'un intérêt extrême d'en étudier le mécanisme, et de le comparer à notre théorie; car, pour savante qu'elle soit, nous

trouvons toujours que la nature en savait davantage ; et l'observation de ses ouvrages , après avoir confirmé ce que nous avons découvert de véritable , nous laisse encore bien des énigmes instructives à deviner. Cette considération , très-propre à frapper des esprits philosophiques , m'a engagé à insérer ici quelques détails sur les organes de l'ouïe et de la voix. Je les extrais principalement du *Traité élémentaire de M. Magendie sur la physiologie*, et du *Traité d'anatomie de M. Cuvier*.

Tous les appareils des sens sont en général composés d'un système externe d'organes qui recueille les impressions produites par les objets extérieurs , et d'un nerf placé derrière , qui paraît destiné à nous en donner le sentiment intime. Cette disposition s'observe dans les appareils de la vision , de l'odorat , du toucher ; on la retrouve également dans l'organe de l'ouïe.

DE L'OUÏE.

Cet organe offre d'abord à l'extérieur une sorte de *pavillon* évasé par dehors , comme celui du cornet acoustique ; car , ainsi que je viens de le faire entendre , nos instrumens les plus parfaits ne sont d'ordinaire que des imitations plus ou moins heureuses des procédés de la nature. Ce pavillon se rétrécit peu-à-peu en un conduit , revêtu intérieurement de poils et d'une matière visqueuse , qui en défendent l'accès aux corps étrangers. Enfin , le fond en est complètement fermé par une membrane sèche et tendue , que la peau , devenue plus mince , recouvre en dehors , et que l'on nomme *la membrane du tympan*. Les ondulations sonores de l'air extérieur ne pouvant pas aller plus loin que cette membrane , il est vraisemblable qu'elle est destinée à les recueillir et à les transmettre à l'intérieur , fonction à laquelle sa structure élastique la rend parfaitement propre. Néanmoins la propagation du son se fait aussi par les parties solides qui l'environnent ; car elle peut être déchirée , ou même entièrement détruite , sans que la faculté d'entendre soit , dit-on , sensiblement altérée. Derrière elle , il y a une cavité qui est nommée *la caisse du tympan* , laquelle communique avec le gosier par un petit conduit , qui permet à l'air

de l'arrière-bouche d'y entrer et d'en sortir. Cette condition paraît même essentielle à la communication des sons ; car, si le conduit guttural se bouche, on prétend que la surdité s'ensuit. Mais, ce que la caisse du tympan renferme de plus singulier, ce sont quatre petits corps osseux, que l'on appelle collectivement les osselets, et que l'on désigne individuellement d'après leur forme, sous les noms de *marteau*, *d'enclume*, de *lenticulaire* et d'*étrier*. Ces quatre petits corps s'emboîtent les uns dans les autres, de manière à former une chaîne continue de matières solides, dont l'extrémité la plus extérieure, formée par le *marteau*, s'attache à la membrane du tympan, et l'intérieure, formée par l'*étrier*, s'attache par sa partie plate à une membrane analogue qui ferme un trou oblong pratiqué au fond de la caisse du tympan, et nommé la *fenêtre ovale*. Ce trou s'ouvre dans un canal osseux que l'on appelle le *limaçon*, parce qu'il est contourné en spirale, lequel aboutit à une cavité extérieure plus grande, appelée le *vestibule*. Celle-ci communique encore directement avec la caisse du tympan par un autre trou, fermé d'une membrane sèche et nommé la *fenêtre ronde*. Mais de plus, on y voit aboutir trois canaux intérieurs contournés en demi-cercles, et renfermant, selon quelques auteurs, des corps de couleur grisâtre dont on ignore l'usage. Ces canaux, avec le limaçon et le vestibule lui-même, composent ensemble une cavité creuse dans la partie la plus solide de la substance osseuse, et complètement fermée au dehors ; considérée ainsi dans son ensemble, elle prend le nom de *labyrinthe*, qu'elle mérite par la multiplicité de ses contours. Toute cette cavité est tapissée à l'intérieur d'une membrane extrêmement mince, et est entièrement, ou presque entièrement, remplie par un liquide dans lequel le nerf acoustique pénètre et peut ainsi s'épanouir. D'après cette disposition, on doit concevoir que les ondulations sonores, agissant d'abord par leur choc immédiat sur la membrane du tympan, sont transmises, par l'air de la caisse et par la chaîne des osselets, aux parois du labyrinthe, et de là, par l'intermédiaire du liquide, au nerf acoustique. C'est en effet ce que l'on peut confirmer par l'expérience ; car la membrane du tympan peut être détruite, et les trois premiers

osselets détachés par suite de maladie, sans que la faculté d'entendre soit pour cela perdue, pourvu toutefois que la membrane qui ferme la fenêtre ronde subsiste, et que le quatrième osselet, qui bouche le labyrinthe, reste appliqué contre la fenêtre ovale qu'il est destiné à fermer. Mais s'il tombe aussi, et si la membrane qui ferme le labyrinthe se rompt, de façon que le liquide renfermé dans cette cavité s'écoule, la surdité s'ensuit toujours. L'existence du nerf acoustique et son épanouissement dans un liquide par lequel les vibrations sonores se transmettent à la pulpe nerveuse qui le compose, sont donc, d'après ces faits mêmes, les seules conditions indispensables pour que l'audition puisse s'opérer.

En étudiant les organes de la voix et de la vision, nous verrons pareillement qu'ils sont construits de telle sorte que plusieurs de leurs parties les plus délicates peuvent être détruites sans que la sensation, but essentiel de l'organe, cesse de s'opérer et d'être perçue. Cette stabilité attachée à des appareils aussi utiles, n'est pas un des moindres exemples de la prévoyance infinie qui brille dans tous les détails de la construction des êtres organisés. Mais cette profondeur même de dessein que nous y découvrons, doit nous faire penser que les parties dont l'existence n'est pas indispensablement nécessaire à la production de la sensation, sont destinées à en rendre la perception plus minutieusement parfaite. Ainsi, quoique l'audition puisse s'opérer encore quand les trois premiers osselets sont tombés, toutefois, en voyant ces petits corps si bien travaillés, si délicatement suspendus, et auxquels sont attachés un grand nombre de muscles propres à les faire jouer les uns sur les autres, on ne peut douter qu'ils ne soient destinés à quelque important usage. Or, nous avons dit que le premier d'entre eux, le marteau, s'attache à la membrane du tympan; et que le dernier, l'étrier, s'attache par sa partie plate à une des membranes qui ferment le labyrinthe. On peut donc conjecturer que les muscles qui appartiennent à ces deux osselets, et aux deux autres, ont pour effet de tendre plus ou moins la chaîne, soit en la raccourcissant, l'allongeant, ou la courbant, de manière à tendre ainsi plus ou moins les membranes qui la

terminent, et à rendre par-là l'audition plus vive et plus sensible. C'est pourquoi il serait extrêmement curieux d'examiner si, comme cela est très-vraisemblable, la faculté de la perception est modifiée dans les individus chez lesquels la chaîne des osselets est rompue ; si, par exemple, ils entendent plus difficilement ; ou s'ils perdent la facilité de distinguer le ton des différens sons, leur intensité, leur timbre ou quelque autre des particularités que l'oreille apprécie quand aucune de ses parties n'est altérée. Il serait également bien curieux d'examiner, par des expériences analogues, à quoi servent les petits corps que l'on dit être renfermés dans les canaux semi-circulaires du labyrinthe ; et quelle utilité résulte de la multiplicité des contours du labyrinthe lui-même, ainsi que de la délicatesse du travail de leurs parois.

Les observations que l'on peut faire sur la construction de l'organe de l'ouïe dans les différentes classes d'animaux, confirment l'idée générale que nous venons de donner de son action dans l'homme. Elles ont, en outre, l'avantage de faire sentir l'importance relative des diverses pièces qui composent l'organe, d'après la généralité plus ou moins grande de leur application.

Suivant ce principe, la seule pièce rigoureusement essentielle au phénomène de l'audition, parce que c'est la seule qui se trouve dans tous les animaux doués du sens de l'ouïe, c'est un liquide, ou plutôt une pulpe gélatineuse, environnée d'une membrane fine dans laquelle se résolvent les dernières extrémités du nerf acoustique. Tout le reste de l'appareil est variable, et plus ou moins développé dans les différentes classes d'animaux ; il est par conséquent accessoire.

Les écrevisses présentent l'organe réduit à l'état simple d'une petite bourse renfermée dans un cylindre écailleux. Le nerf acoustique y entre par l'extrémité intérieure. L'autre extrémité est bouchée au-dehors par une membrane élastique qui est immédiatement frappée par l'air. La forme est la même dans les sèches, seulement la pulpe nerveuse contient un petit corps osseux qui y est suspendu.

Dans les poissons à branchies libres, le labyrinthe se com-

plique. Il se compose de trois rameaux semi-circulaires aboutissant à un sac divisé qui contient la pulpe gélatineuse, dans laquelle sont deux ou trois osselets, aussi durs que la pierre, qui s'y trouvent suspendus par des fibrilles nerveuses.

Dans les poissons à branchies fixes, une portion du sac gélatineux va jusqu'au crâne, où il se termine à la peau, et n'est fermé que par une membrane mince. Les osselets y sont sans consistance et se laissent écraser entre les doigts.

Les reptiles offrent trois canaux et un sac comme les poissons. Quelques-uns, le crocodile, par exemple, ont une poche de plus, un commencement de limaçon.

Tous les animaux à sang chaud offrent, comme l'homme, un labyrinthe composé, dans lequel on remarque une cavité commune ou vestibule; trois canaux semi-circulaires ayant chacun un renflement, et un organe à deux loges ou limaçon. Il n'y a plus de pierres dans le labyrinthe.

Examinons maintenant les cavités situées entre le labyrinthe et l'élément extérieur, et qui établissent une communication directe de l'un à l'autre.

Dans les poissons à branchies libres, cette communication est nulle, tout l'appareil de l'audition est enveloppé par les os du crâne.

Dans les poissons à branchies fixes, on trouve un petit canal qui, partant du labyrinthe, aboutit à une ouverture des os, située à la partie postérieure de la tête. Cette ouverture est fermée par une membrane que la peau recouvre, et qui offre ainsi l'analogie du tympan de l'homme. Il n'y a rien de plus entre l'organe et le milieu où l'animal vit.

Parmi les reptiles, les salamandres ont l'organe conformé comme les poissons de la première classe. Chez les autres reptiles, le labyrinthe offre, comme dans l'homme, une ouverture contre laquelle s'applique une plaque osseuse analogue à l'étrier. On y trouve aussi de même une seconde ouverture fermée seulement par une membrane, et par conséquent analogue à la fenêtre ronde.

Ces deux ouvertures existent aussi chez les mammifères et chez les oiseaux.

Dans tous ces animaux, comme dans l'homme, il y a une *caisse* qui communique avec la bouche par un petit canal, et au dehors par une membrane du tympan. Mais cette membrane est tantôt mince, tantôt épaisse et même écailleuse.

Dans les oiseaux, la caisse communique intérieurement à trois grandes cavités formées de lames osseuses élastiques, et qui, pénétrant dans les os du crâne, semblent très-propres à renforcer le son. Ces caisses sont sur-tout remarquables dans l'effraie. Elles sont moindres dans les hiboux et les chouettes, mais pourtant plus grandes que dans les autres oiseaux.

La forme du tympan varie selon les espèces. Dans l'homme, il est conique et évasé au dehors. Il est plane dans la taupe, qui cependant a l'ouïe très-fine. Sa direction varie autant que son étendue. Il est tantôt tourné en avant, en arrière, ou obliquement à l'axe de la tête. Dans les oiseaux, il est dirigé vers le bas, en arrière et de côté; et d'autant plus bas, que l'oiseau entend mieux les sons plus faibles; la chouette en offre l'exemple.

Dans tous les animaux où le labyrinthe présente une ouverture extérieure, cette ouverture est fermée par une plaque osseuse qui communique d'une autre part, soit à la membrane du tympan lorsqu'elle existe, soit à la peau ou très-près de la peau. Cette communication s'opère par une chaîne osseuse composée tantôt d'une tige simple, faisant partie de l'étrier, comme dans les oiseaux; tantôt par un ou plusieurs petits os de forme variée, comme dans l'homme et les mammifères. Dans l'homme, ces osselets sont mus par des muscles propres; mais, chez les autres mammifères, M. Magendie a découvert qu'ils sont simplement soutenus en place par des ligamens élastiques, de forme à-peu-près sphérique, et dont la tension paraît constante: chacun de ces ligamens a sa racine dans une petite cavité pratiquée dans les os du crâne.

Il ne nous reste plus qu'à dire un mot du conduit auditif externe. Ce conduit est nul dans les reptiles, court dans les oiseaux, et se trouve avec un plus ou moins grand développement chez presque tous les mammifères. Les animaux où il se

fait remarquer par sa grandeur, sont timides ou nocturnes, et par conséquent ont besoin de bien entendre. L'exemple en est sensible dans les gazelles, les cerfs, l'âne, le lièvre, et surtout les chauve-souris; en général, l'animal qui fuit tourne ses oreilles en arrière; celui qui chasse les tourne en avant; d'où l'on peut présumer que cette direction sert à renforcer les sons venant de l'ennemi qu'il redoute ou de la proie qu'il veut atteindre.

Quoique ces détails d'organisation ne semblent pas être du ressort immédiat de la physique, je n'ai pas hésité à les apporter, parce qu'en nous faisant connaître la variété des mécanismes employés par la nature pour réaliser l'effet de l'audition avec des degrés de perfection divers, ils nous offrent comme autant d'expériences vivantes où nous pouvons continuellement apprécier les effets qui résultent de chacune de ces conformations particulières d'organes; et la comparaison de ces effets, qu'il nous serait impossible de réaliser si parfaitement et si diversement par des appareils artificiels, paraît singulièrement propre à nous instruire sur les lois encore tout-à-fait inconnues du renflement et de la circulation des sons.

DE LA VOIX.

Le mécanisme de l'organe vocal est mieux connu que celui de l'ouïe, quoiqu'on soit encore bien loin de pouvoir l'expliquer dans tous ses détails. Il est, je ne dirai pas semblable, mais analogue aux instrumens à anches libres.

Dans l'homme, l'air, d'abord inspiré dans le poumon, et contenu dans la poitrine, en est chassé par la contraction de ces cavités, laquelle s'opère par un appareil musculaire très-puissant, que l'on nomme *les muscles de l'expiration*. De là, il est conduit dans un canal cylindrique que l'on nomme *la trachée-artère*, et qui est composé d'anneaux cartilagineux, alternés avec des anneaux membraneux flexibles, ce qui lui permet de s'allonger et de se raccourcir, quoiqu'à la vérité dans des limites très-peu étendues. Au bout de ce canal sont deux lames membraneuses de forme rectangulaire, ayant trois

de leurs bords fixés aux parois même du canal, et leurs plans placés presque parallèlement l'un à l'autre à une très-petite distance, de manière que leur intervalle offre une fente étroite, dans laquelle l'air, chassé de la poitrine, est forcé de passer avant de s'échapper par la bouche. L'organisation de ces deux lames est très-composée; mais, ce qu'il nous importe le plus de remarquer, c'est qu'elles peuvent vibrer très-rapidement par leur côté libre, et qu'elles vibrent en effet lorsque la voix se produit d'une manière continue, comme M. Magendie s'en est assuré sur des chiens vivans. Cet appareil, analogue à une anche, mais à une anche dont les lames seraient contractiles et élastiques, se nomme *la glotte*, et l'endroit de la trachée où il est placé, ainsi que les pièces qui l'accompagnent, s'appellent *le larynx*. Au-dessus de la glotte, on trouve une membrane plate, élastique, à-peu-près semblable à une langue qui, fixée seulement par sa base, peut prendre, dans la trachée, diverses inclinaisons; s'élevant et s'abaissant sur la glotte de manière à modifier la rapidité du courant d'air qui en sort. Cette membrane a reçu le nom d'*épiglotte*, qui exprime seulement sa place. Nous verrons tout-à-l'heure à quoi elle peut servir. Pour le moment, je me bornerai à dire, d'après M. Magendie, qu'elle entre en vibration aussi bien que les lèvres de la glotte, dans les sons soutenus. Après avoir dépassé cette membrane, l'air ne rencontre plus d'obstacles; il se répand dans le gosier, dans la bouche, et sort enfin au-dehors.

D'après cette description sommaire, on reconnaît avec évidence que l'organe de la voix ne peut être comparé qu'à un instrument à anche libre, où la poitrine sert de soufflet, la trachée de porte-vent, la glotte d'anche, et la bouche de tuyau pour l'écoulement de l'air. Toutes les épreuves expérimentales que l'on peut faire confirment cette analogie.

Et d'abord, il est impossible d'y voir avec quelques auteurs un instrument à cordes. Qu'y a-t-il en effet dans la glotte qui ressemble à une corde vibrante? Où trouverait-on la place nécessaire pour donner à cette corde la longueur qu'exigent les sons les plus graves? Comment pourrait-on en tirer jamais

des sons d'un volume comparable à ceux que l'homme produit? Les plus simples notions d'acoustique suffisent pour faire rejeter cette étrange opinion.

C'est donc un instrument à vent; mais cet instrument est tel, qu'il peut donner des sons très-graves avec une longueur de tuyau très-peu considérable, et que le même tuyau, presque sans changer de longueur, suffit pour produire, non-seulement une certaine série de sons, en progression harmonique, mais tous les sons imaginables et toutes les nuances de ces sons, dans l'étendue de l'échelle musicale que chaque voix peut embrasser. Ces phénomènes sont impossibles à obtenir avec le seul jeu des tuyaux de flûte. En effet, on peut bien, à la vérité, abaisser considérablement le ton de ces tuyaux, en modifiant convenablement le mode d'insufflation et la forme de l'ouverture par laquelle l'air y entre; mais un appareil insufflatoire de forme constante, et dont le pouvoir d'insufflation est seul variable comme l'est celui des poumons de l'homme, ne semble pas pouvoir donner, avec de tels tuyaux, la variété infinie de tons et de nuances que nous fait entendre la voix humaine. Au contraire, tous ces phénomènes conviennent parfaitement aux tuyaux d'anches; car alors la longueur du porte-vent étant supposée fixe, ainsi que celle du tuyau vocal placé au-delà de l'anche, celle-ci, par le seul allongement ou raccourcissement de ses lèvres, peut modifier le courant d'air de manière à obtenir tous les sons et toutes les nuances possibles de sons compris entre les limites extrêmes qu'elle comporte. Aussi, en observant la glotte des chiens pendant la production soutenue de la voix, M. Magendie a vu que, dans les sons les plus graves, les lèvres de la glotte vibraient dans toute leur longueur; mais que, à mesure que le ton s'élevait, elles se joignaient et se serraient l'une contre l'autre, sur une étendue de plus en plus considérable, de manière à diminuer de plus en plus la longueur de la portion vibrante; tellement que, dans l'extrême limite des sons aigus, la glotte n'offrait plus qu'une petite fente très-étroite et très-courte, par laquelle tout l'air expiré de la poitrine était contraint de passer. Ce jeu

est parfaitement analogue à celui de nos anches, dont il faut aussi raccourcir la languette à mesure que l'on veut faire monter le ton. Mais dans celles-ci, même lorsqu'elles sont parfaitement libres, le ton change un peu quand la force du vent éprouve des variations très-grandes d'intensité; et M. Grenié a trouvé qu'on pouvait corriger ce défaut en mettant au-dessus des anches, dans le tuyau vocal, de petites lamelles de papier, fixes seulement par leur base, et qui, s'élevant quand le courant s'accélère, s'abaissant quand il se ralentit, peuvent, par ces positions diverses, modifier les ondulations de manière que le ton reste constant, avec une intensité de son différente. On peut conjecturer que l'épiglotte, placée de la même manière, et d'une forme à-peu-près pareille, est destinée, entre autres choses, à produire un pareil effet, et qu'elle nous donne ainsi la faculté dont nous jouissons, de renfler les sons à volonté sans les altérer.

Lorsque nous avons étudié le son des anches, nous avons remarqué que le tuyau vocal, sans déterminer nécessairement les sons, avait de l'influence sur leur timbre et sur la facilité plus ou moins grande de les produire. Tel sera donc, dans l'homme, l'effet de la bouche et du conduit guttural. Ainsi, un trou percé dans cette partie du canal n'empêchera pas la voix de se produire, et en changera seulement le timbre; c'est aussi ce que l'on observe sur les individus auxquels il a été fait naturellement, ou artificiellement, quelque ouverture *au-dessus* du larynx. Même on peut, sans aucune opération, en avoir une preuve frappante. En effet, il existe au fond de la bouche un trou pareil, qui communique dans les fosses nasales, de là à l'air extérieur, et qui peut être ouvert ou fermé à volonté par une soupape membraneuse, que l'on appelle le *voile du palais*. Dans la production habituelle de la voix, cette soupape s'applique sur le trou, et le ferme, de sorte que l'air sort seulement par la bouche. Mais, en faisant un léger effort pour pousser l'air dans les fosses nasales, on empêche l'application de la membrane, le trou reste ouvert, et le son sort par le nez et par la bouche à-la-fois. C'est ce que l'on

appelle *parler du nez*. Or, tout le monde sait que, dans ce cas, la voix acquiert un timbre particulier, et entièrement différent de son timbre ordinaire.

Au contraire, si vous faites un trou dans le porte-vent d'une anche, le vent sortira par ce trou; et, en le supposant suffisamment large, l'anche ne parlera pas. C'est aussi ce qui arrive aux personnes chez lesquelles il survient, *au-dessous* du larynx, une ouverture fistuleuse. Elles ne peuvent parler qu'après avoir bouché ce trou. M. Magendie a eu sous ses yeux un individu qui se trouvait dans ce cas, et qui était contraint de porter habituellement autour du col une cravate serrée pour pouvoir parler.

L'allongement et le raccourcissement dont la trachée-artère est susceptible peuvent, quoique très-limités, servir aussi à varier les tons, sur-tout dans les cas extrêmes où l'influence de l'épiglotte ne serait peut-être plus suffisante; car, dans les anches, M. Grenié a reconnu que la longueur du porte-vent avait une influence analogue. Remarquons toutefois que cette influence et celle de l'épiglotte, comme membrane compensatrice, ne sont pas des élémens essentiels à la production même du son; de sorte, par exemple, que l'épiglotte pourrait vraisemblablement être détruite sans que la voix cessât de se former. Mais leur absence ou leur présence doit se faire sentir dans le chant, où les mêmes sons doivent être souvent produits avec d'inégales intensités, et quelquefois avec une intensité variable, le ton restant le même.

L'étendue des diverses voix humaines, depuis les plus graves jusqu'aux plus aiguës, embrasse environ trois octaves. Les voix les plus étendues ne passent guère deux octaves en sons bien pleins et bien justes. Les voix d'hommes, les plus graves, vont communément de sol_1 à fa_3 , en appelant ut_1 l'*ut* du violoncelle, ou le son fondamental d'un tuyau de quatre pieds bouché. Les voix de femmes, les plus hautes, vont communément de re_3 à la_4 . En général, les voix des enfans et des femmes sont plus aiguës que celles des hommes faits, parce que les lames de leur glotte sont proportionnellement beaucoup plus courtes. Elles augmentent dans l'homme vers quinze ou

seize ans, et acquièrent en peu de temps une longueur presque double de celle qu'elles avaient d'abord; c'est ce qui produit le changement qu'on observe à cette époque dans le son de la voix, et qui la rend plus grave. Quant à son volume absolu, il dépend, dans chaque individu, de l'épaisseur des lèvres de l'anche, et de la force d'expiration que les poumons peuvent exercer.

Cette application de la théorie des anches à la formation de la voix humaine est si évidente, qu'on ne concevrait pas comment on a pu envisager l'organe vocal d'une autre manière, si l'on ne reconnaissait que les lois de l'acoustique, principalement pour ce qui concerne les phénomènes des anches, étaient peu connues de la plupart des anatomistes qui ont voulu l'expliquer. Toutefois il est juste de dire que quelques-uns d'entre eux s'en étaient formé des idées exactes. Car, outre les deux habiles anatomistes que j'ai déjà cités, Senac, dès 1755, avait présenté à ce sujet les idées les plus justes, dans son Anatomie; et, en 1741, Ferrein avait publié, dans les volumes de l'Académie des Sciences, un mémoire plein de sagacité et d'expériences, qui offre les preuves les plus multipliées et les plus décisives de toute la théorie exposée plus haut. Non-seulement Ferrein et Senac ont dit que les lèvres de la glotte étaient l'instrument vocal, et qu'elles agissaient comme les lèvres des anches; mais Ferrein a fait vibrer ces lèvres dans des cadavres, par des insufflations artificielles; et il en a tiré des sons de ton variable, selon la longueur qu'il laissait aux parties vibrantes et le degré de tension qu'il leur donnait. Il a reproduit les mêmes effets avec le larynx d'un cochon, en adaptant sa trachée au porte-vent d'un soufflet d'orgue, et y soufflant de l'air. J'ai répété plusieurs fois cette expérience, et l'ai trouvée très-exacte. En serrant la trachée avec la main, à la hauteur de la glotte, pendant que l'air passe, on modifie le son de manière à imiter parfaitement le grognement d'un cochon vivant. On voit aussi, dans cette expérience, l'épiglotte vibrer. Enfin, pour compléter ces épreuves j'ai fait adapter à un porte-vent d'anche deux lèvres en gomme élastique, disposées parallèlement l'une à l'autre comme celles de la glotte; et, en ajustant cet appareil à un soufflet d'orgue, je lui ai fait rendre des sons.

Après ces explications, il sera très-facile de comprendre les modifications essentielles que l'organe de la voix présente dans les différens animaux. J'emprunte ces détails dans les leçons d'anatomie de M. Cuvier.

Les animaux à poumons, c'est-à-dire les mammifères, les oiseaux et les reptiles, sont les seuls qui aient une véritable voix. La nature de l'organe vocal est, dans tous, essentiellement la même. C'est un instrument à anche libre, que l'air expiré des poumons fait parler. Mais il y a de grandes différences dans la disposition de ce mécanisme.

Les mammifères et les reptiles n'ont, comme l'homme, qu'une seule glotte, ou anche, placée à l'endroit où la trachée-artère vient se terminer dans la bouche. Leur voix se produit donc absolument de la même manière. Mais l'homme seul, par la flexibilité de ses lèvres, par la mobilité de sa langue, et les autres modifications de sa bouche, est susceptible d'une variété d'articulations qu'une organisation plus imparfaite interdit aux animaux; aussi, tout vice de conformation qui détruit quelqu'un de ces avantages, altère la formation de la parole, ou même la rend absolument impossible.

La classe des oiseaux, qui renferme des chanteurs si mélodieux, offre, dans la construction de l'organe vocal, diverses particularités dont on sentira facilement l'influence sur la variété des sons. La plus remarquable, c'est que la glotte et les lames vibrantes y sont placées presque à la sortie des poumons, et à l'origine de la trachée-artère. Du reste, quoique cette trachée soit proportionnellement plus longue et plus extensible que celle des mammifères, elle est encore beaucoup trop courte pour que les sons graves qui en sortent, et sur-tout la variété infinie des nuances de sons qui constituent un chant, puissent y être produits comme dans un tuyau de flûte. Cela suffit pour indiquer que, dans cette classe, comme chez les mammifères, l'instrument vocal est une anche; et la preuve que l'anche y est placée au bas de la trachée, c'est que, si l'on coupe le cou à un oiseau criard, même très-loin de la tête, comme M. Cuvier en a fait l'expérience, il crie comme auparavant; parce que l'instrument qui produit chez lui le son

existe encore, au moins dans sa partie la plus essentiellement nécessaire à la formation de la voix.

J'ai dit que la trachée des oiseaux était plus contractile que celle des mammifères. Elle offre encore une autre particularité; c'est que son extrémité supérieure peut se resserrer et s'élargir de manière à laisser un passage plus ou moins libre au courant d'air. Les variations de la longueur et de l'ouverture sont donc deux moyens dont l'oiseau peut disposer pour varier les tons de sa voix et les intensités de ces tons; de même que la forme des tuyaux qu'on met au-dessus des anches ordinaires réagit sur les tons qu'elles produisent, pour une longueur donnée des lames vibrantes. Mais, probablement, ce moyen auxiliaire ne sert qu'à former les nuances les plus délicates; car nous avons vu que, dans les anches, le seul changement de longueur des lames vibrantes est toujours la première et la principale cause du changement de ton.

Nous avons vu aussi que la forme du tuyau vocal adapté aux anches ordinaires, modifie la qualité du son qu'elles produisent, et le rend plus ou moins semblable à celui de divers instrumens. Des variétés analogues se produisent dans les oiseaux par une cause pareille, c'est-à-dire par la forme de leur trachée-artère. Ceux qui ont une trachée conique évasée vers la bouche ont la voix éclatante, comme les jeux de trompettes dans les orgues. D'autres ont, dans certains endroits de leur trachée, des renflemens qui doivent y modifier la qualité du son; de même qu'il arrive dans les orgues par l'effet des tuyaux à cheminée. Mais les oiseaux chanteurs ont une trachée cylindrique, toute composée d'anneaux aussi fins que des fils. On conçoit que la qualité du son peut être modifiée par la construction plus ou moins délicate de la trachée, et par la nature plus ou moins élastique de la substance qui la compose. Elle doit l'être encore par la constitution de l'anche, qui peut être plus ou moins criarde, comme nous observons que cela arrive dans nos anches ordinaires. Mais ces détails, dont la variété se suppose aisément, n'appartiennent pas d'assez près à notre sujet pour que nous devions les parcourir, et il nous suffira d'avoir montré le point de vue véritable sous lequel on doit les envisager.

LIVRE IV.

De l'Électricité.

CHAPITRE PREMIER.

Phénomènes généraux des Attractions et Répulsions électriques; distinctions de deux sortes d'électricité.

Jusqu'ici toutes les propriétés que nous avons découvertes dans les corps, leur étaient constamment inhérentes, et semblaient essentiellement attachées à la matière qui les compose. C'est ainsi que les corps pesans ne peuvent pas être dépouillés de la pesanteur, ni leurs molécules de la propriété de s'attirer mutuellement.

Nous allons examiner maintenant d'autres genres de modifications qu'on peut imprimer passagèrement aux corps, et qui sont d'autant plus singulières que, sans ajouter ni ôter à leurs particules aucun principe tangible et pondérable, elles y développent néanmoins des forces très-puissantes, dont l'influence mécanique peut ensuite mettre en mouvement des corps matériels.

Par exemple, si l'on prend un bâton de cire d'Espagne, ou un tube de verre ou un morceau d'ambre, qui n'ait pas été touché depuis long-temps, et qu'on les approche de quelques petites parcelles de papier, de paille ou d'autres petits corps légers, ceux-ci n'en éprouveront aucune impression; mais si, avant de faire cette épreuve, on frotte légèrement et vivement le tube de verre, le bâton de cire ou le morceau d'ambre, avec une étoffe de laine ou une peau de chat bien sèche, lorsqu'on les approche ensuite des petits corps légers dont nous parlions tout-à-l'heure, on voit ceux-ci s'envoler vers eux. Voilà donc une nouvelle propriété, une faculté nouvelle que le frottement a développée dans des corps qui ne la possédaient pas auparavant. Cette propriété a été ap-

pelée *électricité*, du mot grec ἤλεκτρον, qui signifie *ambre*, parce qu'en effet c'est dans cette résine qu'elle a été remarquée le plus anciennement.

On en était resté pendant des siècles à cette première observation; mais, depuis environ soixante et dix ans, ces phénomènes, mieux étudiés, ont fait découvrir une multitude de résultats importants, dont l'ensemble forme aujourd'hui une des plus belles parties de la physique.

Le premier pas à faire, ce doit être de bien étudier le phénomène fondamental que nous avons d'abord décrit, et d'en bien définir les diverses circonstances. Pour le rendre plus sensible, il faut soumettre au frottement des tubes de verre, de soufre, ou de cire d'Espagne, d'un volume un peu considérable; par exemple, de deux centimètres de diamètre, et de trois ou quatre décimètres de longueur. Alors les attractions sur les corps légers sont beaucoup plus vives; on les voit s'élaner avec rapidité vers le tube électrisé. Quelques-uns y adhèrent; d'autres, après l'avoir touché, sont repoussés rapidement. Si l'on approche le tube de la main ou du visage, on éprouve, à une certaine distance, une sensation pareille à celle que produiraient des toiles d'araignées; et si on le touche avec le doigt ou avec une boule de métal, on entend le pétilllement d'une étincelle qui s'élanche sur le corps qu'on lui présente. Cette étincelle devient visible lorsque l'on fait l'expérience dans l'obscurité, et l'on voit aussi une lueur bleuâtre suivre constamment le frotoir à mesure qu'on le promène sur le tube. On peut encore agrandir ces effets en substituant au tube un gros globe de verre ou de résine, ou un cylindre, ou un plateau de verre que l'on serre entre des coussins fixes, et que l'on fait tourner circulairement par le moyen d'une manivelle. Cet appareil se nomme une *machine électrique*: on y ajoute ordinairement plusieurs autres dispositions de détail qui en rendent les effets plus sûrs et plus intenses. Nous en parlerons plus loin, quand nous aurons acquis les connaissances théoriques sur lesquelles ces dispositions sont fondées. En attendant, l'appareil tel que nous venons de le décrire, suffit pour mettre dans une en-

tière évidence les phénomènes fondamentaux que nous avons annoncés.

Nous ignorons complètement quelle est la nature du principe qui produit tous ces phénomènes, comment il existe dans les corps, comment son action est développée par le frottement. Mais, quel qu'il soit, nous le définirons, pour abréger, par le nom d'*électricité*. C'est ainsi que nous avons nommé *calorique* le principe inconnu qui produit la chaleur.

Toutes les substances vitrées et résineuses produisent ces phénomènes à des degrés divers. On les obtient aussi avec des étoffes de soie; mais ils ne réussissent pas du tout avec les métaux. Si l'on prend un tube de métal d'une main, et qu'on le frotte de l'autre avec une peau de chat ou une étoffe de laine, il ne donnera pas de traces lumineuses; il n'excitera aucune sensation dans les organes; il n'attirera point les corps légers.

Mais si, au lieu de tenir le tube métallique à la main, vous l'attachez à un tube de verre ou de résine bien sec qui lui serve seulement de support, et qu'ensuite vous le frottez comme tout-à-l'heure, sans le toucher autrement que par le frottoir, il acquerra toutes les propriétés électriques. La même chose arrivera, si vous le frappez avec une peau de chat après l'avoir suspendu sur des cordons de soie; ou si, pour le tenir, vous enveloppez votre main avec quelques doubles d'une étoffe soyeuse. Ces propriétés ne subsisteront qu'autant que le tube métallique sera exempt de toute autre communication; car si vous le touchez avec le doigt ou avec un autre morceau de métal, il les perdra à l'instant.

Il est clair, d'après ces expériences, que si le métal n'acquerrait pas d'abord les propriétés électriques par le frottement, ce n'était pas qu'il fût inhabile à les recevoir; mais il l'était à les conserver, puisque, lorsqu'il les possède, on les lui ôte en le touchant avec le doigt, ou avec un autre morceau de métal. Ainsi, quand on le tenait à la main pour le frotter, l'électricité qui s'y développait devait se perdre à mesure. Il ne faut donc pas s'étonner si elle ne produisait pas d'effet. Mais elle est devenue sensible, quand le métal a

été suspendu dans l'air par des supports de verre, de soie ou de résine; c'est donc une preuve que ces diverses substances résistaient à l'écoulement de l'électricité; et, en effet, l'électricité ne se répand pas rapidement d'un bout à l'autre d'un ruban de soie, d'un tube de verre, ou d'un bâton de résine; car, lorsque ces corps sont électrisés par le frottement, si on les touche dans une partie de leur surface, on dépouille bien cette partie des propriétés électriques, mais elles subsistent encore dans tout le reste. C'est pour cela qu'on peut électriser ces corps par le frottement, en les tenant à la main par une de leurs extrémités.

Ceci nous conduit donc à diviser les corps naturels en deux grandes classes, selon qu'ils transmettent ou ne transmettent pas *librement* l'électricité. Nous les nommerons, en conséquence, *conducteurs* et *non-conducteurs*. On appelle aussi ces derniers *corps isolans*, parce que, lorsqu'on les emploie comme supports, ils servent à *isoler* les autres de toute communication avec des conducteurs qui pourraient leur enlever l'électricité (1).

L'air atmosphérique est évidemment de la classe des corps non-conducteurs; car, s'il livrait un libre passage à l'électricité, aucun corps qui y serait plongé ne pourrait produire des phénomènes électriques durables. Or, un tube de verre ou de résine frotté, conserve ses propriétés électriques pendant un temps même considérable, quoiqu'il soit environné d'air.

Au contraire, l'eau est un corps conducteur; car, si l'on mouille avec ce liquide, ou seulement avec sa vapeur, un tube de verre ou de résine électrisé par frottement, il perd à l'instant toute sa vertu. Aussi la vapeur aqueuse suspendue

(1) Autrefois on donnait aux corps non-conducteurs, le nom d'*idio-électriques*, c'est-à-dire, électriques par eux-mêmes; et l'on appelait les corps conducteurs, *anélectriques*, c'est-à-dire, non électriques, parce qu'on croyait que les premiers seuls pouvaient être électrisés par frottement. C'est une erreur. Tous les corps s'électrisent quand on les frotte, mais tous n'ont pas la faculté de retenir l'électricité qu'on y développe; et, pour qu'elle y reste, il faut les isoler.

dans l'air altère-t-elle les propriétés isolantes de ce fluide ; et c'est pour cela que les expériences électriques ne réussissent jamais mieux que dans les temps froids et secs, où il y a très-peu de vapeur aqueuse suspendue dans l'air.

Cette faculté diverse des corps pour retenir l'électricité ou pour la transmettre, a été découverte par Grey. Il en dut l'observation au hasard, mais à un hasard dont il sut habilement profiter.

On ne connaît jusqu'ici aucune relation constante entre l'état des corps et leur faculté conductrice. Parmi les corps solides, les métaux transmettent parfaitement l'électricité ; mais les gommés et les résines sèches ne la transmettent pas. Presque tous les liquides sont de bons conducteurs ; cependant l'huile est un conducteur fort imparfait. La cire froide et le suif conduisent mal l'électricité ; fondus, ils conduisent bien. La faculté conductrice s'observe dans les états les plus opposés ; par exemple, dans la flamme de l'alcool et dans la glace. La température des corps paraît n'avoir aucune influence sensible sur les étincelles électriques qui en émanent. Celles qui sortent de la glace ne sont pas froides, et celles qui sortent d'un fer rouge ne semblent pas plus brûlantes.

L'air et les gaz secs, outre la propriété isolante qu'ils possèdent, paraissent encore avoir la faculté de retenir l'électricité à la surface des corps par leur force de pression. Car, si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique un corps conducteur électrisé, et isolé sur des supports de verre ou de résine, ce corps, à un certain degré de raréfaction de l'air, perd toute son électricité, qui s'élançe avec une lueur bleuâtre sur les autres corps conducteurs par lesquels elle peut communiquer au sol. Si l'on place dans les mêmes circonstances un corps non-conducteur, par exemple, un bâton de cire d'Espagne électrisé par le frottement, l'électricité l'abandonne aussi lorsque l'on a fait le vide ; mais elle s'en sépare plus lentement ; et il faut un intervalle de temps fort sensible pour que le corps en soit tout-à-fait dépouillé. Ces phénomènes semblent donc indiquer que l'électricité n'est retenue à la surface des corps conducteurs que par la

pression de l'air, et qu'à la surface des corps non-conducteurs, comme le verre sec et la résine, elle est retenue par cette pression, jointe à la difficulté qu'elle éprouve à se dégager de leurs particules.

La propriété conductrice des métaux s'emploie utilement pour faciliter les usages de la machine électrique. On suspend à des cordons de soie, ou sur des cylindres de verre, une barre métallique dont l'une des extrémités est placée très-près du globe ou du plateau qui est électrisé par frottement. Alors, à mesure que l'électricité se développe, elle passe dans ce conducteur métallique isolé, et s'y conserve. Si l'on touche ce *premier conducteur* avec une autre barre métallique isolée de même, et que l'on tienne par la substance isolante, cette seconde barre devient électrique à son tour, et l'on peut ainsi transporter où l'on veut l'électricité. Peu importe à quel point on touche le premier conducteur, il donnera par-tout de l'électricité. Si l'on y attache un fil métallique d'une longueur quelconque, fût-ce de mille mètres, ce fil deviendra de même instantanément électrique dans toute son étendue, pourvu qu'il soit pareillement isolé. La transmission s'opérera également si l'on emploie, dans la chaîne de communication, des masses d'eau liquide isolées, par exemple contenues dans des vases de verre. Ce sont là des conséquences et des preuves du libre passage que les corps conducteurs offrent à l'électricité.

Pour que ces expériences réussissent, il faut que les cordons de soie ou les tubes de verre qui servent à isoler les conducteurs, soient parfaitement secs; autrement les propriétés électriques s'affaiblissent, et cessent en très-peu de temps. Les fils de soie très-fins et bien secs forment d'excellens isolements pour les corps légers. Si l'on suspend à un pareil fil une petite boule de moelle de sureau, substance fort légère et éminemment conductrice, on a, sans aucuns frais, un des appareils les plus utiles pour étudier la théorie de l'électricité. Il faut, pour la commodité des expériences, attacher ce petit pendule à une tige solide recourbée, portée sur un pied mobile, comme le montre la *fig. 1*.

Si l'on fait toucher la petite boule à un tube de verre ou de

résine électrisé par frottement, et qu'ensuite on l'en sépare sans la toucher, elle aura acquis les propriétés électriques. Elle attirera des pailles, des poussières et d'autres petits corps légers qu'on lui présentera. Si l'on avance la main vers elle, on la verra s'en approcher; en un mot, elle aura été électrisée *par communication*.

Ces propriétés subsisteront pendant un temps assez considérable, sur-tout si l'air est sec, pourvu que l'on ne touche point la petite boule; mais, si on la touche, elle rentrera aussitôt dans son état naturel; elle aura perdu l'électricité qu'elle avait acquise.

Ici, de même que dans le cas du conducteur électrisé que l'on touche, on peut demander où l'électricité s'en va, et pourquoi elle ne produit plus aucun effet. On le verra par l'expérience suivante.

Au lieu de toucher la boule avec le doigt, touchez-la avec une autre boule suspendue de même à un fil de soie qui l'isole, mais dont le volume soit quatre-vingts ou cent fois plus considérable que celui de la première. Alors, après le contact, vous trouverez que celle-ci a perdu sa vertu électrique presque aussi complètement que si on l'avait touchée avec le doigt. Vous comprendrez ainsi qu'une quantité donnée d'électricité perd de son intensité en se distribuant à une plus grande surface; car l'intérieur des boules n'y fait rien; et, qu'elles soient vides ou pleines, le phénomène se passe de même. D'après cela, on conçoit que la petite boule perd sa vertu électrique lorsqu'on la touche, parce qu'elle la partage avec le corps humain et la masse immense de la terre, qui sont des corps conducteurs, avec lesquels elle se trouve alors en communication. C'est pour cela que, dans les expériences électriques, on appelle souvent la terre *le réservoir commun* de l'électricité.

Examinons maintenant de plus près ce qui se passe lorsque l'on approche, pour la première fois, le tube frotté de la petite boule pour l'électriser. D'abord elle s'en approche, se porte sur lui, et s'attache à sa surface; mais, après qu'elle l'a touché pendant un instant très-court, qui suffit pour lui faire partager l'électricité du tube, elle est repoussée par lui, et semble

le fuir tant qu'elle conserve ses propriétés électriques. A la vérité, en approchant très-brusquement le tube, on parvient quelquefois à faire revenir la petite boule, et à changer ainsi la répulsion en attraction; ceci est un phénomène composé dont nous démêlerons plus loin la cause; mais, en nous bornant à ce qui se passe lorsqu'on présente de loin le tube à la petite boule, comme pour pressentir ses mouvemens après qu'elle en a partagé l'électricité, on voit qu'elle commence toujours par le fuir. De là nous tirerons cette conséquence importante, qu'à l'exception de certains cas particuliers dont il faudra chercher plus tard la cause, les corps électrisés par partage se repoussent entre eux.

A la vérité, il semble, au premier coup d'œil, que l'expérience précédente ne nous autorise pas tout-à-fait à tirer cette conclusion. En effet, on voit bien que la petite boule fuit le tube dont elle a partagé l'électricité, mais on ne voit pas que le tube fuie la boule. Cela vient uniquement de ce qu'il est trop lourd. La boule se déplace seule, ne pouvant le déplacer. Mais, voulez-vous rendre les choses pareilles? prenez deux petites boules égales; attachez-les aux deux extrémités d'un fil de lin qui est un corps conducteur de l'électricité; puis suspendez ce fil par son milieu à un fil de soie, comme le montre la figure 2; alors les deux petites boules communiqueront ensemble par le fil de lin, et leur système sera cependant isolé dans l'air par le fil de soie. Touchez les deux boules, ou seulement l'une d'elles, avec un tube électrisé; non-seulement vous verrez qu'elles fuiront le tube, après qu'elles auront partagé son électricité, mais elles se fuiront entre elles, et les deux moitiés du fil de lin s'écarteront comme le représente la figure 3.

La répulsion de la petite boule électrisée, *fig. 1*, a lieu également, quelle que soit la nature du tube que l'on emploie, pour lui communiquer l'électricité, pourvu que ce soit toujours le même tube qu'on lui présente ensuite. Mais si, après lui avoir communiqué l'électricité d'un tube de verre frotté avec de la laine, on en approche un tube de résine ou de soufre, frotté de la même manière, bien loin de fuir ce nouveau tube, elle s'en approchera, et se portera vers lui avec plus d'avidité

encore qu'elle ne ferait si elle n'avait pas été électrisée préalablement. La même chose a lieu si l'on commence par électriser la petite boule avec le tube résineux, et qu'on en approche ensuite le tube de verre; dans un cas, comme dans l'autre, il y a toujours attraction.

Nous voyons donc que, lorsqu'un corps a été préalablement électrisé et isolé comme notre petit pendule, les autres corps électrisés qui en approchent n'agissent pas tous sur lui de la même manière, puisque les uns le repoussent et les autres l'attirent. Cela nous oblige désormais à distinguer deux sortes d'électricités, l'une analogue à celle que développe le verre frotté par une étoffe de laine : nous la nommerons *l'électricité vitrée*; l'autre, semblable à celle qu'exerce la résine, pareillement frottée avec une étoffe de laine; nous la nommerons *l'électricité résineuse*. Cette belle découverte est due à Dufay.

Alors tous les phénomènes d'attractions et de répulsions que nous avons jusqu'à présent observés, pourront s'exprimer par cette loi très-simple : *Les corps chargés d'électricité de même nature se repoussent mutuellement; chargés d'électricités de nature différente, ils s'attirent.*

Quoique cette proposition semble être purement l'énoncé des phénomènes, il ne faut pas cependant y attacher une idée de réalité absolue; car des mouvemens pareils à ceux que les corps électrisés nous présentent, peuvent être produits sans aucune attraction ou répulsion véritable des particules matérielles les unes par les autres. Pour en donner un exemple, concevons un vase AA' , *fig. 4*, rempli d'un liquide pesant, tel que l'eau ou le mercure, et suspendu verticalement par un cordon à un point fixe S . Si l'on ne touche point à ce vase, il restera immobile en vertu des lois de l'équilibre, et le fluide pesant qu'il renferme ne lui fera prendre aucun mouvement horizontal, parce que les pressions latérales, exercées à une même profondeur dans les sens opposés BA , $B'A'$, sont égales entre elles. Mais supposons qu'au moyen d'un miroir ardent MM , on dirige un cône de lumière sur le point A ; et, qu'en fondant le métal, on fasse ainsi un petit trou dans la paroi en ce point; alors le liquide s'écoulant librement par ce

trou, la pression dans le sens BA y deviendra nulle; et la pression B' A', qui reste constante, n'étant plus alors contre-balancée, le vase s'éloignera du miroir comme s'il était repoussé par lui. Au contraire, si le foyer du cône lumineux était dirigé au point B, à travers la matière du vase et du fluide supposée transparente, et que la matière de la paroi s'y fondît de même, le vase s'approcherait du miroir comme s'il en était attiré. Cependant il n'y a là aucune attraction ni répulsion véritable; ce n'est qu'un simple effet de pression hydrostatique entièrement propre au fluide contenu dans le vase A', et tout-à-fait analogue au phénomène de rotation que nous avons observé dans le premier livre, page 60. Or, non-seulement ceci doit nous mettre en garde contre l'idée d'une attraction ou d'une répulsion réelle exercée entre les particules matérielles des corps électrisés; mais on verra plus tard que les mouvemens de ces corps se produisent exactement par un semblable mécanisme; car leurs particules matérielles, quoique électrisées, n'acquièrent aucune influence réelle les unes sur les autres; tout se passe entre les électricités vitrées et résineuses qui les recouvrent, et dont l'action réciproque se borne à augmenter ou à diminuer, sur certaines parties de leurs surfaces, la pression que l'électricité y exerce contre l'air environnant qui la retient, ou en général contre les obstacles qui s'opposent à son déplacement. D'après ces considérations, si nous continuons d'employer les mots d'attraction et de répulsion pour exprimer les mouvemens des corps électrisés, il faudra ne les entendre que comme un moyen commode d'énoncer les circonstances de ces mouvemens, et nullement comme une indication réelle de leur véritable cause.

Ces attractions et ces répulsions ne s'exercent pas seulement à travers l'air; elles se font sentir aussi à travers les autres corps non conducteurs, par exemple, à travers le verre et la résine. Si l'on suspend au centre d'un matras de verre un tube de cire d'Espagne frotté et électrisé, il attire les corps légers situés hors du matras, comme il faisait avant l'interposition des parois de verre. L'attraction a lieu également si les corps légers sont suspendus dans le matras, et que le tube électrisé

soit placé au-dehors. Cette transmission d'action s'opère aussi à travers les corps conducteurs ; mais elle est masquée par un autre phénomène dont nous parlerons plus loin.

Pour savoir si une substance donnée, étant frottée d'une certaine manière, acquiert l'électricité vitrée ou l'électricité résineuse, il faut essayer l'effet qu'elle produit sur le pendule électrique déjà chargé d'une électricité connue. Par exemple, on touche ce pendule avec un tube de verre frotté par une étoffe de laine ; il prend l'électricité vitrée. On frotte de même la substance que l'on veut éprouver, et on l'approche ensuite du petit pendule. Si elle le repousse, elle a l'électricité vitrée ; si elle l'attire, elle possède l'électricité résineuse. On peut, si l'on veut, répéter l'épreuve inverse en donnant d'abord au petit pendule l'électricité d'un tube de résine ; alors les effets sont inverses aussi. Comme les signes d'électricité donnés par les diverses substances sont quelquefois assez faibles, il est bon de savoir augmenter la sensibilité de l'appareil. On y parvient en diminuant le diamètre de la petite boule de sureau, et en la suspendant à un fil de soie plus fin. Si l'on se sert, par exemple, d'un de ces fils tels qu'ils sortent du cocon, et qu'on lui donne trois ou quatre décimètres de longueur, une électricité même très-faible suffira pour le mettre en mouvement. Nous apprendrons plus tard à construire des appareils encore plus sensibles, lorsque nous nous serons formé une théorie exacte des phénomènes, qui nous permettra d'apprécier toute la délicatesse de leurs rapports ; mais celui que nous venons de décrire, suffira dès à présent dans le plus grand nombre des cas.

En soumettant à cette épreuve l'électricité développée par le frottement d'un grand nombre de substances, on voit que la nature de cette électricité n'a rien d'absolu, et qu'elle dépend de l'espèce du corps frottant tout autant que de celle du corps frotté. Par exemple, le verre poli frotté avec une étoffe de laine, prend, comme nous l'avons dit, l'électricité vitrée ; frotté avec une peau de chat, il acquiert l'électricité résineuse. La soie frottée avec la résine prend l'électricité résineuse ; frottée avec le verre poli, elle prend l'électricité vitrée.

Voici une table de plusieurs substances qui acquièrent l'é-

lectricité vitrée, quand on les frotte avec celles qui les suivent dans la liste; et l'électricité résineuse, quand on les frotte avec celles qui les précèdent, du moins, entre des limites de température fort étendues.

La peau de chat,	Le papier,
Le verre poli,	La soie,
L'étoffe de laine,	La gomme-laque,
Les plumes,	Le verre dépoli.
Le bois,	

On voit assez, par cette table, qu'il n'y a aucun rapport apparent entre la nature, ou la constitution des substances, et l'espèce d'électricité qu'elles développent, étant frottées les unes avec les autres; même, il n'y a rien d'absolu à cet égard, pour aucune d'elles; car le rang de chaque substance, dans la liste complète, varie lorsqu'on élève sa température, ou simplement quand on modifie l'état de sa surface; par exemple, quand on change son degré de poli.

La seule loi générale que l'on ait trouvée dans ces phénomènes, c'est que *le corps frottant et le corps frotté acquièrent toujours des électricités diverses, l'une résineuse, l'autre vitrée.*

Pour mettre ce résultat en évidence, il faut isoler les deux corps que l'on veut frotter l'un contre l'autre. S'ils sont solides, on leur adapte des manches de verre ou de résine, par lesquels on les tient. Il est bon, quand on le peut, de donner aux substances frottées la forme de plaques, pour que la friction s'opère sur une plus grande surface. On peut isoler et éprouver de même un corps solide et une étoffe ou deux morceaux d'étoffes, deux peaux d'animaux, etc. Lorsqu'on a opéré le frottement pendant quelques instans, on sépare les deux corps; et, les tenant toujours par le manche isolant, on les présente tour-à-tour à un pendule électrique bien sensible, chargé d'une espèce d'électricité connue. Alors on trouve constamment qu'un d'eux l'attire, et que l'autre le repousse: leurs électricités sont donc diverses. Je n'indique ce genre d'épreuve que comme un exemple; car il faut souvent en employer de beaucoup plus sensibles. On a fait un nombre infini d'expériences pour savoir quelles étaient les circonstances qui déterminent chacun des corps à prendre l'espèce particu-

lière d'électricité qu'il acquiert; mais on n'a rien découvert à cet égard de bien décisif. Les plus légères circonstances semblent quelquefois décider ce partage; par exemple, lorsqu'on frotte une plaque de verre poli contre une plaque de verre dépoli, la première prend l'électricité vitrée, la seconde la résineuse, sans que l'on puisse dire pourquoi le poli de la surface a cette influence. Si deux rubans de soie blancs, pris dans la même pièce, sont frottés en croix l'un contre l'autre, celui qui est frotté transversalement prend l'électricité résineuse, celui qui est frotté longitudinalement prend l'électricité vitrée. On ne sait pas davantage comment le sens du frottement agit. Enfin, quelquefois l'effet est variable avec les mêmes corps. OEpinus assure avoir observé ce fait en frottant une plaque de cuivre contre une de soufre, et aussi en frottant deux carreaux de verre l'un contre l'autre : il les retirait toujours dans des états d'électricité contraire; mais la même espèce d'électricité appartenait tantôt à l'une des plaques, tantôt à l'autre.

On tire de ces phénomènes une expérience assez piquante. Deux personnes montent sur des tabourets dont les pieds sont formés par des tubes solides de verre ou par toute autre substance isolante : ces tabourets se nomment des *isoloirs*. Une des deux personnes tient à la main une peau de chat bien sèche, et en frappe les habits de l'autre. La première prend l'électricité vitrée, la seconde la résineuse, comme on peut le vérifier en leur faisant approcher tour à tour la main d'un petit pendule chargé d'une électricité connue. Si une personne non isolée les touche tour à tour, elle tirera de chacune une étincelle. Il est clair que ces phénomènes n'ont lieu qu'autant que les personnes électrisées restent sur le plateau isolant; car, si elles en descendent, elles perdent aussitôt leur électricité en la partageant avec la masse immense de la terre. C'est pourquoi, lorsqu'on isole seulement une des deux personnes, soit celle qui frappe, soit celle qui est frappée, celle-là seule qui est isolée donne des signes d'électricité; et, si elles ne le sont ni l'une ni l'autre, il ne s'en produit sur aucune des deux. Il est sensible, d'ailleurs, qu'elles ne doivent jamais se toucher ni communiquer l'une à l'autre autrement que par le frottoir.

La peau de chat est très-commode pour cette expérience et pour beaucoup d'autres analogues, parce qu'elle s'électrise avec beaucoup de facilité. C'est pour cela qu'en passant la main, dans un temps sec, sur le dos d'un chat vivant, on voit ses poils se hérissier et être attirés par la main; quelquefois même on les entend pétiller, et on en tire des étincelles. Cela n'arrive que dans des temps froids où l'air isole très-bien. Les cheveux, lorsqu'ils ne sont point graissés, s'électrisent aussi avec facilité par le frottement, sur-tout s'ils sont fins et souples, comme le sont ordinairement les cheveux blonds.

Le frottement des liquides contre les corps solides développe aussi de l'électricité. Pour le prouver, on adapte à la machine pneumatique un récipient cylindrique de verre, dont l'extrémité supérieure est hermétiquement fermée par une capsule de bois où l'on verse du mercure. On fait le vide dans le récipient; le mercure, pressé par l'air extérieur, filtre à travers les pores du bois, et tombe en une pluie fine qui frappe les parois du cylindre de verre. Alors, en approchant un petit pendule électrique que l'on tient suspendu par son fil de soie, on voit que ce cylindre est lui-même électrisé. Pour que l'expérience réussisse, il faut avoir soin de faire bien sécher le cylindre, afin qu'il ne perde pas l'électricité, toujours assez faible, que lui donne le frottement du mercure contre sa surface.

Ceci explique un phénomène que l'on observe dans les baromètres bien purgés d'air. Lorsqu'on penche ces baromètres, de manière que la colonne de mercure remplisse rapidement toute la partie vide du tube, si l'expérience est faite dans l'obscurité, on voit se développer instantanément une lueur phosphorique semblable à celle que produit dans le vide un courant continu d'électricité.

On peut aussi exciter l'électricité par le frottement d'un gaz contre un corps solide. Si l'on dirige un courant d'air atmosphérique contre la surface d'un carreau de verre, au moyen d'un soufflet, le carreau prend l'électricité vitrée. Un mouchoir de soie, bien sec, étant secoué dans l'air, s'électrise aussi, mais résineusement.

Le frottement n'est pas l'unique manière de développer l'électricité, quoique ce soit la plus commune. Il s'en développe aussi quand on comprime les substances, ou quand on les dilate, ou même quand on les exfolie. Je parlerai plus loin de ces phénomènes; je ne veux ici que les indiquer. On observe encore qu'il se dégage de l'électricité dans la fusion de certains corps. Si l'on verse du soufre fondu dans un vase de métal isolé, le soufre, en se refroidissant, prend l'électricité vitrée, et le métal, la résineuse; quelquefois le phénomène est inverse, mais toujours les deux électricités sont produites à-la-fois. Il n'est pas toutefois bien certain que le phénomène ne soit pas produit par l'adhérence qui s'établit presque toujours entre le métal et le soufre plutôt que par la fusion.

Plusieurs substances minérales cristallisées, de nature vitreuse, ont aussi la propriété de devenir électriques quand on les chauffe à un certain degré. Alors une des extrémités du cristal prend l'électricité vitrée, l'autre la résineuse; de sorte que les parties où elles règnent sont séparées, mais elles sont encore produites simultanément.

Enfin, il se développe aussi de l'électricité dans plusieurs combinaisons chimiques, et même dans le seul contact de toutes les substances hétérogènes; mais ces phénomènes, pour être étudiés, et même pour être aperçus, exigent des appareils beaucoup plus composés et plus sensibles que ceux que nous avons pu former jusqu'à présent; c'est pourquoi nous nous en occuperons plus tard.

CHAPITRE II.

Des lois que suivent les Attractions et les Répulsions apparentes des corps électrisés.

Après avoir reconnu le phénomène des attractions et des répulsions électriques, la première chose qu'il faut faire, c'est de déterminer les lois suivant lesquelles elles s'exercent à

diverses distances. On y réussit aisément au moyen de la balance de torsion que nous avons décrite page 345; et cette découverte, due à Coulomb, est une des plus belles applications qu'il ait faites de son ingénieux instrument.

Nous avons vu alors que cet instrument est essentiellement formé d'un fil métallique vertical dont le bout supérieur est attaché à un point fixe, et dont l'inférieur porte une aiguille horizontale. Quand on veut apprécier de très-petites forces, on les fait agir sur l'extrémité de cette aiguille, et l'on mesure leur intensité par l'angle dont elles l'écartent de son point de repos. En un mot, on balance ces forces par la force de torsion, qui est toujours proportionnelle à l'angle de torsion, ainsi que nous l'avons annoncé d'après l'expérience, page 341.

Pour appliquer cet appareil à la mesure des attractions et des répulsions électriques, on fait l'aiguille en gomme laque, qui est une substance très-isolante, et l'on fixe à l'une de ses extrémités une petite boule de moelle de sureau *b*, *fig. 5*. Puis, ayant placé l'index du micromètre de torsion *M* sur le zéro de sa division, on tourne le tambour entier qui le porte jusqu'à ce que la petite boule *b* vienne aussi se placer devant le zéro de la division tracée sur les parois de l'appareil (1). On s'aperçoit que cette condition est remplie, lorsqu'en regardant du côté opposé de la cage de verre, dans le plan vertical qui contient le fil de suspension et l'aiguille, on voit celle-ci dirigée vers le point de zéro.

Cela fait, on fixe une seconde boule *a*, à l'extrémité d'un

(1) On trace cette division sur une bande de papier que l'on colle dans une direction horizontale tout autour de la cage de verre. Si celle-ci est circulaire, on fait la division en degrés. Mais quand on veut introduire dans la balance des corps d'un volume un peu considérable, on ne trouve plus de cylindres de verre assez grands pour former les parois de l'appareil, et on les construit avec quatre glaces verticales, dont l'assemblage forme un carré. Alors une bande de papier collée horizontalement sur ces glaces, à la hauteur de l'aiguille, devient tangente au cercle qu'elle décrit. On marque donc le zéro de la division sur le point où la direction de l'aiguille est perpendiculaire à chaque face, et l'on porte, de part et d'autre de ce point, des divisions égales, qui représentent les tangentes des arcs de 1° , 2° , 3° , etc.

cylindre très-mince de gomme laque, dont la longueur soit telle, qu'étant introduit verticalement dans l'intérieur de la cage de verre, il descende cette boule au niveau de la précédente; et on le place de manière que cette seconde boule réponde aussi au zéro de la division latérale; ce que l'on vérifie comme précédemment. Alors la première boule se trouve écartée de ce point d'un arc égal à la somme des rayons des deux boules, et la petite torsion qui en résulte la maintient en contact avec l'autre.

Maintenant il est clair que, si l'on touche un instant ces boules, ou seulement une d'entre elles, avec un corps déjà électrisé et isolé, elles s'électriseront aussi par communication, et toutes deux de la même manière; elles devront donc se repousser mutuellement : mais, comme la première seule est mobile, l'aiguille qui la porte tournera d'une certaine quantité; et, après quelques oscillations, elle s'arrêtera à un certain point d'équilibre que l'on pourra reconnaître sur la division latérale. Alors le degré de torsion qui existera dans le fil fera l'équilibre à la force répulsive des deux boules, et pourra servir à la mesurer.

C'est en effet ainsi que l'on opère; mais, comme il ne faut qu'une extrêmement petite force pour tordre un fil de métal d'un grand angle, on conçoit qu'il ne faut communiquer aux boules que de très-petites charges d'électricité. Pour y parvenir, on les touche seulement avec une grosse tête d'épingle dont la tige est cachée dans un bâton de cire d'Espagne; on électrise cette tête d'épingle par communication, soit en la mettant un instant en contact avec le premier conducteur d'une machine électrique, soit en la touchant avec un tube de verre ou de résine frotté. On l'introduit dans la cage de verre par une petite ouverture convenablement pratiquée pour cet objet, en la tenant par le bâton de cire qui l'isole; et, quand elle a touché la boule fixe, on la retire aussitôt.

En opérant de cette manière, Coulomb, dans une de ses expériences, trouva qu'après le contact l'aiguille avait décrit un angle de 56° . Alors il tordit le fil de suspension en sens contraire de cette répulsion, de manière à rapprocher l'aiguille

jusqu'à 18° de la boule fixe; et il fallut pour cela tourner l'index du micromètre de 126° .

Enfin il rapprocha l'aiguille jusqu'à ce que son écart ne fût plus que de $8^\circ \frac{1}{2}$; lorsqu'il y fut parvenu, la marche totale de l'index du micromètre, comptée depuis le zéro de la division, se trouva être de 567° .

Pendant ces expériences les boules ne perdirent pas sensiblement d'électricité. Car, par des essais préliminaires, Coulomb s'était assuré que, *ce jour-là*, les balles électrisées, repoussées à 30° de distance l'une de l'autre, se rapprochaient seulement d'un degré en trois minutes; et, comme il n'avait employé que deux minutes à faire les trois expériences que nous avons rapportées, il s'ensuit que l'on pouvait bien négliger, comme insensible, la diminution qu'éprouvait l'électricité des boules, tant par le contact de l'air que par la déperdition le long des supports. Cela tenait, comme on le verra par la suite, à la sécheresse de l'air le jour de cette expérience, et à l'excellent choix des supports isolans.

Pour découvrir les conséquences de ces expériences, représentons par abd , *fig. 6*, la circonférence décrite par la boule mobile b ; soit c le centre de cette circonférence, et prenons d'abord l'arc ab de 56° , comme on l'a trouvé après la première répulsion. Il s'ensuit qu'alors la force répulsive des deux boules était contre-balancée par une torsion de 36° exercée dans le sens ab ; car, par les dispositions prises en commençant l'expérience, la torsion est nulle quand l'aiguille se trouve au point a .

Dans le second essai on tord le fil de 126° suivant le sens ba . Si l'aiguille était libre, cette torsion l'amènerait en d' , à 126° au-delà du point a ; mais, au contraire, la force répulsive la retient en b' à 18° en-deçà de ce point. Donc, à cette distance, la force répulsive des deux boules faisait équilibre à une torsion de $126^\circ + 18^\circ$ ou 144° .

Enfin, dans la troisième épreuve, la torsion indiquée par le micromètre a été de 567° , toujours dans le sens ba ; mais au lieu d'aller à 567° au-delà du point a , l'aiguille est restée à $8^\circ \frac{1}{2}$ en-deçà de ce point; ainsi la force répulsive qui la main-

tenait à cette distance faisait alors équilibre à une torsion de $567^{\circ} + 8^{\circ}\frac{1}{2}$, ou $575^{\circ}\frac{1}{2}$.

Nous avons donc ce tableau comparatif, entre les torsions et les distances.

Arc de distance des deux boules.	Mesure de la force répulsive par la torsion.
36°	36°
18°	144°
8° $\frac{1}{2}$	575° $\frac{1}{2}$

Déjà on y découvre une loi remarquable. Les arcs de distance contenus dans la première colonne sont, à très-peu près, entre eux, comme les nombres 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, tandis que les torsions correspondantes, qui mesurent les effets des forces répulsives sur l'aiguille, sont entre elles comme les nombres 1, 4, 16; c'est-à-dire inversement proportionnelles aux carrés des précédens. Ces rapports prouvent donc que les forces électriques suivent, comme l'attraction céleste, la raison inverse du carré des distances.

A la vérité, la distance rectiligne des deux boules est mesurée par la corde qui les joint, et non par l'arc circulaire que sous-tend cette corde. Secondement, la force répulsive qu'elles exercent l'une sur l'autre agit obliquement sur l'aiguille; et par conséquent ne contribue pas toute entière à la faire tourner. Mais cette obliquité est fort petite dans nos expériences, à cause du peu d'étendue des arcs; et la même raison fait aussi qu'il y a très-peu de différence entre eux et leurs cordes. Ces circonstances légitiment donc la conséquence que nous avons tirée de nos observations. Mais on peut achever de la mettre tout-à-fait hors de doute en effectuant le calcul d'une manière rigoureuse. Car on trouve ainsi que, lorsque les arcs de répulsion n'excèdent pas 36°, les rapports conclus des arcs, et ceux qu'on déduit des distances, ne diffèrent pas dans des quantités sensibles aux observations. En nous tenant

donc en-dedans de ces limites, nous pourrons appliquer la loi du carré des distances aux arcs mêmes, ce qui simplifiera beaucoup les calculs.

Le fil employé par Coulomb dans ses expériences était d'argent; et, par sa finesse, il avait une extrême sensibilité de torsion. Coulomb imagina des appareils plus sensibles encore, destinés à indiquer les plus petites quantités d'électricité, *fig. 7.* Ces appareils, que nous nommerons des *électroscopes*, sont de véritables balances électriques dans lesquelles le fil de métal est remplacé par un simple fil de soie, tel qu'il sort du cocon, et de 4 pouces de longueur. L'aiguille est un petit fil de gomme-laque long de 12 lignes, terminé à une de ses extrémités par un petit cercle de clinquant très-léger (1). Dans un de ces appareils dont Coulomb a fait usage, l'aiguille et le clinquant pesaient ensemble $\frac{1}{2}$ grain. Le fil de soie a, sous cette longueur, une flexibilité telle qu'en agissant sur lui avec un bras de levier d'un pouce, il ne faut qu'un poids d'un soixante millième de grain pour le tordre de 360° . Pour communiquer l'électricité au clinquant, on fait passer, à travers un bâton de cire d'Espagne, un fil de cuivre terminé d'une part par une petite balle de sureau doré, et de l'autre par une boule métallique, ou par un crochet dont la pointe rentre dans la cire. On introduit ce bâton ainsi armé dans l'intérieur de la cage de verre, le crochet en dehors, et on le fixe de manière que le centre de la boule dorée, vue par le fil de suspension, réponde au zéro de la division sur les parois de la cage. Quand l'aiguille est en repos, on tourne doucement l'index du micromètre de torsion jusqu'à ce que le clinquant

(1) On forme aisément ces fils, en chauffant à la flamme d'une bougie le milieu d'un petit bâton de gomme-laque, que l'on tient par ses deux extrémités. Lorsque cette résine commence à se fondre, on écarte rapidement les deux extrémités, et la matière fondue se tire communément en un fil très-fin, qui adhère, de part et d'autre, aux deux bouts solides. On tire de la même manière des fils de cire d'Espagne, et même des fils de verre; mais, pour ces derniers, à moins d'employer un tube déjà très-fin, la chaleur d'une bougie ne suffit pas, il faut y employer la lampe d'émailleur.

vienna s'appliquer contre la boule dorée; alors l'appareil est prêt à agir. Si l'on communique de l'électricité au crochet de cuivre par un moyen quelconque, elle se propage dans la boule et dans le clinquant qui est repoussé aussitôt. La sensibilité de ces électroscopes est telle que si, après avoir électrisé par frottement un bâton de cire d'Espagne, on le présente au crochet extérieur, même de loin, et en le tenant à trois pieds de distance, l'aiguille est chassée à plus de 90° . Nous verrons plus loin comment l'électricité peut se développer ainsi à distance, et sans aucun contact. Pour le moment, nous ne donnons ce résultat que comme une preuve de l'extrême sensibilité de l'appareil. Au moyen de cet électroscope, il est bien facile de répéter toutes les expériences indiquées dans le précédent chapitre, sur la nature de l'électricité excitée dans différents corps par leur frottement mutuel.

Après avoir déterminé les lois de la répulsion électrique, il était naturel de chercher celle de l'attraction qui s'exerce entre des corps chargés d'électricité de différente nature; c'est aussi ce que Coulomb a fait par les mêmes procédés. Mais alors il ne faut plus que les boules se touchent dans leur position initiale avant d'être électrisées; il faut, au contraire, qu'elles soient séparées, et que la torsion les empêche de se réunir. Pour cela, on commence par enlever la boule fixe *a*, *fig. 8*; et, par le moyen de la tête d'épingle isolée, on donne à la boule mobile une électricité d'une certaine nature, par exemple, résineuse. Cela fait, on tourne l'index du micromètre d'un angle connu *c*; le fil étant libre, suit ce mouvement; et, après quelques oscillations, l'extrémité de l'aiguille s'arrête devant un autre point *b* de la division circulaire, lequel se trouve éloigné de *c* degrés de celui où elle était d'abord. Cette opération a donc transporté le zéro de torsion de la quantité connue *c*, dans le sens *a b*.

Alors, on replace la boule fixe *a*, et on lui donne une électricité différente de la première; ce sera dans notre exemple de l'électricité vitrée. Les deux s'attirant, l'aiguille marche vers la boule fixe *a*, et si l'équilibre est possible, elle s'arrête quelque part en un certain point que je désignerai par *b'*. On

observe ce point sur la division ; puis on tourne ou on détourne le micromètre de quantités connues pour varier la torsion, et l'on observe de même, dans chaque cas, les nouvelles positions où l'aiguille s'arrête. Comparant les torsions et les distances, comme nous l'avons fait en étudiant les répulsions, on trouve qu'elles suivent une loi pareille ; et l'on en conclut que les forces d'attraction produites par les électricités de nature diverse, sont, comme les forces répulsives, réciproquement proportionnelles au carré de la distance.

Il faut, dans ces expériences, observer une précaution sans laquelle on ne réussit point. Lorsque la force attractive des deux boules les détermine à se rapprocher, l'intensité de leur attraction augmente à mesure que leur distance devient moindre ; et, si cette cause existait seule, elles finiraient par se joindre. Mais la torsion s'oppose à leur rapprochement ; et la résistance augmente à mesure que l'aiguille s'éloigne de son point de départ b pour aller vers l'autre boule. Or, au-delà d'une certaine distance, cette résistance ne croît plus assez vite pour vaincre l'accroissement de la force d'attraction ; de sorte que, l'équilibre devenant impossible, les boules arrivées à ce point se précipitent l'une vers l'autre, et finissent toujours par se joindre. Un calcul très-simple peut mettre ceci en évidence, et déterminer les limites d'écart où il faut s'arrêter.

Il arrive même que les boules se joignent encore dans des cas où l'équilibre est possible d'après le calcul. Cela vient de ce que la flexibilité de la suspension permet à l'aiguille d'osciller quelque temps autour du point d'équilibre où elle doit enfin se fixer. Si les amplitudes de ces oscillations amènent la boule mobile assez près de la boule fixe pour que l'attraction croisse plus rapidement que la torsion, celle-ci ne suffit plus pour ramener l'aiguille, et la boule mobile est entraînée jusqu'au contact.

Coulomb a encore déterminé la loi des attractions électriques par un autre procédé que je rapporterai ici, parce qu'il offre une vérification du précédent, et qu'il nous servira encore dans la théorie du magnétisme. Il consiste à suspendre horizontalement, par un fil de cocon, une aiguille de gomme-

laque, dont l'extrémité porte un disque de clinquant que l'on électrise. Devant cette aiguille, à quelque distance, on place un globe chargé d'une électricité différente, qui l'attire et la fait osciller en vertu de son action. On détermine ensuite par le calcul la force attractive, à diverses distances, pour divers éloignemens du globe électrisé, d'après le nombre des oscillations exécutées par l'aiguille en un temps donné; de même que l'on détermine la force de la pesanteur terrestre d'après les oscillations du pendule ordinaire. Les résultats ainsi obtenus confirment la loi du carré des distances que la balance de torsion avait fait découvrir.

La même méthode servirait encore à déterminer la loi des répulsions; car, en communiquant au globe et au disque des électricités de même nature, le disque sera repoussé, la direction de l'aiguille s'intervertira, et elle oscillera en vertu de cette répulsion dans une position diamétralement opposée à la première; mais, à l'exception de ce retournement qui influera sur la distance du disque au globe, les observations et les calculs se feront comme auparavant.

A l'aide des résultats auxquels nous venons de parvenir, on peut calculer, pour toutes les distances possibles, l'énergie de l'attraction ou de la répulsion de deux boules électrisées, lorsqu'on a observé cette énergie pour une seule distance connue.

Mais ceci ne donne encore que la mesure de l'effet total; on ne voit pas dans quelle proportion chacune des boules y contribue. Cependant, à moins qu'elles ne soient parfaitement égales, et également électrisées, on conçoit qu'elles doivent y contribuer inégalement. Il nous reste donc à découvrir cette proportion.

On y parviendrait aisément, si l'on pouvait donner ou enlever à l'une des boules une portion d'électricité qui eût un rapport connu avec ce qu'elle possède déjà. Car, en mesurant la nouvelle torsion qui fait équilibre à ce nouvel état, et la comparant avec celle qui avait lieu d'abord à la même distance, on saurait comment l'électricité propre de chaque boule influe sur leur effort total. Or, il est très-facile d'ex-

lever ainsi à chaque boule une quantité d'électricité qui soit justement la moitié de celle qu'elle possède. Il ne faut pour cela que la faire toucher un seul instant par une autre boule de même nature, d'égal diamètre, et isolée avec une égale perfection; car, tout étant symétrique pour les deux boules, il est évident que l'électricité devra se partager également entre elles; de sorte qu'après le contact, l'action propre de la boule touchée sera moitié moindre. En opérant ainsi, on trouve que la force totale d'attraction ou de répulsion, qui s'exerçait primitivement entre cette boule et la boule fixe de la balance, est, après le contact, exactement réduite à moitié.

Cette réduction n'a pas seulement lieu pour des boules, mais pour des cercles, et probablement pour tous les corps dont la forme, ou la distance entre eux, est telle qu'on peut, dans le calcul de leur attraction, les considérer comme des points. Coulomb a substitué à la boule fixe de la balance un cercle de fer de 10 lignes de diamètre, en laissant toujours une boule de sureau à l'extrémité de l'aiguille. Il a électrisé ces deux corps simultanément par le moyen de la tête d'épingle; la répulsion a chassé l'aiguille; et, lorsqu'on l'a eu ramenée à une distance de 30° , le micromètre marquait 110; la force répulsive était donc de 140° . Alors il a fait toucher un instant le petit cercle de fer par un autre de même matière et d'un diamètre égal; aussitôt l'aiguille s'est rapprochée; et pour la ramener comme dans le premier cas à 30° de distance, il a fallu détordre le fil jusqu'à ce que l'index du micromètre fût revenu à 40° ; en sorte que la force répulsive était réduite à $40^\circ - 30^\circ$ ou 70° , moitié de 140° , qui était son intensité primitive.

Ces expériences présentent en outre une particularité remarquable; c'est que le partage se fait exactement de la même manière, quelle que soit la nature des corps conducteurs mis en contact, pourvu que leurs dimensions soient les mêmes. Coulomb a fait toucher la boule de sureau fixe par des boules égales de cuivre et de plusieurs autres substances; il a fait toucher le cercle de fer par un cercle de papier d'un diamètre égal; toujours le partage s'est fait également.

Ces observations nous conduisent à deux conséquences importantes. La première, c'est que la force totale d'attraction ou de répulsion variant, pour chaque distance, dans le même rapport que les quantités d'électricités propres à chacun des deux corps qui réagissent, il faut nécessairement que l'expression de son énergie soit proportionnelle au produit de ces deux quantités. Alors chaque boule ou chaque cercle contribue à l'effort total qui les attire ou les écarte, selon la valeur du facteur qu'il y introduit. Nous nommerons désormais ce facteur la *réaction électrique* de la boule ou du cercle, dont il mesure l'action; et nous étendrons, par analogie, la même dénomination à tous les corps de forme quelconque, lorsqu'on observera leur action électrique à une distance assez grande pour qu'ils puissent être considérés comme de simples points.

La seconde conséquence, c'est que le partage de l'électricité entre des corps conducteurs de même figure et de même volume, se faisant toujours dans des proportions égales, quelle que soit la nature de leur substance, il en résulte que ces corps n'agissent point sur l'électricité par une affinité chimique dépendante de la nature et de l'arrangement de leurs particules matérielles, et ne sont pour elle que des vases où elle se distribue mécaniquement, selon ses propres lois. Du moins, les choses se passent ainsi quand on opère sur des corps d'un volume sensible, comme cela a toujours nécessairement lieu dans les expériences que nous venons de discuter. Mais on en verra plus tard d'autres dans lesquelles on détermine des courans d'électricité à agir sur de simples particules matérielles; alors elle semble s'attacher à ces particules, et se répartir inégalement entre elles, selon leur nature chimique. Peut-être, au reste, que, dans ce cas, la forme des particules, jointe à leur excessive petitesse, y modifie la distribution de l'électricité et l'intensité de l'action exercée à distance, de manière à produire toute la diversité des phénomènes; sans que la nature même des substances y contribue autrement que par la différence de configuration.

CHAPITRE III.

Des lois suivant lesquelles l'électricité se dissipe par le contact de l'air et par les supports qui la retiennent imparfaitement.

LA loi générale des attractions et des répulsions électriques est bien connue par ce qui précède ; mais , pour en vérifier les conséquences avec exactitude , et suivre le principe électrique dans le détail de ses effets les plus intimes , il faut s'assurer de la constance de son énergie , ou au moins déterminer les lois suivant lesquelles cette énergie s'affaiblit par le contact de l'air et par l'imperfection des supports isolans. Tel est l'objet de ce chapitre , dont les élémens sont encore tirés des travaux de Coulomb.

Lorsqu'un corps conducteur électrisé est soutenu par des supports isolateurs , l'expérience apprend que l'électricité de ce corps décroît et s'anéantit assez rapidement. Plusieurs causes paraissent concourir à produire cet effet. D'abord , il n'existe probablement pas , dans la nature , de substance parfaitement isolante ; car on n'en connaît aucune qui ne propage , au moins sur sa surface , une forte électricité : le verre , la cire d'Espagne , la gomme-laque elle-même , transmettent l'électricité de cette manière , difficilement à la vérité , mais sensiblement. On peut s'en assurer en formant des cylindres de ces diverses substances , et les tenant quelque temps en contact par une de leurs extrémités seulement , avec le premier conducteur d'une machine électrique. Car , après les avoir retirés , si l'on présente cette extrémité à l'aiguille de l'électroscope , on voit qu'elle s'est imprégnée de l'électricité du conducteur ; et même , en coupant le bout du petit cylindre , on trouve que l'électricité s'est aussi propagée sur le reste de sa surface dans une certaine longueur , avec une intensité décroissante.

Tous les supports dont on se sert pour isoler les corps électrisés , doivent donc produire sur eux une absorption ana-

logue ; et , s'ils sont assez courts pour pouvoir être ainsi électrisés dans toute leur longueur , ils produiront un écoulement lent , mais continu , de l'électricité ; de sorte qu'en vertu de cette seule cause , la réaction électrique du corps isolé devra progressivement s'affaiblir.

Secondement , les corps électrisés sont toujours enveloppés et touchés , dans tous les points de leur surface , par l'air atmosphérique , lequel transmet aussi l'électricité avec une facilité plus ou moins grande , selon la quantité de vapeur aqueuse qui s'y trouve mêlée , et peut-être selon les modifications que la chaleur ou d'autres circonstances apportent dans les propriétés mêmes de ses élémens chimiques ; de sorte que l'on doit généralement le regarder comme composé d'une infinité d'atomes plus ou moins conducteurs. D'après cela , chaque molécule d'air qui touche un corps électrisé , doit prendre une partie de son électricité. Mais , dès qu'elle s'en est imprégnée dans la proportion qui convient à sa grosseur et à sa faculté conductrice , elle est repoussée aussitôt , et remplacée par une autre qui s'électrise comme elle , et est chassée à son tour ; de sorte que , par le seul effet de ces contacts successifs , continuellement renouvelés , l'électricité des corps doit encore s'affaiblir , suivant une progression dépendante de la faculté conductrice de l'air.

Enfin les vapeurs aqueuses suspendues dans l'air contribuent encore à cette déperdition d'une autre manière ; car elles s'attachent à la surface des supports en plus ou moins grande quantité , selon qu'elles sont abondantes ou rares , et selon que la matière du support a plus ou moins d'affinité pour l'eau. Celles de ces particules qui sont les plus voisines du corps électrisé , en reçoivent immédiatement l'électricité ; et , si la force avec laquelle il les repousse ensuite est moindre que l'affinité chimique qui les attache au support , elles doivent transmettre en partie cette électricité aux molécules qui les avoisinent , et celles-ci de même aux suivantes , de sorte que toutes ces particules , éminemment conductrices , forment comme une chaîne sur laquelle , à la vérité , l'intensité de l'électricité doit aller en décroissant

depuis le corps conducteur, mais qui pourtant, lorsque le support n'a pas une longueur suffisante, peut enfin la conduire jusque dans les corps environnans, et de là dans le sol. Si les particules qui forment cette chaîne sont plus rapprochées les unes des autres qu'elles ne le sont dans l'air lui-même, ce qui doit souvent arriver, l'électricité se perdra plus rapidement le long du support que par le contact de l'air; et c'est ce qui a lieu fréquemment, comme on le verra bientôt.

Quelque difficulté qu'il paraisse y avoir à éluder cette dernière cause, on sent qu'il est indispensable de le faire pour connaître le décroissement d'électricité produit par le seul contact de l'air, et pouvoir ensuite en tenir compte dans les observations composées où il se mêle à la perte produite par les supports. Le seul moyen d'y parvenir, c'est de choisir, pour supports, les substances les plus isolantes, et d'atténuer assez leurs dimensions pour que leur surface contienne proportionnellement moins de molécules d'eau et d'autres particules conductrices, qu'il ne peut s'en trouver dans l'air environnant; car alors le support isolera au moins aussi bien que l'air, et le peu d'étendue de son contact avec le corps électrisé permettra de négliger tout-à-fait la différence.

Par divers essais faits dans cette vue, Coulomb trouva que, lorsque l'intensité de l'électricité n'était pas très-forte, un petit cylindre de cire d'Espagne ou de gomme-laque, d'une demi-ligne de diamètre et de 18 ou 20 lignes de longueur, suffisait presque toujours pour isoler parfaitement une balle de sureau de cinq ou six lignes de diamètre, ou du moins pour l'isoler aussi bien que l'air environnant. Car, en soutenant la boule par plusieurs de ces cylindres, au lieu d'un seul, l'électricité ne s'affaiblissait pas plus rapidement, quoique la facilité de la déperdition par leur surface s'augmentât avec le nombre des points de contact. Cette déperdition était donc alors égale à celle que l'air seul eût opérée par son contact sur les mêmes points. Coulomb s'assura de même que, lorsque l'air était sec, un fil de soie très-fin, passé dans la cire d'Espagne bouillante, et ne formant ensuite qu'un petit cylindre

tout au plus d'un quart de ligne de diamètre, opérant aussi l'isolement, pourvu que l'on donnât à ce fil une longueur de cinq à six pouces. Un fil de verre tiré à la lampe, et ayant cinq ou six pouces, n'isole la balle que dans les jours très-secs; encore faut-il pour cela qu'elle soit chargée d'une très-faible électricité; il en est de même d'un cheveu ou d'un fil de soie, à moins qu'ils ne soient enduits de cire d'Espagne, ou, ce qui vaut encore mieux, de gomme-laque pure.

Guidé par ces observations préliminaires, Coulomb souda la boule fixe de sa balance à l'extrémité d'un fil de gomme-laque pure, de 20 lignes de longueur; et il termina la suspension par un fil de soie très-fin, enduit de cire d'Espagne, en sorte qu'il pouvait considérer cette boule comme parfaitement isolée. La boule mobile l'était également, puisque l'aiguille qui la porte est aussi un cylindre très-fin de gomme-laque. Coulomb choisit d'abord ces deux boules d'égal diamètre, et il employa une balance assez sensible pour que la torsion d'une circonférence entière répondît, sur l'extrémité de l'aiguille, à une force de $\frac{1}{340}$ de grain. Le zéro de torsion du fil étant amené au centre de la boule fixe, et les deux boules en contact, on les touche toutes deux avec une tête d'épingle électrisée et isolée, conformément à la méthode que j'ai déjà décrite dans nos premières expériences; la répulsion chasse l'aiguille mobile, qui, après quelques oscillations, se fixe à une certaine distance de son point de départ, par exemple à 40° .

Alors on tord le fil de suspension, de manière à la ramener à une distance moindre, par exemple à 20° . Pour cela, je suppose qu'il faille tourner l'index du micromètre de 140° . Alors la force de torsion, égale à la force répulsive des deux boules, est $140^\circ + 20$ ou 160° .

On observe, avec une montre à secondes, l'instant précis où la boule mobile s'est arrêtée justement à cette distance; il est 6 heures 50 minutes.

Comme l'électricité se perd par le contact de l'air, la force répulsive des boules diminue graduellement; et, après quelques minutes, elles sont plus près l'une de l'autre que 20° . Pour les ramener à cette distance, on détord le fil d'une quantité

connue, par exemple, de 30° . Sa force de torsion étant diminuée de cette quantité, la boule mobile est chassée plus loin que 20° . On attend que la perte de l'électricité l'y ramène, et l'on observe ce second instant. Je suppose que cela arrive à 6 heures 53 minutes, par conséquent trois minutes après la première observation; alors la force de torsion égale à la répulsion des deux boules, est

$$140^\circ - 30^\circ + 20^\circ \text{ ou } 130^\circ.$$

La diminution de la force répulsive, entre les deux expériences, est donc égale à $160^\circ - 130^\circ$ ou 30° , c'est-à-dire à la quantité dont on a détordu le fil pour ramener les boules à la même distance. Cet effet s'est produit en 3'; et comme, dans de petits intervalles, on trouve qu'il est proportionnel au temps, il s'ensuit que la perte est de 10° par minute. D'ailleurs, la force répulsive moyenne entre les deux essais est $\frac{160 + 130^\circ}{2}$ ou 145° . En lui comparant la diminution observée, on voit que la force électrique des deux boules diminuait ce jour-là de $\frac{10}{145}$ ou $\frac{1}{14\frac{1}{2}}$ par minute, en vertu du seul contact de l'air.

Coulomb trouva constamment, par des expériences de ce genre, que, pour un même jour et un même état de l'air, l'affaiblissement de l'électricité, dans un temps très-court, est proportionnel à son intensité, en sorte que le rapport de ces deux élémens est invariable. Mais il change avec l'indication de l'hygromètre, et par conséquent avec la quantité de vapeurs aqueuses suspendues dans l'air.

Il serait très-intéressant de faire sur ce sujet un plus grand nombre d'expériences, pour découvrir le rapport qui doit exister entre la quantité des vapeurs aqueuses et la déperdition plus ou moins rapide de l'électricité. On saurait encore par-là si ces vapeurs seules produisent tout le phénomène, ou si la pression et la température des molécules mêmes de l'air ne contribuent pas aussi à le modifier. Si l'on était parvenu à mesurer ces influences diverses, on trouverait peut-être, dans

la balance électrique, le plus exact et le plus sensible des hygromètres. Réciproquement, d'après la seule indication des instrumens météorologiques, on pourrait assigner quelle devrait être la proportion d'affaiblissement de l'électricité. Par le manque où nous sommes de ces connaissances, on est obligé de déterminer directement cette proportion, par l'expérience, pour chaque jour où l'on a besoin de la connaître, c'est-à-dire toutes les fois que l'on a des recherches exactes à faire sur l'intensité des forces électriques.

Il est fort heureux pour les observations, que la loi de ce décroissement soit aussi simple; car puisque, dans un même état de l'air, il est proportionnel à l'intensité absolue de la force répulsive, il suffit de le déterminer à chaque fois, par une seule expérience, pour pouvoir le faire ensuite servir à corriger toutes les autres. Il y a plus : la loi que nous venons de trouver permet de calculer l'intensité des forces électriques pour une époque quelconque, quand on l'a une fois observée et que l'on connaît la loi du décroissement pour ce jour-là. J'ai expliqué le détail de ce calcul dans le *Traité général*. Ici je ne puis que l'indiquer. En discutant les résultats qu'il donne, on est conduit à voir que la même loi de décroissement doit s'étendre au cas où les deux corps qui réagissent l'un sur l'autre, sont inégaux en volumes et sont chargés d'inégales quantités d'électricité. C'est en effet ce que l'expérience confirme. Quel que soit le volume de la boule fixe par rapport à la boule mobile, quelle que soit la quantité initiale d'électricité qu'on leur donne, qu'elles aient été électrisées simultanément ou l'une après l'autre, dans des proportions quelconques, le décroissement instantané de leur force répulsive totale, mesurée à une même distance, est toujours dans une même proportion avec son intensité; en sorte que toutes les observations sont également propres à trouver ce rapport constant. Bien plus, ce rapport est encore le même, quand on emploie des boules de diverses matières. La nature de la substance dont elles sont faites n'a absolument aucune influence sur la déperdition de l'électricité par le contact de l'air, au moins sur la portion de cette électricité qui agit à

distance par attraction et par répulsion ; et cela confirme bien l'observation que nous avons déjà faite que les corps matériels d'un volume sensible ne paraissent nullement retenir le principe électrique par une affinité propre, mais par le seul effet de la résistance qu'opposent à son expansion les particules des surfaces conductrices, et la pression de l'air environnant. Par exemple, un jour où l'électricité décroissait de $\frac{1}{82}$ par minute pour chacune des boules de sureau de la balance, Coulomb trouva que sa déperdition était aussi de $\frac{1}{82}$ quand il remplaçait une de ces boules par une boule de cuivre ; et, ce qui paraîtra plus extraordinaire, elle était aussi de $\frac{1}{82}$ pour une boule de cire d'Espagne que l'on avait chargée d'électricité en la faisant toucher à un corps fortement électrisé ; de sorte que, dans ce cas même, l'espèce de difficulté que la surface d'un pareil corps oppose à la transmission du principe électrique, n'avait aucune influence pour retenir la portion de ce principe qui, devenue libre à sa surface, se manifestait par sa réaction.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que des boules ; mais, quelle que soit la figure du corps électrisé, quelle que soit sa grosseur et la distribution de sa force répulsive, si l'air est très-sec et que le degré d'électricité imprimé au corps ne soit pas très-considérable, le décroissement instantané de la force répulsive est toujours le même, et conserve le même rapport avec son intensité. Coulomb a fait cette épreuve avec un globe d'un pied de diamètre, avec des cylindres de grosseurs et de longueurs très-variées. Il a substitué aux boules de sa balance des cercles de papier ou de métal ; il a même armé une fois l'une d'entre elles d'un petit fil de cuivre de 10 lignes de longueur, et d'un quart de ligne de diamètre : et il a trouvé que, le jour où il faisait ces expériences, la force répulsive de tous ces corps si différens de forme, décroissait également de $\frac{1}{100}$ par minute. Mais il faut remarquer que cette égalité de décroissement pour les corps de différentes figures n'a lieu que lorsque l'intensité de leur électricité est déjà réduite à un degré assez faible, et d'autant plus faible que l'air est plus humide. Car tous les corps de forme anguleuse, lorsqu'on

leur communique une électricité très-forte, perdent d'abord cet excès suivant des lois de décroissement beaucoup plus rapides, que nous déterminerons plus tard en traitant de l'électricité des pointes, jusqu'à ce qu'enfin leur force électrique soit affaiblie dans les limites où la déperdition devient constante. On peut même, sans le secours de la balance, rendre ce phénomène sensible aux yeux, en faisant communiquer le premier conducteur de la machine électrique à une barre métallique anguleuse ou garnie de pointes; car si l'on tourne le plateau de la machine, et que l'expérience soit faite dans l'obscurité, l'électricité communiquée à cette barre produit, en s'échappant par les pointes, des aigrettes lumineuses qui forment un très-beau spectacle. Je ne veux pas dire que ce feu soit l'électricité même, car c'est là une question que nous devons examiner par la suite; mais, comme il accompagne toujours sa déperdition rapide, il est au moins un signe et une annonce de cette déperdition. Il était intéressant d'examiner si, dans le même état de l'air, la déperdition lente des deux électricités était également rapide. J'en ai fait l'épreuve et j'ai trouvé cette égalité parfaite.

La loi de la déperdition graduelle de l'électricité, par le seul contact de l'air, étant ainsi connue, Coulomb a procédé, par la même méthode, à la détermination de la perte opérée par les supports qui produisent un isolement imparfait.

La première idée qui se présente, c'est de choisir ces supports de manière que la perte qu'ils produisent soit très-considérable comparativement à celle qui s'opère par le seul contact de l'air. Mais cette déperdition très-rapide aurait un inconvénient grave. En effet, chaque fois que l'on touche à l'appareil, soit pour donner aux boules leur électricité initiale, soit pour changer la torsion par le moyen du micromètre, l'aiguille ne revient à une position stable qu'après quelques oscillations. Il faut donc que l'isolement soit encore assez parfait pour que l'intensité de l'électricité n'éprouve pas de très-grandes variations dans cet intervalle, et pour que l'on puisse faire consécutivement plusieurs observations de ce genre, sans donner aux boules une nouvelle charge d'électricité. D'après ces remarques,

Coulomb a suspendu la boule fixe de la balance, non plus par un petit cylindre de gomme-laque isolant parfaitement, mais par un simple fil de soie d'un seul brin, tel qu'il sort du cocon. Ce fil avait quinze pouces de longueur. La boule mobile de l'aiguille était toujours parfaitement isolée et égale en volume à l'autre. Après avoir électrisé simultanément ces deux boules, Coulomb a mesuré, comme dans les expériences précédentes, leur force répulsive, à diverses époques, et il a calculé le décroissement qui en résultait dans les quantités d'électricité dont elles étaient chargées. Il a trouvé ainsi que ce décroissement, d'abord beaucoup plus rapide que par l'air seul, lorsque l'intensité de la force répulsive est considérable, se ralentit graduellement à mesure que cette intensité diminue; en sorte qu'il arrive un terme où la boule soutenue par le fil de soie perd précisément autant que lorsqu'elle était isolée d'une manière parfaite; et, une fois ce terme atteint, la même constance se soutient pour tous les degrés d'intensité plus faibles. Ceci nous apprend donc qu'à cette limite, le fil commence à isoler parfaitement.

Dans ces expériences, la boule mobile ne perd son électricité que par le seul contact de l'air. On peut donc calculer, pour un instant quelconque, l'état de sa réaction électrique, d'après la loi de décroissement dans l'air que nous avons plus haut établie; et, comme l'observation de la force repulsive totale, à cet instant, fait connaître le produit des deux réactions électriques des deux boules, on peut en déduire pour le même instant, la réaction électrique de la boule fixe. Ce calcul fait donc connaître l'influence de l'isolement imparfait. En l'appliquant aux observations que nous avons citées, Coulomb a pu déterminer le degré de réaction électrique auquel chacun des supports dont il avait fait usage commençait à isoler parfaitement; et il a trouvé que l'intensité de cette réaction était proportionnelle à la racine carrée de leur longueur; c'est-à-dire que, dans le même état de l'air, un support d'une longueur quadruple isole parfaitement une quantité double d'électricité. Toutefois, cette proportionnalité n'a lieu qu'entre les supports cylindriques très-fins dont la longueur seule est inégale, mais

dont la nature et la grosseur sont les mêmes. Quand l'une ou l'autre de ces circonstances est changée, il faut déduire le rapport de la formule même. En calculant ainsi, par exemple, d'après l'observation, l'intensité de la réaction électrique à laquelle l'isolement commence, pour des fils de gomme-laque et de soie d'égale longueur et de même diamètre, Coulomb a trouvé que sa valeur est dix fois plus forte pour la première substance que pour la seconde. Par des calculs analogues, on peut évaluer comparativement la perméabilité de toutes les substances qui transmettent imparfaitement l'électricité.

Pour que l'on puisse comparer ainsi une matière avec une autre, il n'est pas du tout nécessaire que les boules de la balance aient été observées à une même distance dans les deux séries d'expériences; il suffit que cette distance ait été maintenue constante dans chaque série, et qu'on en substitue à chaque fois la valeur dans la formule. Il est également indifférent que l'on ait donné tel ou tel degré d'électricité aux boules. Mais il faut toujours qu'elles soient d'égal volume, et électrisées simultanément; il faut aussi qu'elles soient les mêmes dans toutes les expériences, aussi bien que le fil de torsion dont on fait usage. Sans cela, le rapport des torsions aux forces répulsives ne serait pas le même dans les diverses séries; ce qui rendrait leur comparaison plus difficile et moins immédiate. Ce sont là les seules précautions auxquelles il soit nécessaire de s'astreindre.

CHAPITRE IV.

Disposition de l'Électricité en équilibre dans les corps conducteurs isolés.

MAINTENANT que nous savons, au moyen du calcul, ramener la réaction électrique des corps à un état constant, malgré la déperdition continuelle qui s'opère par l'air et par les supports, nous pouvons nous proposer d'examiner la manière dont l'électricité se distribue entre les diverses parties d'un même corps, tant de son intérieur qu'à sa surface.

Or, d'après ce que l'expérience nous a déjà fait connaître

sur cet objet, il est extrêmement vraisemblable que l'électricité se porte toute entière à la surface des corps conducteurs, sans que leurs particules intérieures la retiennent en aucune manière. Car, autrement, on ne concevrait pas comment la seule conformité de la surface de deux corps qui se touchent, établirait entre eux un partage égal d'électricité, quelle que soit d'ailleurs la substance qui les compose; ni comment cette égalité peut avoir encore lieu, quand l'un des corps est solide et plein de matière, tandis que l'autre est creux, et n'offre presque qu'une simple surface; au lieu que toutes ces choses deviennent naturelles et simples, si l'électricité en équilibre se répand seulement sur la surface des corps, sans pénétrer dans leur intérieur.

Cette propriété, à laquelle l'analogie nous mène, est d'une si grande importance, qu'il faut chercher à la vérifier directement.

On peut d'abord la rendre sensible par l'expérience suivante : prenez un corps conducteur de forme sphéroïdale, tel que S, *fig. 9*; formez deux calottes très-minces EE de substance pareillement conductrice, de fer blanc, par exemple, ou de carton couvert de papier doré; et donnez-leur des courbures telles qu'en se joignant elles enveloppent complètement le corps S; ajustez par dehors à ces calottes des tubes de gomme-laque EM par lesquels on puisse les manier sans leur enlever l'électricité. Cela fait, posez le corps S sur un support isolant, ou suspendez-le avec un fil de soie très-fin passé à la gomme-laque, et communiquez-lui un degré quelconque d'électricité, fort ou faible; puis, après avoir touché les deux calottes pour vous assurer qu'elles ne sont point électrisées, enveloppez-en le sphéroïde S, en les tenant par les extrémités de leurs manches isolans; retirez-les aussitôt de la même manière, et présentez-les à un pendule électrique: vous trouverez qu'elles ont pris l'électricité du sphéroïde, et qu'elles l'ont prise tout entière. La réaction électrique de celui-ci, essayée ensuite à l'électroscope le plus sensible, est absolument nulle. Pour que l'expérience ne manque pas, il faut que es rebords des deux calottes enveloppantes soient retournés

en dehors, et rabattus sur leur surface extérieure, afin que leur tranchant ne vienne jamais toucher la surface du sphéroïde intérieur : car, si cela arrivait, l'accumulation de l'électricité sur ce tranchant déterminerait une décharge quand on retirerait les enveloppes, et le sphéroïde se trouverait ainsi rechargé. Il n'est pas non plus nécessaire que les enveloppes, lorsqu'elles sont approchées l'une de l'autre, touchent la surface du sphéroïde; il suffit qu'il n'y ait entre elles et cette surface qu'une distance assez petite pour que l'électricité du sphéroïde puisse passer aux enveloppes, par un écoulement insensible ou par étincelle. De quelque manière que la transmission se soit opérée, l'électricité une fois passée aux enveloppes, ne retourne plus au sphéroïde, même quand on remet les calottes en contact sur la surface déchargée.

On peut encore vérifier cette propriété d'une autre manière qui semble plus générale, parce que le corps soumis à l'épreuve peut avoir une forme quelconque, et que l'expérience se fait sans lui ôter rien de son électricité. On pratique seulement sur la surface de ce corps un ou plusieurs petits trous cylindriques de quatre ou cinq lignes de diamètre, et d'une profondeur arbitraire; on tire ensuite un fil de gomme-laque de quelques pouces de longueur, à l'extrémité duquel on adapte un petit cercle de papier doré pareil à celui de l'aiguille de l'électroscope, et dont le diamètre soit le tiers ou le quart de la largeur des trous. Cela fait, on isole le corps S; on l'électrise fortement par quelques étincelles tirées du premier conducteur de la machine ou de toute autre manière; puis, tenant le cylindre de gomme-laque par son extrémité libre, on introduit adroitement le cercle de papier doré qu'il porte dans les cavités du corps S, en prenant bien garde de ne pas toucher les bords de leur ouverture. Ce cercle, retiré des cavités, n'en rapporte pas un atome d'électricité; présenté à l'aiguille de l'électroscope déjà chargée d'une électricité pareille à celle du corps, il n'opère sur elle aucune répulsion. Mais, après avoir inutilement réitéré cette épreuve, si on lui fait toucher un instant la surface extérieure

du corps S, ou seulement le bord d'une des cavités qu'on y a pratiquées, il chasse vivement l'aiguille de l'électroscope. Toute l'électricité du corps S reside donc à cette surface; il n'y en a point dans son intérieur; et, non-seulement il n'y en a pas, mais il serait impossible d'y en fixer. Car, si l'on charge directement le petit cercle de papier doré en prenant de l'électricité à un autre corps, ou à la surface extérieure du corps S, et qu'ensuite on le réintroduise dans la cavité de ce corps, toute l'électricité qu'on lui avait ainsi donnée l'abandonne, et passe dans le corps enveloppant S, où elle gagne aussitôt la surface extérieure; de sorte que le petit plan, retiré de la cavité où on l'avait introduit, se trouve déchargé.

Ce résultat est général pour tous les corps conducteurs, quelle que soit leur forme; mais, en répétant l'expérience, on trouvera quelquefois que le petit cercle de papier doré, retiré des cavités, présente de faibles signes d'une électricité *de nature contraire* à celle du corps S, et qui ne disparaît même pas lorsqu'on a touché le petit cercle pour le décharger. Cette permanence prouve que l'électricité dont il s'agit ne lui est pas propre, mais lui est communiquée par la gomme-laque même, qui la lui rend à mesure qu'on la lui ôte; en sorte qu'il n'en résulte aucune indication sur l'existence de l'électricité dans l'intérieur du corps S. Maintenant, comment le cylindre de gomme-laque, qui porte le petit cercle, peut-il, sans toucher les bords des ouvertures, et par la seule proximité, prendre ainsi une électricité *contraire* à celle du corps S? C'est un phénomène qui s'expliquera bientôt, quand nous traiterons du développement de l'électricité à distance. Ici, je me bornerai à dire que cet effet, purement accidentel, est presque toujours insensible quand la gomme-laque est pure, l'air sec, et qu'on ne laisse pas le petit cylindre séjourner long-temps dans les cavités.

Nous pouvons donc, d'après ce qui précède, être assurés que le principe électrique, quel qu'il soit, ne réside point dans l'intérieur des corps conducteurs, mais se porte entièrement à leur surface. Nous avons trouvé d'ailleurs, par

d'autres expériences, que l'air le retient à cette surface, et est le seul obstacle qui l'empêche de sortir de ces corps. Ainsi, en rapprochant ces deux indications, nous voyons que le principe électrique, quelle que soit sa nature, se dispose toujours dans les corps conducteurs en une couche très-mince dont la surface extérieure, contiguë à l'air, et limitée par la pression de ce fluide, est la même que celle du corps électrisé, tandis que la surface intérieure, nécessairement peu différente de l'autre, puisque la couche est très-mince, doit être déterminée d'après d'autres lois qu'il nous faudra tirer de l'observation.

Par exemple, lorsque le corps électrisé est une sphère, la seule raison de symétrie exige que la surface intérieure de la couche électrique soit pareillement sphérique et concentrique à la surface extérieure; car ces deux surfaces doivent être également symétriques dans tous les sens autour du centre, puisque les conditions qui limitent l'expansion de l'électricité sont les mêmes dans tous les sens autour de ce point. Lorsque l'on accumule successivement dans une sphère des quantités d'électricité de plus en plus grandes, on peut concevoir, ou que les nouvelles quantités ajoutées se disposent sphériquement sous les premières, et augmentent l'épaisseur de la couche; ou bien que l'épaisseur restant la même, la densité de l'électricité augmente en chaque point. Il est indifférent, pour les expériences, d'adopter l'une ou l'autre manière de voir; car l'épaisseur de la couche étant toujours très-petite, toutes les molécules électriques accumulées sous chaque petit élément superficiel, doivent agir par attraction ou par répulsion sur les corps extérieurs, comme si elles étaient toutes réunies en un seul point, et par conséquent comme si elles étaient infiniment condensées. Ainsi leur action sera toujours proportionnelle à leur nombre, de quelque manière qu'on l'évalue. Mais, à considérer la chose physiquement, l'idée d'une épaisseur essentiellement limitée paraît peu naturelle; car il n'existe dans l'intérieur des corps conducteurs aucun obstacle qui empêche l'électricité de s'y répandre; si elle ne s'y répand pas, ce ne peut être que par un résultat des lois

de son équilibre ; et , par cela même , il devient très-vraisemblable que , pour chaque quantité d'électricité donnée , l'épaisseur de la couche électrique est aussi une conséquence de ces lois.

La méthode que nous venons d'exposer pour éprouver l'électricité d'un corps conducteur , en le touchant par un petit cercle de papier doré , isolé à l'extrémité d'un fil de gomme-laque , est applicable dans une infinité de circonstances. Elle peut même faire reconnaître , non-seulement l'existence et la nature de cette électricité , mais la quantité absolue qui s'en trouve accumulée sur chaque élément superficiel. Pour cela , au lieu de présenter le petit plan à l'électroscope , comme dans l'expérience qui précède , on le substitue à la boule fixe de la balance , et l'on observe son action sur la boule ou sur le cercle mobile que l'on a préalablement chargé d'une électricité de même nature. On a soin , d'ailleurs , de modifier l'intensité de la torsion et la longueur de l'aiguille de la balance de manière que , à la distance où se trouvent le petit plan et le cercle mobile , on puisse les considérer l'un et l'autre comme de simples points , condition que la petitesse de ces corps rend très-facile. D'après cela , on voit que la réaction électrique du petit plan sera proportionnelle à la quantité d'électricité dont il s'est couvert ; et , si on l'introduit toujours dans la même balance sans rien ôter au cercle , ou à la boule mobile , de la première charge qu'on leur a donnée , les torsions nécessaires pour les ramener à la même distance donneront les rapports de ces différentes charges. Or , comme un très-petit plan appliqué sur un corps se confond avec un élément de sa surface , on doit présumer que ces charges seront aussi proportionnelles à celle du point de la surface où le petit plan a touché : de sorte que l'on pourra ainsi espérer de connaître comment la quantité de l'électricité , ou , ce qui revient au même , comment l'épaisseur de la couche électrique varie sur les divers points d'un corps où l'électricité ne serait pas distribuée uniformément.

Pour vérifier cette idée , prenez un corps conducteur de figure quelconque , placez-le sur un isoïoir ; et , après lui avoir

donné un degré arbitraire d'électricité, touchez-le avec le petit plan d'épreuve en un point a , que vous pourrez exactement reconnaître; portez ce petit plan dans la balance, préalablement chargée d'une électricité de même nature, et observez la torsion nécessaire pour balancer la répulsion à une distance fixe D ; soit cette torsion A .

Retirez alors le petit plan, et faites-lui toucher de nouveau le corps conducteur dans un autre point a' , différent du premier, mais que vous pourrez également reconnaître; portez-le ensuite dans la balance, et mesurez la torsion nécessaire pour ramener l'aiguille à la distance angulaire D , comme dans la première expérience. Soit cette torsion $n A$, en sorte que son rapport avec la première soit exprimé par n .

Si, après un intervalle de quelques minutes, vous répétez les mêmes épreuves, en portant toujours le petit plan sur les mêmes points a , a' , vous ne trouverez plus les mêmes torsions absolues, parce que le corps isolé aura perdu une partie de son électricité par le contact de l'air; mais le rapport de ces torsions demeurera le même. Si la première est devenue A' , la seconde sera $n A'$. Pour que la comparaison soit tout-à-fait exacte, il faudra mettre entre les deux contacts successifs de a et de a' le même intervalle que dans la première expérience, afin que la perte par l'air soit proportionnellement la même.

Le résultat de cette épreuve se reproduira ainsi autant de fois qu'on voudra la répéter; et la proportionnalité des torsions se maintiendra tant qu'il restera une quantité d'électricité appréciable sur la surface du corps isolé. Si, de plus, on a noté les époques auxquelles les observations successives ont été faites, on verra que le décroissement absolu des torsions est exactement tel qu'il doit résulter du seul contact de l'air; ou, en d'autres termes, la répulsion mutuelle du petit plan et du cercle mobile, à une époque quelconque, est exactement la même que si l'on avait laissé constamment le petit plan dans la balance avec la charge primitive d'électricité qu'il avait prise sur le point a ou a' , dans le premier contact. Par conséquent, la quantité absolue d'électricité qu'il prend

à chaque contact, est proportionnelle à la somme actuelle et totale de l'électricité du corps.

Cette proportionnalité peut tout de suite être mise en évidence par l'expérience suivante.

Donnez au corps isolé la forme d'un cylindre ou d'un parallépipède rectangle, dont la longueur surpasse beaucoup la grosseur; électrisez-le, et faites toucher le petit plan, d'abord au milieu de sa longueur, puis à l'une de ses extrémités; il aura dans ces deux cas des réactions bien différentes. Maintenant, faites toucher le corps électrisé par un autre corps, de forme et de dimensions exactement pareilles, qui sera aussi isolé, et que vous présenterez au premier symétriquement, c'est-à-dire de manière que les côtés pareils se touchent dans toute leur étendue. L'électricité se partagera certainement d'une manière égale entre ces deux corps. Aussi, quand vous les aurez séparés, si vous recommencez l'épreuve du petit plan, en touchant toujours aux mêmes points que la première fois, vous trouverez que ses réactions électriques sont réduites, pour tous les points, exactement à la moitié de ce qu'elles étaient d'abord.

Ainsi, en résumant ces expériences, les quantités absolues d'électricités, successivement prises par le *plan d'épreuve* en un même point de la surface d'un corps conducteur, sont constamment proportionnelles à la somme totale d'électricité répandue sur la surface de ce corps à l'instant du contact; et, quelle que soit cette somme, les quantités prises, au même instant, sur différens élémens superficiels, conservent toujours entre elles des rapports invariables. De là on doit tirer deux conséquences: la première, c'est que, dans chaque corps conducteur, l'accumulation d'une quantité double, triple d'électricité, donne à chaque élément superficiel une quantité d'électricité double, triple, ou en général proportionnelle; la seconde, c'est que le petit plan d'épreuve, considéré comme infiniment petit par rapport à la surface totale du corps conducteur, prend toujours, en chaque point de cette surface, une quantité d'électricité proportionnelle à celle de l'élément qu'il a touché.

En opérant ainsi , chaque contact du plan diminue un peu la quantité absolue d'électricité du corps qu'il touche ; et par conséquent , à parler à la rigueur , il faudrait tenir compte de cette diminution pour rendre les observations successives exactement comparables ; mais on rend ce soin inutile en faisant le plan si petit , que la quantité d'électricité qu'il enlève soit infiniment petite et comme nulle comparativement à celle de la surface totale du corps. Si , malgré cette précaution , on voulait encore affaiblir l'erreur , il n'y aurait qu'à reporter le petit plan sur la surface du corps sans le décharger. Il faut aussi avoir soin d'employer , pour soutenir les petits plans , des fils de gomme-laque bien pure , dont la force isolante soit la plus parfaite possible.

Comme ces observations demandent toujours à être plusieurs fois répétées , il faut , en les comparant les unes aux autres , avoir égard par le calcul à la perte d'électricité résultante du contact de l'air. C'est ce que l'on peut faire , d'après les lois de cette déperdition que nous avons données plus haut ; mais on peut encore suppléer à cette correction en combinant les expériences de manière qu'elles se rectifient d'elles-mêmes. Pour cela , s'il s'agit de comparer les réactions électriques de deux points a et b , on fera d'abord toucher a par le petit plan ; puis on observera la réaction proportionnelle qui en résulte dans celui-ci. Ensuite on le fera toucher de même au point b , et l'on observera pareillement la réaction correspondante. Alors si , entre la première observation et la seconde , il s'est écoulé un certain temps , par exemple , trois minutes , on répétera de nouveau le contact de a , trois minutes après la seconde observation , et l'on prendra une moyenne arithmétique entre ce résultat et le premier que l'on aura obtenu. On aura ainsi la même chose que si les deux contacts de a et de b eussent été faits exactement à la même époque. Ce mode de correction , qui s'opère par des observations correspondantes , est toujours le meilleur qu'on puisse employer. Il corrige même l'effet de la déperdition par les supports , pourvu qu'elle soit peu considérable , ainsi que cela arrive toujours quand ils sont bien choisis et bien préparés.

Pour donner une application de la méthode des contacts alternatifs, je choisirai l'expérience suivante, que je trouve dans les manuscrits de Coulomb.

Il s'était proposé de chercher comment l'électricité se dispose sur une lame mince et isolée. Pour le découvrir, il isola une lame d'acier de 11 pouces de long, 1 pouce de large et $\frac{1}{2}$ ligne d'épaisseur. Pour pouvoir la toucher dans toute sa largeur, il donna au plan d'épreuve un pouce de long sur trois lignes de large. Il appliqua d'abord ce plan au centre de la lame en C, *fig. 10*; puis à 1 pouce de distance de l'extrémité; et il obtint les résultats suivans :

	TORSIONS observées.	TORSIONS moyennes au milieu.	TORSIONS moy. à 1 po. de l'extrém.	RAPPORT des torsions moyennes.
Touché au milieu.	370°			
à 1 po de l'extrémité.	440	360	440	1,22
au milieu.	350	350	417,5	1,20
à 1 po de l'extrémité.	395	335	395	1,18
au milieu.	320	Moyenne. 1,20		

C'est-à-dire que, sur des espaces égaux, pris dans toute la largeur de la lame, au centre et à un pouce de ses extrémités, les quantités d'électricité sont entre elles comme 1 à 1,2, par conséquent presque égales.

Coulomb recommença l'expérience en posant le petit plan tout-à-fait à l'extrémité, mais toujours tout entier sur la surface, et il trouva les résultats suivans :

	TORSIONS observées.	TORSIONS moyennes au milieu.	TORSIONS moyennes à l'extrémité	RAPPORT des torsions moyennes.
Touché à l'extrém.	400			
au milieu.	195	195	395	2,02
à l'extrémité. . . .	390	190	390	2,05
au milieu.	185	185	370	2,00
à l'extrémité. . . .	350	Moyenne. 2,02		

Ici le rapport des quantités d'électricité est beaucoup plus

fort que tout-à-l'heure. Ainsi, après avoir été presque constante depuis le centre jusqu'à 1 pouce des extrémités de la lame, l'électricité augmente rapidement près de ces extrémités.

Coulomb a fait encore une dernière épreuve, en mettant le petit plan, non plus sur la surface même de la lame, mais dans le prolongement de cette surface en D, de manière à toucher l'épaisseur de la lame par son tranchant; et alors il a eu les résultats que voici :

	TORSIONS observées.	TORSIONS moyennes au milieu.	TORSIONS moyen. au-delà du bord	RAPPORT des torsions.
Touché au milieu.	305°			
au-delà du bord. .	1175	295	1175	3,98
au milieu.	285	285	1156	4,05
au-delà du bord. .	1137	Moyenne. 4,01		

Ainsi, le plan d'épreuve placé dans le prolongement de la lame, y prend une quantité d'électricité justement double de celle qu'il prenait même à cette extrémité, quand il ne touchait qu'une seule surface.

L'expérience répétée avec une lame de 22 pouces de longueur, c'est-à-dire double de la précédente, et de mêmes dimensions dans tout le reste, a donné exactement les mêmes rapports entre le milieu et les extrémités.

De là Coulomb conclut, 1°. que, dans le contact sur les surfaces de la lame, le plan d'épreuve ne participe qu'à l'électricité d'une de ses deux faces, qui est celle sur laquelle il est appliqué; 2°. qu'au-delà d'une certaine longueur de la lame, suffisante pour que l'électricité soit presque uniforme dans une grande partie de sa surface, un nouvel accroissement de longueur n'a plus d'influence sensible sur le rapport des quantités d'électricités accumulées aux extrémités et au milieu, la première étant toujours double de la seconde.

Pour sentir les conséquences de cette remarque, soit, *fig. 11*, AB une lame dont la longueur surpasse la limite que nous

venons d'indiquer. Supposons que nous ayons observé l'état électrique des divers points de sa surface, et élevons en chacun de ces points des ordonnées CE , PM , QN , AA' , BB' proportionnelles aux quantités d'électricité qui s'y trouvent accumulées. Ces ordonnées seront sensiblement égales entre elles, depuis le centre C jusqu'à un pouce des extrémités de la lame, après quoi elles commenceront à croître, en formant les courbes symétriques $A'M$ ou $B'N$. Or, puisque le rapport de AA' à PM ou à CE est le même dans toutes les lames dont la longueur est très-grande comparativement à leur largeur, et que la même constance se soutient pour les ordonnées intermédiaires, il s'ensuit que la courbe $A'M$, $B'N$ conserve la même forme dans toutes ces lames, et ne fait que se superposer à leurs deux extrémités sur la couche uniforme, dont l'épaisseur est CE ; de sorte que l'on peut ainsi prévoir complètement l'état électrique de toutes ces lames, quand on a observé l'intensité de l'électricité à leur centre.

Cette augmentation rapide de l'électricité vers les extrémités des lames ne leur est pas particulière; il paraît qu'elle a lieu en général dans tous les corps prismatiques ou cylindriques très-allongés; et elle est d'autant plus rapide qu'ils sont plus minces. C'est ce que prouvent plusieurs autres expériences de Coulomb, que j'ai rapportées et calculées dans le *Traité général*.

La tendance de l'électricité pour se porter à la surface des corps conducteurs, et la manière dont elle se répand sur cette surface, peuvent se rendre sensibles par une expérience assez curieuse. AB , *fig. 12*, est un cylindre isolé, mobile autour d'un axe horizontal, et que l'on peut faire tourner au moyen de la manivelle M , composée de plusieurs tiges de verre verni. Sur le cylindre est enroulé un ruban métallique R , dont l'extrémité est terminée en demi-cercle et attachée à un cordon de soie F . On fait communiquer cet appareil à un électroscope composé de deux fils de lin ff , garnis de petites boules de moelle de sureau, et on l'électrise. Aussitôt les fils ff divergent. Alors on déroule peu-à-peu le ruban métallique en le tirant par le fil isolant F , et le soutenant suspendu en l'air. A

mesure qu'il s'étend, on voit les fils de lin se rapprocher et ainsi indiquer l'affaiblissement progressif de leur réaction. Si le ruban est suffisamment long, comparativement à la charge électrique donnée à l'appareil, leur écart peut diminuer jusqu'à devenir presque insensible; mais il se reproduit de nouveau si, en faisant tourner la manivelle M, on enrôle de nouveau le ruban métallique sur son cylindre; et alors la réaction des fils redevient la même qu'au commencement de l'expérience, sauf la perte occasionée par le contact de l'air.

CHAPITRE V.

Des Électricités combinées, et de leur séparation par les actions à distance.

Jusqu'ici nous avons considéré des corps électrisés par le frottement ou la communication. Nous allons maintenant voir des phénomènes où l'état électrique est développé sans contact, par la seule influence à distance d'un corps électrisé.

On prend un conducteur cylindrique B, *fig.* 13, isolé, horizontal, dont les deux extrémités sont arrondies en demi-sphères. On y attache de distance en distance des fils de lin, auxquels pendent de petites boules faites en moelle de sureau. Après avoir touché ce conducteur, pour s'assurer qu'il n'est point chargé d'électricité, on l'approche d'un corps électrisé A, en le tenant par ses supports isolateurs, et le plaçant toutefois assez loin de A, pour qu'il n'en puisse pas recevoir directement l'électricité par explosion. On observe alors les phénomènes suivans :

1°. Les fils placés aux extrémités du cylindre B divergent et manifestent ainsi qu'il est électrisé.

2°. On observe que cette divergence va en diminuant vers le milieu du cylindre, où il se trouve un point dans lequel il ne se fait aucune répulsion.

3°. Ce point, qui ne semble pas électrisé, varie de position sur le cylindre, à mesure qu'on éloigne ou qu'on approche celui-ci du corps électrisé.

4°. Si l'on promène le long du cylindre une boule de sureau

non électrisée et suspendue à un fil de soie qui l'isole, elle est attirée par-tout, excepté dans la partie intermédiaire, dont nous venons de parler.

5°. Mais si cette boule est électrisée, elle est attirée par une des extrémités du cylindre et repoussée par l'autre, ce qui annonce qu'elles sont chargées d'électricités différentes.

6°. En effet, si l'on touche successivement ces deux extrémités avec un petit corps conducteur isolé, et qu'on éprouve l'électricité dont il se charge, on trouve que, dans l'extrémité qui avoisine le corps électrisé, elle est d'une nature opposée à la sienne; et au contraire, elle est de même nature dans sa partie la plus éloignée.

7°. Les signes d'électricité cessent, si l'on retire le cylindre par ses supports isolans, et qu'on l'éloigne à une grande distance du corps électrisé A; ou si l'on enlève par un contact l'électricité de ce corps.

8°. A l'exception de ce dernier cas, le corps primitivement électrisé ne perd rien par l'influence qu'il exerce. Aucune partie de son électricité ne se transmet au cylindre; car si l'on mesure sa réaction électrique par le plan d'épreuve avant qu'on lui présente le cylindre, et après qu'on l'a retiré, on trouve qu'elle n'a éprouvé aucune diminution, si ce n'est celle qui doit naturellement se produire par le seul contact de l'air.

9°. Cette constance ne subsiste que hors de la présence du cylindre isolé. Car, pendant qu'il est dans le voisinage du corps électrisé, si celui-ci est conducteur, la réaction sur sa surface est différente, comme on peut s'en assurer par le plan d'épreuve.

10°. Si, sans toucher au corps électrisé, on enlève, et l'on remet le cylindre en sa présence à plusieurs reprises, les mêmes phénomènes cessent, et se reproduisent à chaque fois sans aucun changement.

Le seul énoncé de ces résultats en montre les conséquences :
 1°. puisque le cylindre ne prend rien au corps électrisé, il faut qu'il possède en lui-même les principes des deux électricités qui se développent en lui par l'influence de ce corps;
 2°. puisque ces deux électricités disparaissent quand l'influence

du corps étranger cesse, quoiqu'elles ne puissent s'échapper dans le sol, à cause de l'isolement du cylindre, il faut que leurs proportions soient telles, qu'étant abandonnées à elles-mêmes, elles puissent se neutraliser mutuellement; 3°. enfin, il faut que cette neutralisation s'opère sans les détruire, puis- qu'elles reparassent de nouveau tout entières chaque fois que l'on soumet le cylindre à l'influence du corps étranger.

Nous sommes ainsi conduits à reconnaître que les principes des deux électricités existent naturellement dans tous les corps conducteurs, dans un état de combinaison qui les neutralise. C'est ce que nous nommerons désormais *l'état naturel des corps*. Nous voyons que le frottement, qui nous semblait un moyen de les faire naître, sert seulement à les dégager de cette combinaison, et à rendre chacune d'elles sensible en la séparant de l'autre. Voilà pourquoi, sans doute, nous observions constamment que le corps frottant et le corps frotté manifestaient des électricités contraires. Enfin, puisque la seule influence d'un corps électrisé présenté à distance, force ces deux électricités à se séparer et à se distribuer de manière que celles de nature différente soient les plus voisines entre elles, et celles de même nature les plus éloignées, il faut, pour énoncer ce fait, admettre que les principes électriques *de nom différent s'attirent, et de même nom se repoussent*, selon des lois que l'expérience nous apprendra peut-être à déterminer.

Alors tous les phénomènes que nous avons décrits plus haut deviennent des conséquences simples, nécessaires, évidentes de cette propriété générale. Un seul d'entre eux, peut-être, semble demander quelque attention pour y être rapporté. C'est cette variation passagère qu'éprouve la réaction électrique du corps A, pendant qu'on lui présente le cylindre. Mais, puisque l'électricité libre sur la surface d'un corps agit à distance sur celles des autres corps, et détruit, au moins en partie, leur combinaison, il est évident que celles-ci, une fois devenues libres, doivent à leur tour agir sur le corps qui les a mises en liberté, et changer la réaction électrique des points de sa surface; soit en contraignant l'é-

lectricité libre qui s'y trouve de se distribuer autrement, soit en ajoutant à cette électricité celle que le corps peut fournir par la décomposition de ses électricités naturelles, soit enfin en agissant de ces deux façons à-la-fois.

Ces observations nous conduisent à une autre conséquence importante : dans nos premières recherches, nous avons remarqué que les corps électrisés attirent ou semblent attirer tous les corps légers qu'on leur présente, sans qu'il soit besoin pour cela de développer en ceux-ci la faculté électrique par le frottement ou la communication. Mais maintenant nous devons concevoir que ce développement s'y opère de lui-même, par la seule influence à distance du corps électrisé sur les électricités combinées des petits corps qu'on lui présente : de sorte que, dans ce cas même, l'attraction, soit réelle soit apparente, que l'on observe, n'a réellement lieu qu'entre des corps électrisés.

Il y a plus : le développement des électricités combinées, dans cette circonstance, est indispensable pour que l'attraction s'opère ; car elle est d'autant moins vive qu'il est moins facile ; et, s'il est impossible, elle cesse entièrement. Pour vous en convaincre, prenez deux fils de soie écrue très-fins et d'égale longueur. Suspendez-y deux petites boules de dimensions égales, mais dont l'une soit de gomme-laque pure, et l'autre aussi de gomme-laque, mais dorée sur sa surface, ou revêtue d'une mince feuille d'étain. Alors ces deux pendules étant placées l'un à côté de l'autre à une petite distance, approchez-en un tube de verre ou de cire d'Espagne frotté et électrisé : vous verrez que la boule couverte de métal, et sur la surface de laquelle la décomposition des électricités combinées peut facilement se faire, sera bien plus aisément et plus vivement attirée que l'autre. Celle-ci ne commence à l'être qu'après un certain temps, lorsque la décomposition s'est enfin opérée sur sa surface ; et alors son état électrique subsiste même après qu'on en a éloigné le corps électrisé. La première boule, quoique dorée, contracte aussi de cette manière une électricité permanente, parce que la résine qui la compose s'imprègne de celle qui est développée

à sa surface; et l'une et l'autre sont favorisées en cela par le contact de l'air, qui, sous l'influence du corps électrisé, tend sur-tout à leur enlever celle de leurs électricités combinées, qui est repoussée par ce corps, tandis qu'il a moins de prise sur celle dont la force répulsive propre est dissimulée par l'attraction. Aussi remarque-t-on en général que les corps isolés qui ont été quelque temps soumis à l'influence d'un corps électrisé, finissent par avoir un excès d'électricité de nature contraire à la sienne, et dont les effets se manifestent quand on les soustrait à l'influence de ce corps.

Comme les résultats auxquels nous venons de parvenir nous seront par la suite d'un usage continuel, il faut les réduire en une sorte de théorème que nous énoncerons de la manière suivante.

Lorsqu'un corps conducteur et isolé B, qui est dans l'état naturel, est mis en présence d'un autre corps A électrisé et isolé, l'électricité distribuée sur la surface de A agit par influence sur les deux électricités combinées de B, en décompose une quantité proportionnelle à l'intensité de son action, et la résout dans ses deux principes constituans. De ces deux électricités devenues libres, elle repousse celle de même nom qu'elle, et attire celle de nom différent. La première se porte sur la partie de la surface de B, qui est la plus éloignée de A; la seconde sur celle qui en est la plus voisine. Ces deux électricités, devenues libres, agissent à leur tour sur l'électricité libre de A, et même sur ses deux électricités combinées, dont une partie se décompose par cette réaction et se sépare, si le corps A est aussi conducteur. Cette nouvelle séparation entraîne une nouvelle décomposition de l'électricité combinée de B, et ainsi de suite jusqu'à ce que les quantités de chaque principe, devenues libres sur les deux corps, soient en équilibre par le balancement de toutes les forces attractives et répulsives qu'elles exercent les unes sur les autres, en vertu de leur nature différente ou semblable.

Nous examinerons plus tard par quelles conditions cet équilibre est déterminé. En ce moment, supposons-le établi; et pour continuer à observer le développement des phénomènes

qui en résultent, reprenons la même disposition d'appareil qui nous a servi d'abord, et qui est représentée *fig.* 14. De plus, afin d'abrégé l'énoncé des faits, supposons que l'électricité, primitivement donnée à A, est vitrée. Alors, si le conducteur B est cylindrique, ce que nous supposons pour que la séparation des électricités combinées y soit plus manifeste, sa partie R, la plus voisine de A, est à l'état résineux; sa partie la plus éloignée V est à l'état vitré.

Les choses étant ainsi, on touche cette partie V avec un troisième conducteur C, pareillement isolé, et dans l'état naturel; on retire C et on le trouve chargé d'électricité vitrée. En même temps, les fils de lin placés en V sur le conducteur A se rapprochent, et la divergence de ceux qui sont placés en R augmente. Mais si, après ce contact, l'on retire B de la présence de A, ou qu'on touche A pour lui ôter son électricité, on trouve B uniquement chargé d'électricité résineuse.

Ceci est une conséquence fort simple de l'action à distance. Avant le contact, l'électricité vitrée de B, refoulée en V, repoussait l'électricité vitrée de A, et attirait l'électricité résineuse développée en R; elle affaiblissait donc ainsi l'action de A sur R. Par le contact du troisième conducteur, on enlève une portion de cette électricité V; alors l'action de A sur R devient plus forte, parce qu'elle est moins contre-balançée. En vertu de son accroissement d'énergie, il se fait dans le conducteur B une nouvelle décomposition d'électricités combinées, dont la partie vitrée se porte de nouveau en V, et la résineuse en R. Alors la quantité totale accumulée en R se trouve nécessairement plus considérable que l'autre, puisque cette dernière seule a été affaiblie par le contact de C. Aussi, lorsque vous soustrayez B à l'influence de A, cette électricité vitrée V redevenue libre, ne suffit plus pour neutraliser complètement R, et l'on trouve le conducteur B chargé d'un excès d'électricité résineuse. Cette même inégalité fait que, sous l'influence de A, la divergence des fils doit être plus faible en V qu'en R, conformément à l'observation.

Voulez-vous porter cette différence à l'extrême? Au lieu

de toucher le conducteur B avec un corps isolé, qui ne prend jamais qu'une portion de l'électricité V, touchez-le avec un corps non-isolé, et faites-le ainsi communiquer un instant avec le sol. Alors toute l'électricité refoulée en V s'échappera. Les fils suspendus en ce point se rapprocheront tout-à-fait, et n'en donneront plus le moindre signe ; mais les fils placés en R divergeront encore plus que dans le cas précédent, et vous ne diminuerez point leur divergence, en touchant de nouveau l'extrémité V. Mais si, après avoir cessé de toucher V, vous soustrayez le conducteur B à l'influence de A, cette divergence deviendra beaucoup plus forte.

Ceci est encore très-facile à comprendre : lorsque vous mettez V en communication avec le sol, toute l'électricité vitrée accumulée à cette extrémité se partage avec la masse immense de la terre, et sa réaction devient insensible ; ou, si l'on veut, elle décompose les électricités combinées de la terre, attire l'électricité résineuse avec laquelle elle se neutralise, et repousse la vitrée qui se distribue sur toute la surface du globe terrestre. De quelque manière que l'on conçoive la chose, il n'y a plus du tout d'électricité vitrée libre en V. Alors l'électricité vitrée de A, dégagée de cette résistance, exerce une plus forte attraction sur R. Cela nécessite une nouvelle décomposition des électricités naturelles de B, dont la partie vitrée se dissipe de même dans le sol, tandis que la résineuse s'accumule en R ; et ainsi de suite jusqu'à ce que l'attraction de A pour R soit complètement satisfaite. Mais ces décompositions, que, dans notre raisonnement, nous avons supposées successives pour bien comprendre leur mécanisme, s'opèrent instantanément dans les corps métalliques dont la conductibilité peut être regardée comme parfaite ; et voilà pourquoi un seul contact suffit pour l'établir complètement. D'après ce qui vient d'être dit, on conçoit pourquoi B, soustrait à l'influence de A, manifeste un excès d'électricité résineuse, et pourquoi cet excès est plus fort encore que dans le cas précédent.

Jusqu'ici nous nous sommes bornés à rendre sensible par l'expérience l'action de A sur B ; mais nous pouvons de même rendre sensible la réaction de B sur A, soit en touchant celui-ci

en divers points de sa surface avec le plan d'épreuve, ce qui serait le procédé le plus exact; soit en se bornant à suspendre, à l'extrémité de A la plus éloignée de B, des fils de lin garnis de petites boules de moelle de sureau. On observe d'abord la divergence de ces boules, quand le corps A est isolé et solitaire. Puis, à mesure qu'on approche le conducteur B, et qu'il se fait dans celui-ci une décomposition de son électricité combinée, on voit les fils de lin de A se rapprocher peu-à-peu, parce que l'électricité vitrée, qui réside en cette partie de A, l'abandonne pour se porter vers B. Si elle y passe tout entière, on voit les fils de lin redevenir tout-à-fait verticaux, comme si le corps A était dans l'état naturel; et enfin, s'il se développe à cette extrémité de l'électricité résineuse, par l'effet de l'action toujours croissante de R, on voit les fils diverger de nouveau, mais par une électricité différente.

Cette succession de divergences produites par des électricités contraires, et séparées par un état naturel, s'observera encore avec plus de facilité sur le conducteur B, si, au lieu de le présenter à A dans l'état naturel, on lui communique d'abord une faible électricité résineuse. Car, lorsqu'il est d'abord éloigné de l'influence de A, tous les fils de lin qui y seront suspendus divergeront en vertu de cette électricité. Mais, à mesure que B s'approchera de A, et que l'action de celui-ci attirera cette électricité résineuse dans l'extrémité qui l'avoisine, on verra les fils de lin de l'autre extrémité se rapprocher graduellement, puis se toucher, puis enfin diverger de nouveau en vertu de l'électricité vitrée que l'action de A fait sortir de la combinaison où elle était engagée dans l'état naturel, et qui se trouve repoussée en cette partie du conducteur B.

Pour fixer les idées, nous avons supposé que le corps A était chargé d'électricité vitrée. Mais si on le chargeait d'électricité résineuse, tous les phénomènes seraient encore exactement pareils, avec la seule différence qu'il faudrait par-tout, dans leur énoncé, changer les dénominations des deux électricités.

Après avoir ainsi reconnu généralement les propriétés at-

tractives et répulsives propres aux deux électricités vitrée et résineuse, après avoir reconnu leur état naturel de combinaison dans les corps, leur séparation par l'influence à distance, et les conséquences générales qui résultent de ces nouvelles propriétés, il faut, conformément à la méthode que nous avons adoptée dans le cours de cet ouvrage, chercher à les soumettre au calcul de manière à fixer exactement les détails des faits, et à prévoir, par exemple, pour chacun des corps soumis à leur influence mutuelle, quelle est, sur un point quelconque de sa surface, la quantité et la nature de l'électricité.

Mais, comme nous avons reconnu que les effets de ces influences réciproques, tels que nous venons de les observer, s'exercent sur les principes électriques eux-mêmes, on conçoit que nous ne pourrions les atteindre dans leur cause qu'en déterminant la nature et le mode d'action de ces principes; ou, ce qui revient pour nous au même, en imaginant, d'après les phénomènes observés, quelque mode d'action calculable qui représente exactement les phénomènes, et qui puisse être vérifié, sinon immédiatement dans son existence physique, du moins indirectement, mais sûrement dans ses conséquences.

Or, si l'on considère l'extrême facilité avec laquelle les deux électricités vitrée et résineuse se répandent dans les corps conducteurs, et se portent à leur surface où elles sont retenues par la pression de l'air; si l'on considère la mobilité parfaite avec laquelle ces deux principes se rapprochent ou s'éloignent, se réunissent ou se séparent, sans rien perdre de leurs facultés originelles, on verra que l'idée la plus vraisemblable qu'on puisse avoir de leur nature, c'est de les regarder comme des fluides d'une fluidité parfaite, dont les molécules sont douées de facultés attractives et répulsives, et qui, dans les corps où ils peuvent librement se mouvoir, se disposent de manière à être en équilibre en vertu de toutes les forces intérieures et extérieures qui agissent sur eux.

Il est facile de voir que chacun de ces fluides doit posséder en lui-même une cause de répulsion qui tende à écarter ses

particules les unes des autres. Car, si l'on suppose une certaine quantité d'électricité vitrée ou résineuse, introduite dans une sphère métallique où ses mouvemens sont libres, nous savons qu'elle se portera tout entière à la surface, et y formera une couche d'une épaisseur innappréciable. Si l'on augmente le diamètre de la sphère, la couche électrique s'éloignera toujours de plus en plus de son centre; enfin, si l'on supprime tout-à-fait la pression de l'air, l'électricité se dissipe complètement. Ces effets indiquent certainement une action répulsive exercée entre les particules électriques de même nature; et tous les phénomènes dans lesquels les deux électricités combinées sont séparées l'une de l'autre par l'influence à distance, confirment parfaitement ce résultat, de même qu'ils démontrent aussi l'existence d'une attraction réciproque entre les électricités de nature différente. Mais les expériences mêmes que nous venons de rapporter pour établir la répulsion mutuelle des particules électriques de même espèce nous découvrent encore un autre caractère physique d'une extrême importance: c'est que, si l'on regarde les principes électriques comme des fluides, il faut les supposer incompressibles. Car, s'ils étaient compressibles, comme l'est, par exemple, l'air, lorsqu'ils se répandraient dans un corps conducteur, par le seul effet de leur force répulsive propre, sans doute la plus grande quantité se porterait près de la surface extérieure, où elle se trouverait condensée par la répulsion des quantités intérieures; de sorte que la densité irait graduellement en diminuant depuis cette surface, en allant vers l'intérieur du corps; mais les couches intérieures, si raréfiées qu'on les suppose, ne pourraient jamais cesser d'exister; et ainsi l'on trouverait toujours de l'électricité dans l'intérieur du corps, en quantité plus ou moins considérable, au lieu que, par les épreuves les plus délicates, on n'en peut absolument point découvrir. Il faut donc, pour concilier ce résultat avec la constitution des principes électriques, supposer qu'ils ne sont pas sensiblement compressibles; d'où il suit que, des quantités d'électricité inégales, successivement introduites dans un même corps conducteur, ne font,

en s'y répandant et se portant à sa surface, que donner à la couche électrique fixée près de cette surface, des épaisseurs diverses, qui se trouvent toujours infiniment petites, du moins avec les charges électriques que nous pouvons ainsi former.

Nous voyons encore, par les mêmes phénomènes, que ces attractions et ces répulsions s'affaiblissent à mesure que la distance augmente; mais suivant quelle loi? Parmi toutes celles que l'on peut essayer, il en est une qui représente et reproduit parfaitement tous les phénomènes; c'est le rapport inverse du carré de la distance. En l'adoptant, les constitutions des deux principes électriques sont comprises dans l'énoncé suivant : *Chacun des deux principes électriques est un fluide incompressible dont les particules, parfaitement mobiles, se repoussent mutuellement, et attirent celles de l'autre principe avec des énergies réciproques au carré de la distance. De plus, à distance égale, le pouvoir attractif est égal au pouvoir répulsif*: cette égalité est nécessaire pour que, dans un corps à l'état naturel, les deux électricités combinées n'exercent aucune action à distance.

On peut même en donner la confirmation par l'expérience : ayez deux disques de verre mince AB, A'B', *fig. 15*, dont les surfaces soient bien planes, et qui aient environ un décimètre de diamètre; le verre à miroir est très-bon pour cet objet. Fixez à chacun d'eux un manche CM de verre ou de cire d'Espagne, ou de toute autre substance isolante; puis ayant disposé un petit pendule très-sensible, formé d'une boule de sureau de la grosseur d'une lentille, suspendue à un fil de soie tel qu'il sort du cocon, frottez les disques l'un contre l'autre, en les tenant par les manches isolans; et, sans les séparer, présentez-les ensemble au petit pendule : vous verrez qu'ils n'exercent sur lui aucune attraction; mais séparez-les et présentez-les lui tour-à-tour, ils l'attireront tous les deux. Ils se sont donc mutuellement électrisés par le frottement; et même l'un a pris l'électricité vitrée, l'autre la résineuse, comme vous pourrez le vérifier en les présentant tour-à-tour à un second pendule très-sensible, chargé d'une électricité connue. Mais ces électricités ne se manifestent pas

quand les disques sont en contact, parce que, résidant sur les deux surfaces qui se touchent, la distance de tous leurs points au pendule est absolument la même, et ainsi les actions opposées qu'elles exercent pour séparer les électricités combinées de la petite boule sont égales; de sorte que leur résultante totale est nulle. On peut même modifier l'expérience de manière que cette compensation soit progressive. Pour cela, après avoir séparé les disques, on présente la surface frottée de l'un d'eux au petit pendule, et on laisse approcher celui-ci jusqu'au contact. Dès qu'il a pris sur cette surface la très-petite quantité d'électricité qui convient à son volume, il est repoussé et s'éloigne. Tenez-le dans cet état de répulsion, en lui présentant l'autre face du disque, comme le représente la *fig.* 16; car l'électricité agira encore aussi bien sur lui à travers l'épaisseur du verre AB. Puis, approchez peu-à-peu le second disque du premier, comme pour les remettre de nouveau en contact par leurs faces électrisées. A mesure que la distance de ces faces deviendra moindre, vous verrez la répulsion diminuer et le petit pendule s'abaisser de plus en plus vers la verticale; enfin, quand elles se toucheront, le système des deux disques n'agira pas plus sur le petit pendule que tout autre corps à l'état naturel; mais vous le ferez de nouveau remonter, en les séparant. Ces deux électricités, ainsi neutralisées par leur contact, nous représentent au naturel l'état des électricités combinées, avec la différence que celles-ci, dans les corps conducteurs, ne sont unies l'une à l'autre que par leur force de combinaison, et peuvent être séparées par l'action à distance d'une électricité devenue libre; au lieu que, dans nos disques, chacune d'elles est retenue par la résistance que la nature non-conductrice du verre oppose à la liberté de ses mouvemens. C'est pourquoi l'expérience que nous venons de décrire réussirait également bien avec des disques de gomme-laque ou de cire d'Espagne, ou même avec un disque de ces substances et un disque métallique; mais elle ne pourrait plus se faire avec *deux* disques métalliques, ou formés, en général, de corps conducteurs, parce qu'alors aucune résistance ne s'opposant au mouvement des électricités que le frottement

dégage, elles se réuniraient et se recombineraient aussitôt que le frottement cesserait d'avoir lieu.

Ayant ainsi défini bien nettement les caractères et le mode d'action des deux fluides électriques, il faut exposer les conséquences mathématiques de cette définition pour les comparer aux phénomènes, et voir si elles y sont exactement conformes. Il faut surtout chercher celles qui, étant susceptibles d'une évaluation précise et numérique, comportent plus de rigueur dans leur vérification. Mais ces déductions ne peuvent s'obtenir que par des calculs très-élevés, pour lesquels on emploie toutes les ressources de l'analyse ; et même, avec tous ces secours, on n'est parvenu à les établir d'une manière générale et exacte que depuis peu de temps ; c'est à M. Poisson qu'est due cette belle découverte. Nous puiserons donc dans son travail les résultats précis que le calcul lui a fait connaître ; nous les emprunterons comme des déductions rigoureuses de nos définitions premières, et il ne nous restera plus qu'à vérifier si elles sont d'accord avec les faits.

Commençons par considérer un seul corps conducteur isolé, chargé d'un excès d'électricité vitrée ou résineuse, et soustrait à toute influence étrangère.

Le calcul annonce que le fluide introduit dans ce corps se portera tout entier à sa surface, et y formera une couche extrêmement mince. Ceci est confirmé par les observations les plus minutieusement exactes.

Le calcul détermine encore la surface intérieure de cette couche et son épaisseur. La surface extérieure, bornée par l'air, est la même que celle du corps. L'air est, dans ce cas, pour l'électricité libre, comme un vase imperméable, de forme donnée, qui la contient dans sa capacité intérieure, et résiste par sa pression à la tendance qu'elle a pour s'étendre. La surface intérieure est toujours très-peu différente de la première ; puisque la couche électrique est très-mince. Mais, pour que le corps demeure dans un état électrique permanent, la forme de cette surface doit être telle que la couche entière n'exerce ni attraction ni répulsion sur les points qui sont compris dans sa cavité ; car, si ces actions n'étaient pas nulles, elles s'exer-

seraient sur les électricités combinées du corps, en décomposeraient une partie, et par conséquent l'état électrique du corps changerait, contradictoirement à la supposition que nous avons faite de sa permanence. La condition analytique qui établit cette propriété détermine la forme et l'épaisseur de la couche, laquelle peut, et doit même, en général, être inégale sur les diverses parties de la surface du corps électrisé. Par exemple, si ce corps a la forme d'une sphère, les deux surfaces de la couche électrique seront sphériques, et auront leur centre au centre de la sphère. L'épaisseur de la couche sera donc partout constante et égale à la différence de leurs rayons. En effet, on démontre que, dans la loi du carré des distances, une pareille couche n'exerce aucune action sur les points qui lui sont intérieurs.

Si le sphéroïde proposé est un ellipsoïde, la surface intérieure de la couche électrique sera aussi un ellipsoïde concentrique et semblable; car on démontre qu'une couche elliptique dont les surfaces sont ainsi concentriques et semblables, n'exerce aucune action sur un point situé dans son intérieur. L'épaisseur de la couche en chacun de ses points se trouve généralement déterminée par cette construction; il en résulte que cette épaisseur est la plus grande au sommet du plus grand axe, et la moindre au sommet du plus petit; et les épaisseurs qui répondent à deux sommets différens, sont entre elles comme les longueurs de ces axes.

Dans tous les cas, la surface extérieure de la couche fluide est donnée par la surface même du corps, et tout se réduit à trouver pour la surface intérieure une forme très-peu différente, qui rende nulle l'action totale de la couche sur tous les points compris dans sa cavité.

Ces divers résultats ne sont pas susceptibles d'être immédiatement soumis à l'expérience, mais ils sont liés à d'autres qui se prêtent à cette vérification, et que nous découvrirons bientôt.

La couche électrique, disposée comme nous venons de le dire, agit par attraction et par répulsion sur les autres molécules électriques situées hors de sa surface extérieure, ou à cette surface même. Elle les attire si elles sont de nature dif-

férente de la sienne, et si elles sont de même nature, elle les repousse. Ce dernier cas est celui des molécules électriques qui forment la surface extérieure de la couche; chacune d'elles est repoussée de dedans en dehors avec une force proportionnelle à l'épaisseur de la couche en ce point. Les molécules situées au-dessous de la surface extérieure, dans l'épaisseur de la couche même, éprouvent une répulsion pareille, mais moindre, parce qu'elle est seulement proportionnelle à l'épaisseur qui les sépare de la couche intérieure, et que les molécules qui les enveloppent du côté de la surface extérieure n'exercent sur elles aucune action. Toutes ces forces répulsives graduellement décroissantes, étant combattues dans leur effet par l'air extérieur qui s'oppose au départ des particules électriques, on conçoit qu'il en doit résulter une pression totale exercée contre cet air, et tendante à le soulever. Cette pression est en raison composée de la force répulsive exercée à la surface, et de l'épaisseur de la couche; et comme un de ces élémens est toujours proportionnel à l'autre, on peut dire qu'elle est, en chaque point, proportionnelle au carré de l'épaisseur; elle doit donc être, en général, variable sur la surface des corps électrisés. Si cette pression est par-tout moindre que la résistance que l'air oppose, l'électricité est retenue dans le vase d'air, et ne peut s'échapper. Mais si la pression, en certains points de la surface, vient à l'emporter sur la résistance de l'air, pour lors le vase crève, et le fluide électrique s'échappe comme par une ouverture. C'est ce qui arrive à l'extrémité des pointes et sur les arêtes vives des corps anguleux; car on peut démontrer qu'au sommet d'un cône, par exemple, la pression du fluide électrique deviendrait infinie, si l'électricité pouvait s'y accumuler. A la surface d'un ellipsoïde allongé, et de révolution, la pression ne devient infinie en aucun point; mais elle est d'autant plus considérable aux deux pôles, que l'axe qui les joint est plus grand par rapport au diamètre de l'équateur. D'après les théorèmes que je viens de citer, cette pression est à celle qui a lieu à l'équateur du même corps, comme le carré de l'axe des pôles est au carré du diamètre de l'équateur; de manière que, si l'ellipsoïde est très-allongé, la pression élec-

trique pourra être très-faible à l'équateur, tandis qu'aux pôles elle surpassera la résistance de l'air. Aussi, lorsqu'on électrise une barre métallique qui a la forme d'un ellipsoïde très-allongé, le fluide électrique se porte principalement vers ses extrémités; et il s'échappe par ces deux points, en vertu de son excès de pression sur la résistance que l'air lui oppose. En général, l'accroissement indéfini de la pression électrique, en certains points des corps électrisés, fournit une explication naturelle et précise de la faculté qu'ont les pointes de dissiper rapidement, dans l'air non-conducteur, le fluide électrique dont elles sont chargées.

Si la nature du corps électrisé était telle que l'électricité ne pût pas s'y mouvoir librement, l'excès de pression dont nous venons de parler, s'exercerait contre les particules mêmes du corps qui envelopperaient la couche électrique, ou, en général, contre celles qui, soit par leur affinité, soit par tout autre mode de résistance quelconque, s'opposeraient à sa dissipation.

Ayant déterminé, d'après la théorie, la manière dont l'électricité se dispose dans un seul corps conducteur isolé et soustrait à toute influence étrangère, passons au cas plus composé où plusieurs corps électrisés et conducteurs s'influencent mutuellement; et, comme il faut choisir des corps dont la forme rende les phénomènes accessibles au calcul, considérons deux sphères de matière conductrice, toutes deux électrisées et mises en présence l'une de l'autre à une distance quelconque.

La disposition de l'électricité dans cette circonstance et dans toutes celles où plusieurs corps électrisés sont soumis à leur influence mutuelle, est assujettie à un principe général, évident de lui-même, et qui a le précieux avantage de ramener immédiatement toutes ces questions à une condition mathématique. En voici l'énoncé, que nous tirons encore du beau travail de M. Poisson.

« Si plusieurs corps conducteurs électrisés sont mis en présence les uns des autres, et qu'ils parviennent à un état électrique permanent, il faudra, dans cet état, que la résultante des actions des couches électriques qui les recouvrent, sur

» un point quelconque pris dans l'intérieur d'un de ces corps,
 » soit nulle. Car, si cette résultante n'était pas nulle, l'élec-
 » tricité combinée qui réside au point que l'on considère,
 » serait décomposée, et l'état électrique changerait, contre
 » la supposition que l'on a faite de sa permanence. »

Ce principe, traduit en calcul, fournit immédiatement autant d'équations que l'on considère de corps, et que le problème présente d'inconnues; mais leur résolution surpasse souvent les forces de l'analyse. Cependant M. Poisson, qui avait si heureusement découvert la clef générale de cette théorie, est parvenu à lever toutes les difficultés analytiques, pour le cas de deux sphères mises en contact ou en présence l'une de l'autre, et chargées primitivement de quantités quelconques d'électricités. Les formules auxquelles il est parvenu offrent un grand nombre de résultats que l'on peut vérifier par l'expérience, et qui sont autant d'épreuves sévères de la théorie. On peut lire les détails de cette comparaison dans le *Traité général*; je me bornerai ici à citer un seul de ces phénomènes dont les particularités sont extrêmement remarquables. Il a lieu lorsque deux sphères d'inégal diamètre, après avoir été mises en contact et électrisées simultanément, sont écartées graduellement l'une de l'autre à des distances diverses, en restant toujours isolées. Alors leur état électrique éprouve les plus singulières variations. D'abord, au moment du contact, l'électricité, étudiée par le plan d'épreuve, se trouve de même nature sur les deux sphères, comme on devait s'y attendre; mais, de plus, elle est nulle au point du contact. Maintenant, si l'on sépare les deux sphères, et que leurs dimensions, comme nous l'avons supposé, soient inégales, cette nullité n'a plus lieu. L'électricité naturelle de la petite sphère se décompose, et celle qui est de nature contraire à celle de la grande sphère, se porte vers le point où le contact a eu lieu. Cet effet diminue à mesure qu'on écarte les deux sphères, et devient nul à une certaine distance, qui dépend du rapport de leurs diamètres. Alors le point de la petite sphère, sur lequel s'est fait le contact, se retrouve dans l'état naturel; enfin, à une distance plus grande encore, ce point se recouvre de la même électricité

que le reste de la sphère dont il fait partie. L'existence de ces singulières alternatives, la distance où elles ont lieu, leur apparition constante sur la plus petite des deux sphères, tout cela peut se déterminer avec le plan d'épreuve; et tout cela aussi peut se prédire, avec la même précision, par les formules que M. Poisson a données.

Ne pouvant entrer ici dans des vérifications plus détaillées, nous les supposerons faites, et nous tirerons de la théorie la définition précise de plusieurs élémens de l'action électrique que l'on confond très-souvent.

La première chose à considérer, c'est la nature de l'électricité libre qui réside à la surface des corps soumis aux expériences, et en chacun des points de cette surface : on la détermine en touchant avec le plan d'épreuve, et présentant celui-ci à l'aiguille de l'électroscope déjà chargée d'une électricité connue.

La seconde chose est la quantité de cette électricité accumulée en chaque point, ou, ce qui revient au même, l'épaisseur de la couche électrique. On la mesure encore, en touchant avec le plan d'épreuve, et présentant ce plan à l'aiguille de la balance préalablement chargée d'une électricité de même nature. La force de torsion nécessaire pour balancer la réaction électrique du plan, est, à distances égales, proportionnelle à la quantité d'électricité qu'il possède, ou, ce qui revient au même, à l'épaisseur de la couche électrique sur l'élément qu'il a touché.

La troisième chose que l'on peut considérer théoriquement, c'est l'influence exercée par chaque élément de la couche électrique sur une molécule de fluide située à sa surface extérieure ou hors de cette surface. L'attraction ou la répulsion ainsi considérée, est directement proportionnelle à l'épaisseur de la couche électrique sur l'élément superficiel qui attire ou qui repousse; et elle est inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare cet élément du point attiré ou repoussé.

Enfin, la dernière chose qu'il faut considérer, c'est la pression que l'électricité exerce contre l'air extérieur en chaque point de la surface du corps électrisé. L'intensité de cette

pression est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique.

En restant fidèle à ces dénominations, on ne risquera point de s'égarer par des considérations vagues; et, si l'on y joint le souvenir du développement de l'électricité par influence à distance, on n'aura aucune peine à se rendre compte de presque tous les phénomènes électriques.

Remarquons ici une vérité bien importante. Quelle que puisse être, au fond, la nature réelle de l'électricité, puisque la constitution que nous avons attribuée aux deux fluides électriques reproduit exactement et numériquement tous ceux de ces phénomènes qui ont pu, jusqu'à présent, être développés par le calcul, cela suffit pour que nous puissions provisoirement admettre cette constitution dans nos recherches ultérieures; car, d'après les épreuves déjà faites, nous pouvons affirmer que la véritable nature de l'électricité, quelle qu'elle soit, devra se plier aux mêmes faits avec une égale rigueur, et devra, par conséquent, dès qu'on l'y appliquera, rentrer dans les conditions que nous avons attribuées aux deux fluides, de sorte que les faits ne s'en déduiront pas autrement, ni par des formules différentes de celles que nous employons aujourd'hui. Mais des observations, ou même seulement des applications nouvelles, serviront, lorsque l'analyse mathématique sera plus avancée, pour confirmer ou infirmer la réalité physique de la théorie, et feront alors connaître si elle est l'interprétation exacte et générale de tous les phénomènes, ou si elle est seulement l'expression approchée et particulière de ceux qui s'y sont trouvés jusqu'à présent soumis.

Cette marche progressive des idées s'observe déjà dans la succession des théories qui ont précédé celle que nous venons d'exposer, et parmi lesquelles une sur-tout a été trop célèbre, et trop réellement utile, pour qu'il soit permis de la passer sous silence. La plupart des phénomènes électriques, quand on se borne à leurs circonstances les plus générales, peuvent se représenter en supposant l'existence d'un seul fluide électrique dont une certaine quantité est répandue dans tous les corps, et forme leur état naturel. L'excès de ce fluide dans les

corps produit ce que nous avons appelé l'électricité vitrée, et le défaut, ce que nous avons appelé l'électricité résineuse ; d'où résultent deux états des corps, que les partisans de ce système désignent par les dénominations de *positif* et de *négalif*. Ils admettent aussi que les molécules du fluide électrique se repoussent mutuellement. Mais de plus, comme l'expérience montre que les corps dans l'état naturel n'exercent aucune action électrique les uns sur les autres, ils sont contraints de supposer que les molécules électriques sont attirées par la matière même des corps. Enfin, une discussion approfondie et calculée prouve que cette supposition ne suffirait pas pour l'équilibre, et qu'il faut encore admettre que les molécules des corps exercent les unes sur les autres une action répulsive, sensible à de grandes distances comme les influences électriques elles-mêmes, et variable avec la distance exactement suivant la même loi. Franklin qui, le premier, imagina ce système, l'employa ingénieusement pour lier ensemble tous les phénomènes électriques connus à cette époque, et qui, jusqu'alors, étaient demeurés épars et isolés ; mais il n'aperçut pas la conséquence paradoxale à laquelle son hypothèse conduisait. OEpinus fut le premier qui, par une analyse exacte de toutes les forces qui concourent à l'établissement de l'équilibre électrique, découvrit la nécessité d'une répulsion entre les particules matérielles des corps (*Tentamen Theoriæ electricitatis et magnetismi*, page 39) ; après lui, le célèbre physicien H. Cavendish fut également conduit à la même conséquence, car il fit de cette répulsion une des conditions fondamentales d'une hypothèse sur la nature de l'électricité, qu'il publia dans les Transactions Philosophiques de l'année 1771, et qui est tout-à-fait semblable à celle d'OEpinus.

Quoique l'existence d'une telle force répulsive entre les particules matérielles de tous les corps puisse, au premier coup d'œil, paraître absolument incompatible avec les phénomènes les plus généraux que l'univers présente, et particulièrement avec la loi de l'attraction céleste, cependant il n'en est pas ainsi en réalité. Car cette répulsion, telle que OEpinus et Cavendish l'emploient, serait exactement contre-

balancée par l'attraction mutuelle que leur hypothèse suppose exister entre les quantités de fluide électrique que contiennent tous les corps lorsqu'ils sont dans leur état naturel : de sorte qu'en définitif, ces deux causes contraires ne produiraient aucune résultante effective qui sollicitât les corps tant qu'ils sont dans cet état ; et ainsi leur existence ne gênerait en rien les effets de cette autre attraction universelle qui s'exerce entre eux, indépendamment de leur état électrique. Maintenant, si l'on admet un tel état de choses, on peut en effet lier ensemble une grande partie des phénomènes électriques ; on peut concevoir leur dépendance mutuelle, et même les prévoir, non pas, à la vérité, en quantité et en nombres, mais dans leurs circonstances générales. On peut expliquer ainsi, par exemple, les attractions et les répulsions mutuelles des corps électrisés, et même le développement des propriétés électriques dans les corps à l'état naturel, par la seule influence à distance d'un autre corps électrisé. Mais, depuis le temps où cette théorie a été pour la première fois imaginée, une foule de particularités des phénomènes ont été observées avec plus de détail, et fixées avec plus de précision. Un grand nombre ont été limitées par des mesures rigoureuses. Enfin, nous les connaissons en nombres, et ainsi ce sont les nombres qu'il s'agit de représenter aujourd'hui. Par exemple, lorsque Oëpinus et Cavendish ont écrit, la loi des attractions et des répulsions électriques n'avait pas encore été constatée par des expériences précises : on pouvait donc douter si les forces qui produisaient ces phénomènes variaient comme le carré, le cube, ou telle autre puissance de la distance. Il était en conséquence impossible de déterminer numériquement la distribution de l'électricité dans les corps, lorsqu'elle s'y dispose en équilibre, en vertu de sa seule action sur elle-même ; comme aussi d'assigner la proportion de son partage entre deux corps d'une forme donnée, puisque ces phénomènes délicats dépendent de la loi suivant laquelle le fluide agit sur lui-même et sur les autres corps. Dans la loi du cube, par exemple, les conditions de distribution et de partage de l'électricité seraient très-différentes de ce qu'elles sont dans la

loi du carré ; ainsi , nous pouvons maintenant rejeter la première de ces lois comme contraire aux phénomènes. De même , si l'on introduisait la loi du carré des distances dans l'hypothèse de Cavendish ou d'Œpinus , on serait vraisemblablement conduit à des conséquences contraires aux rapports réels de distribution et de partage que nous connaissons aujourd'hui par l'observation ; d'où l'on conclurait également la fausseté de cette hypothèse. Mais cette déduction n'a pas encore été faite ; et , d'après la complication à laquelle l'hypothèse dont il s'agit est soumise , elle paraît très-difficile à effectuer. Heureusement elle ne semble pas d'une grande importance ; car l'hypothèse ainsi poursuivie dans ses conséquences , ne pourrait avoir d'issue plus favorable que celle de se trouver d'accord avec les phénomènes , accord que la théorie actuelle des deux fluides offre déjà avec l'exactitude la plus rigoureuse ; et , ce qui n'est pas une considération de peu d'importance , avec une simplicité , une analogie complètes , et sous une forme qui la rend susceptible d'être aisément soumise au calcul.

CHAPITRE VI.

Théorie des mouvemens excités dans les corps par les attractions et les répulsions électriques.

DÈS les premières recherches que nous avons faites sur les phénomènes électriques , nous avons découvert que deux corps électrisés , mis en présence l'un de l'autre , semblent s'attirer ou se repousser. Nous avons depuis observé que l'attraction et la répulsion s'exercent uniquement entre les particules des fluides électriques , sans que la substance matérielle des corps y participe par aucune affinité particulière. Il devient donc nécessaire d'examiner comment , et par quel mécanisme , les effets de ces forces peuvent se transmettre aux particules des corps , et produire en eux les mouvemens que nous observons.

Pour plus de simplicité , bornons-nous d'abord à considérer deux sphères électrisées A et B , l'une A fixe , l'autre B

mobile ; il pourra se présenter trois cas qu'il faut discuter séparément.

- 1°. A et B non-conducteurs ;
- 2°. A non-conducteur, B conducteur ;
- 3°. A conducteur, et B conducteur.

Dans le premier cas, les particules électriques sont fixées sur les corps A et B par la force inconnue qui produit la non-conductibilité. Ne pouvant quitter ces corps, elles partagent avec eux les mouvemens que leur action réciproque tend à leur imprimer à elles-mêmes.

Alors les forces qui peuvent opérer le mouvement sont, 1°. l'attraction ou la répulsion mutuelle du fluide de A sur le fluide de B ; 2°. la répulsion du fluide de B sur lui-même. Mais les répulsions des parties d'un système ne pouvant imprimer aucun mouvement à son centre de gravité, les effets de cette action propre s'entre-détruisent sur chaque sphère, et il n'en peut résulter aucun mouvement de l'une vers l'autre. Le premier genre de forces est donc le seul auquel il faille avoir égard. Si la distribution de l'électricité est uniforme sur chaque sphère, chacune d'elles attire ou repousse l'autre comme si toute sa masse électrique était concentrée à son centre ; et la force totale d'attraction ou de répulsion est proportionnelle au produit des quantités totales d'électricité qu'elles possèdent. Cette force se transmet à la matière pondérable des deux sphères A et B, en vertu de l'adhésion par laquelle elles retiennent les particules électriques ; et, à cause des deux facteurs dont son expression se compose, on voit qu'elle deviendrait nulle si l'une ou l'autre des deux sphères n'était point primitivement chargée d'une électricité étrangère. Pendant le mouvement, elle n'éprouve de variation que celle qui provient de la distance, parce que les deux sphères étant supposées faites de substances rigoureusement non-conductrices, leur action réciproque n'y produit aucun nouveau développement d'électricité.

Dans le second cas, la sphère B, supposée de matière con-

ductrice, éprouve une décomposition de ses électricités naturelles par l'influence de A. Les électricités opposées qui résultent de cette décomposition se joignent à la quantité étrangère que l'on y a introduite, et se disposent ensemble conformément aux lois de l'équilibre électrique; alors le mouvement de B vers A peut s'envisager de deux manières.

Supposons d'abord que, sans troubler l'état électrique de B, on étende sur sa surface une couche isolante, solide, sans pesanteur, et qui y reste invariablement adhérente. L'électricité de B, ne pouvant plus s'échapper, s'appuiera pour ainsi dire sur cette couche, et transmettra par son moyen aux particules du corps les forces qui la sollicitent. Alors les forces qui agissent sur le système seront, 1°. l'attraction mutuelle ou la répulsion du fluide de A sur le fluide de B; 2°. la répulsion du fluide de B sur lui-même: mais cette répulsion ne peut produire aucun mouvement sur le centre de la cavité de B; 3°. la pression du fluide de B sur l'enveloppe isolante: mais cette pression est exactement contre-balancée par la réaction de l'enveloppe, et il n'en résulte encore aucun mouvement. La première force est donc encore la seule à laquelle il faille avoir égard.

Lorsque la distance D des deux sphères est très-grande comparativement aux rayons de leurs surfaces, les électricités décomposées de B sont, d'après le calcul, comme d'après l'expérience, distribuées à-peu-près également sur les deux hémisphères situés du côté de A et du côté opposé. Alors les actions qu'elles éprouvent de la part de A sont à-peu-près égales et s'entre-détruisent. Toute la force effective provient donc des quantités d'électricité étrangère introduites dans les deux sphères, et elle est proportionnelle au produit de ces quantités. Tant que les deux sphères sont très-éloignées l'une de l'autre, ce produit, et la force attractive ou répulsive qu'il mesure, ne varient qu'en vertu du changement de la distance. Mais ceci n'est qu'une approximation. Car, à considérer la chose dans la rigueur, l'état électrique de la sphère conductrice B varie à mesure qu'elle s'approche de A, à cause de la

séparation que celle-ci produit dans ses électricités naturelles. Par conséquent l'action réciproque des deux sphères doit varier aussi d'une manière fort compliquée.

La supposition d'une enveloppe isolante, sans pesanteur, ne sert ici que pour lier le fluide électrique avec les particules matérielles du corps B. Cette conception peut même être considérée comme réalisée par la petite couche d'air qui enveloppe ordinairement les corps, et qui est adhérente à leur surface. Mais on peut encore arriver au même résultat sans le secours de cet intermédiaire; alors il faut considérer les pressions produites sur l'air par les électricités qui existent dans B à l'état de liberté. En effet, ces électricités, tant celles qu'on y a introduites que celles qui s'y décomposent par influence, se portent vers la surface de B, où l'air les arrête par sa pression, et les empêche de sortir. Elles se disposent donc *sous* cette surface comme l'exige leur action sur elles-mêmes et l'influence du corps A, en s'appuyant, pour cela, contre l'air qui les empêche de s'étendre. Mais réciproquement, elles pressent cet air de dedans en dehors, et tendent à le soulever avec une force proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique en chaque point. Décomposez toutes ces pressions suivant trois axes rectangulaires de coordonnées xyz , dont l'une z soit dirigée vers le centre de la sphère A, et faites-en les sommes partielles; vous trouverez que, suivant les x et les y , elles sont nulles, de sorte qu'il ne reste en définitif qu'une seule résultante dirigée vers le centre de la sphère A. Lorsque les sphères sont très-éloignées l'une de l'autre comparativement aux rayons de leurs surfaces, les électricités décomposées de B pressent l'air extérieur en sens contraire avec une intensité à-peu-près égale, et leurs effets s'entre-détruisent presque exactement. Il ne reste donc que l'effet des quantités étrangères introduites dans les deux sphères; et il en résulte un excès de pression dirigé suivant la ligne des centres et proportionnel au produit de ces quantités, c'est-à-dire exactement le même que l'autre méthode l'avait donné. Il est évident d'ailleurs que cette expression est sujette aux mêmes limitations, puisque les pressions produites par la

couche électrique contre l'air extérieur doivent varier avec la quantité d'électricité naturelle décomposée dans B par l'influence de A, à mesure que les deux sphères se rapprochent.

Le troisième cas, où A et B sont tous deux conducteurs, se résout exactement par les mêmes principes, soit en imaginant les deux surfaces électrisées couvertes d'une enveloppe isolante, et calculant les actions réciproques des deux fluides qui se transmettent par le moyen de cette enveloppe aux particules matérielles; soit en considérant les pressions produites sur l'air extérieur par les deux couches électriques, et calculant l'excès de ces pressions suivant la ligne qui joint les deux centres. Seulement, dans ce cas, la force attractive ou répulsive des deux sphères variera à mesure qu'elles s'approcheront l'une de l'autre, non-seulement par la différence qui en résultera dans l'intensité de l'action électrique, mais encore par la décomposition progressive des électricités naturelles qui s'opérera dans les deux corps conducteurs A et B.

Les résultats que nous venons d'obtenir subsisteraient encore si les sphères A et B étaient toutes deux libres de se mouvoir l'une vers l'autre; car, sans troubler leur action réciproque, on peut toujours imprimer à l'une et à l'autre le mouvement d'une d'elles en sens contraire; ce qui réduirait celle-ci à l'état de repos, et ramènerait le problème au cas que nous avons considéré. Enfin, si nous avons choisi des corps de forme sphérique, c'est uniquement pour pouvoir effectuer les calculs qui donnent, dans chaque cas, les valeurs des attractions. Car les mêmes raisonnemens s'appliquent également à tous les cas composés.

Considérons, par exemple, de cette manière les phénomènes que présente un pendule électrique dévié de la verticale par l'action d'un tube électrisé. Pour fixer les idées, concevons ce pendule formé par une petite boule de moelle de sureau suspendue à un fil de soie CS, *fig. 17*, et chargée d'électricité *vitrée*. Tant que la boule sera soustraite à toute influence étrangère, l'électricité se disposera *sous* sa surface en une couche sphérique très-mince, d'une épaisseur par-tout égale; et, en conséquence, la pression qu'elle exercera sur l'air extérieur

sera par-tout égale aussi, puisqu'elle est toujours, en chaque point, proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche. La petite boule sera donc moins pressée par l'air extérieur que s'il n'y avait point d'électricité libre à sa surface; mais elle le sera encore également, et par conséquent elle ne prendra de mouvement dans aucun sens.

Supposons maintenant que, à quelque distance de sa surface, on approche un bâton de gomme-laque ou de cire d'Espagne électrisé *résineusement*; aussitôt une portion des électricités naturelles de la petite boule sera décomposée par influence. La partie résineuse fuira le tube, la partie vitrée se portera vers lui. Ce dernier mouvement sera partagé par l'électricité vitrée étrangère, qui était primitivement répandue sous la surface de la boule. La pression sur l'air, toujours proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique, deviendra donc plus forte du côté du tube; et en conséquence la pression atmosphérique, qui était primitivement égale sur toute la surface, deviendra comparativement plus forte sur la face opposée. Cet excès de pression poussera donc la boule vers le tube résineux; de sorte que, si l'on veut la retenir avec un autre fil de soie CS' dirigé en sens contraire de la tendance qu'elle éprouve, ce fil soutiendra tout l'effort produit par la différence de pression.

Supposons maintenant que l'on coupe ce fil : la boule cédera à l'effort qui l'entraîne, et le fil isolant CS qui la soutient s'écartera de la verticale. Mais cet écart aura une limite; car le poids de la boule qui, dans la position initiale, était supporté par le point de suspension S , ne l'est plus qu'en partie dans la position oblique SC' , *fig. 18*. En effet, si l'on représente l'effort de ce poids par la ligne verticale $C'P$, on pourra le décomposer en deux autres forces, l'une $C'Q$ dirigée dans le prolongement du fil et détruite par sa résistance, l'autre $C'R$ perpendiculaire au fil, et tendant à ramener la boule au point le plus bas. Or, cette seconde force croîtra évidemment avec l'angle $CS C'$; et, en conséquence, elle tendra d'autant plus à faire descendre la boule que celle-ci sera plus écartée de la verticale. Par conséquent, dans chaque position du tube, l'écart du fil sera tel que l'excès de pression atmosphérique, qui tend

à soulever la boule, soit égal à la pesanteur décomposée qui tend à la faire descendre.

Nous avons supposé le tube et la boule chargés d'électricités de nature diverse : s'ils l'étaient d'électricités de même nature, ces électricités se repousseraient au lieu de s'attirer. La pression de l'électricité de la boule contre l'air extérieur deviendrait prépondérante sur celle de ses faces qui est la plus éloignée du tube, et elle ferait effort pour s'éloigner de lui.

Voilà ce qui a lieu en général : mais, dans certains cas, on observe un phénomène qui semble, au premier coup d'œil, démentir tout-à-fait ce raisonnement. En approchant l'un de l'autre deux corps électrisés de la même manière, on voit la répulsion s'affaiblir; et, en diminuant toujours leur distance mutuelle, elle finit par se changer en attraction. Cela arrive ordinairement quand un des corps est fort petit par rapport à l'autre, et est faiblement électrisé; par exemple, dans le cas où la petite boule de moelle de sureau du pendule électrique est chargée d'électricité résineuse, et qu'on en approche de plus en plus un gros tube de cire d'Espagne électrisé, comme elle, résineusement. Mais, bien loin que ce phénomène soit contraire à notre théorie, il en est une conséquence. A mesure que le tube, en s'approchant de la boule, repousse l'électricité résineuse qu'on lui a primitivement donnée, il décompose une partie plus considérable de ses électricités combinées. Il repousse la résineuse qui va se joindre à l'autre, et attire la vitrée qui se porte vers lui. Si ces deux électricités décomposées existaient seules à la surface de la boule, il n'y a nul doute qu'elle serait attirée vers le tube : elle le serait d'autant plus énergiquement, qu'il s'approcherait d'elle davantage, et qu'il serait plus fortement électrisé, sans que l'on pût concevoir de bornes à cette attraction. Mais il n'en est pas ainsi de la répulsion due à la quantité fixe d'électricité résineuse primitivement donnée à la boule. Celle-ci ne peut croître uniquement que par la diminution de la distance. Si donc, à une certaine distance, son énergie est moindre que l'attraction due au développement progressif des électricités combinées, cette dernière force l'emportera, et la boule se rapprochera du tube. On conçoit

ainsi que la possibilité du phénomène dépend des proportions qui ont lieu entre les quantités d'électricité primitivement existantes sur le tube et sur la boule ; et, sans pouvoir assigner ces proportions, on voit que l'inversion se produira d'autant plus facilement, à une distance d'autant plus grande, que le tube aura plus d'électricité, et que la boule en aura moins : de sorte que, si la distance est fixe, la répulsion ou l'attraction dépendront uniquement du rapport qui existera entre les quantités d'électricité.

On peut rendre ce résultat sensible par une expérience, dont la disposition est représentée *fig.* 19. On a un cylindre métallique isolé que l'on met en communication avec le premier conducteur de la machine électrique. A côté de ce cylindre, une petite boule de moelle de sureau est suspendue par un fil de soie ; et un autre fil de soie attaché au cylindre, l'empêche de s'éloigner au-delà d'une certaine distance. On électrise d'abord le cylindre faiblement. La boule est attirée, le touche, et est ensuite repoussée. On continue d'électriser, elle est de nouveau attirée ; et ainsi de suite, attirée et repoussée, conformément à notre théorie.

Pour donner un autre exemple de ces considérations, appliquons-les aux mouvemens du petit cercle de papier doré, porté par l'aiguille de l'électroscope ou de la balance électrique. Concevons que ce petit cercle ayant été d'abord chargé d'électricité d'une certaine nature, on lui présente à quelque distance, presque parallèlement à sa surface, un autre petit cercle électrisé et fixe, que je supposerai d'abord formé d'une matière non-conductrice, afin que l'électricité distribuée sur sa surface ne se déplace pas.

Lorsque le cercle mobile est seul dans la balance, l'électricité se distribue sur ses deux faces de la même manière, et en proportion pareille, à cause de leur symétrie. Les pressions latérales contre l'air extérieur sont par conséquent égales, et il n'en résulte aucun mouvement. Mais, dès que cette électricité est soumise à l'influence du cercle fixe, elle est attirée ou repoussée par la sienne, et la pression qu'elle exerce contre l'air devient inégale sur les deux faces. Si elle est attirée, elle

presse davantage l'air du côté qui regarde le cercle fixe ; si elle est repoussée, elle le presse davantage du côté opposé. Ainsi, dans le premier cas, l'excès de la pression atmosphérique poussera le cercle mobile vers le cercle fixe ; dans le second, il l'en éloignera.

Jusqu'ici nous avons considéré des formes de surfaces telles que l'électricité, abandonnée à elle-même, devait évidemment s'y distribuer d'une manière symétrique, et produire des pressions égales sur les parties opposées. Alors le corps électrisé doit évidemment rester immobile, s'il n'est soumis à aucune influence étrangère. Mais, quoique cette compensation soit plus difficile à reconnaître dans les corps dont la forme est plus composée, il n'en est pas moins certain qu'elle existe ; car on démontre en mécanique, que les actions réciproques des parties d'un système libre ne peuvent pas lui imprimer de mouvement de translation ni de rotation autour de son centre de gravité.

Il n'en serait plus de même dans le cas où le fluide électrique pourrait s'échapper par quelque endroit du corps. Par exemple, on forme, avec un gros fil de laiton ou de fer, une aiguille AA, *fig.* 20, dont les deux bouts sont recourbés en sens opposé, perpendiculairement à sa longueur, et aiguisés en pointe. On y fait au centre C un petit trou, et l'on y ajuste une chape conique que l'on pose sur un pivot CM, autour duquel l'aiguille peut tourner horizontalement. Le pied du pivot P se visse sur l'extrémité du conducteur d'une machine électrique. Tant qu'on n'excite point d'électricité, l'aiguille demeure immobile dans la position qu'on lui a donnée ; mais si l'on met la machine électrique en action, l'aiguille commence aussitôt à tourner, et tourne de plus en plus avec rapidité, comme si elle repoussait l'air par ses pointes.

Pour concevoir nettement ce phénomène, imaginons que l'aiguille, après avoir été électrisée, soit recouverte d'une petite couche isolante sans pesanteur, qui l'enveloppe de toutes parts ; et supposons qu'on la suspende librement dans le vide à un fil de soie qui lui permette de tourner librement autour de son centre C. Dans ce cas, les pressions produites à la surface de

la couche électrique s'exerceront contre l'enveloppe isolante ; mais , d'après le théorème de mécanique que nous avons rapporté tout-à-l'heure , elles ne pourront faire prendre au système aucun mouvement de rotation sur lui-même , de sorte que toutes les pressions , décomposées dans un sens quelconque , s'entre-détruiront sur les faces opposées. Maintenant supposons que , sur une certaine partie de l'aiguille , je ne dis pas à l'extrémité de la pointe , mais dans un endroit quelconque , on enlève l'enveloppe isolante de manière que l'électricité puisse s'échapper par cette ouverture ; alors , la pression en cet endroit devenant nulle , la pression opposée agira seule , et par conséquent elle fera tourner l'aiguille dans le sens suivant lequel elle agit.

Ce résultat ne pourrait guère s'observer dans le vide absolu , parce que l'électricité de l'aiguille s'y dissiperait instantanément , lorsque l'on creverait la couche isolante ; mais on peut le produire dans l'air libre ; seulement il faut aiguïser assez les pointes de l'aiguille pour que l'électricité s'accumule à leur extrémité à un degré tel qu'elle surmonte la pression atmosphérique. Alors l'air lui-même sert d'enveloppe isolante , et l'ouverture se fait par l'effort de l'électricité même ; au lieu que , dans notre première hypothèse , nous supposions qu'on la pratiquait artificiellement. Le phénomène est absolument pareil à ce qui arriverait si l'aiguille , au lieu d'être électrisée , était un vase creux rempli d'eau ou de mercure , et que les extrémités , recourbées en pointes , fussent deux petits canaux dont les orifices auraient été crevés par la pression du fluide. Alors la pression devenant nulle à ces orifices , celle qui s'exercerait sur l'élément opposé de la surface intérieure pousserait l'aiguille en sens contraire , et la ferait tourner ainsi autour de son centre. Nous avons en effet réalisé un pareil mouvement dans le premier livre , page 60.

Dans ce cas , si l'on fait le produit des masses par les vitesses de toutes les molécules liquides qui s'échappent , ce produit sera constamment égal à la somme des produits des masses par les vitesses des autres points de l'aiguille , et du liquide qui tourne avec elle en sens opposé. La même égalité devra donc

encore avoir lieu dans le mouvement de l'aiguille électrisée ; or, comme la masse des molécules électriques qui s'échappent est absolument inappréciable, puisque les corps les plus fortement électrisés n'acquièrent aucun accroissement sensible de poids aux balances les plus précises, il faut que, par compensation, la vitesse des particules électriques soit infiniment considérable ; et aucun exemple peut-être n'est plus propre à donner une idée juste de leur rapidité.

Avant que l'on connût les véritables lois de l'équilibre de l'électricité, on ignorait comment les attractions et les répulsions, qui n'ont réellement lieu qu'entre les particules électriques, pouvaient se transmettre aux particules matérielles des corps ; et l'on désignait cet effet par le mot vague de *tension*, qui représentait l'électricité à-peu-près comme un ressort placé entre les corps électrisés, et tendant à les rapprocher ou à les écarter. Les détails dans lesquels nous venons d'entrer, montrent comment cette transmission de force s'opère, par l'intermédiaire de la pression que l'électricité exerce contre l'atmosphère environnante, ou en général contre les obstacles qui s'opposent à sa dissipation.

CHAPITRE VII.

De la meilleure disposition à donner aux Machines électriques, et aux Conducteurs qui en font partie.

Dès nos premières recherches sur les phénomènes électriques, nous avons compris que, pour les agrandir, il fallait opérer le frottement sur de grandes surfaces. Nous avons donc employé un plateau ou un cylindre de verre que nous avons fait tourner entre deux frottoirs fixes, par le moyen d'une manivelle ; et nous avons placé près de sa surface un corps métallique isolé qui se charge de l'électricité à mesure qu'elle se développe, pour la transmettre à d'autres conducteurs également isolés qui la conduisent par-tout où les expériences l'exigent. Mais, maintenant que nous savons que plusieurs corps

ainsi électrisés réagissent toujours les uns sur les autres, nous devons nous demander quelle est la meilleure disposition à donner à toutes les parties de l'appareil; quelle doit être la nature des frottoirs pour développer le mieux l'électricité; la forme du premier conducteur pour la soutirer rapidement; celle des conducteurs secondaires pour qu'elle s'y accumule en abondance; enfin celle des supports isolans pour qu'elle se conserve d'une manière plus durable. Ce sont là autant de questions importantes dont on peut voir la discussion dans le *Traité général* : ici je me bornerai à en donner les résultats.

Trois choses sont à considérer dans cette recherche : le plateau, le frottoir et les conducteurs.

Considérons d'abord le frottoir : quelle que soit sa nature, il faut, pour rendre le frottement étendu et durable, qu'il s'applique exactement sur la surface du plateau ou du cylindre de verre, et qu'il la presse en un grand nombre de points. Rien de plus avantageux pour cet objet, que des coussins rembourrés avec du crin, couverts en cuir souple, et pressés par un ressort contre la surface du verre. Le cuir seul, frottant ainsi contre le verre, développe peu d'électricité. Mais on en obtient incomparablement davantage en recouvrant sa surface d'un amalgame sec de mercure, d'étain et de zinc triturés ensemble; alors cet amalgame est réellement le corps frotté (1). Si l'on isole les coussins pendant le frottement, et si l'on examine la nature de l'électricité acquise par le verre, on voit qu'elle est vitrée; par conséquent les coussins prennent l'électricité contraire, c'est-à-dire la résineuse; ce que l'on peut

(1) M. Singer, physicien anglais, qui a écrit un *Traité complet sur les appareils électriques*, recommande comme préférable à tous les autres, l'amalgame formé avec deux parties en poids d'étain, quatre de zinc, et sept de mercure. On chauffe d'abord le mercure seul, un peu au-dessus de 100°; ensuite, on le verse dans une boîte de bois, et l'on y ajoute les quantités prescrites des deux métaux amenés préalablement à l'état de fusion. Alors, on ferme promptement la boîte, et on l'agite vivement pour rendre la mixtion parfaite. Quand l'alliage est refroidi, on le pile dans un mortier, pour le réduire en poudre fine; et l'on amalgame cette poudre avec une quantité de graisse de porc justement suffisante pour en faire une pâte.

vérifier également par l'observation. Mais, dans l'usage ordinaire de la machine, il faut bien se garder d'isoler les cousins; il faut, au contraire, les faire communiquer au sol par une communication métallique; car on obtient ainsi beaucoup plus d'électricité.

Ceci est un résultat général dans le développement de l'électricité par la mutuelle friction de deux corps quelconques. L'excès que chacun d'eux peut acquérir est toujours beaucoup plus sensible quand l'autre communique au sol, que lorsqu'ils sont tous deux isolés. Ce phénomène est d'une grande importance, parce qu'il semble tenir à la manière même dont les deux électricités sont développées par le frottement. Mais, par cette raison, il doit être peu susceptible d'explication, puisque nos théories ne s'appliquent qu'à l'électricité déjà excitée, et sont jusqu'ici peu avancées, ou même presque nulles pour tout ce qui concerne son dégagement des corps. Il ne nous reste donc qu'à le définir nettement d'après l'expérience même, et à en déduire les conditions mécaniques auxquelles le développement de l'électricité est assujéti. Pour cela, concevons d'abord deux corps isolés A et B, qui, étant frottés l'un contre l'autre, dans l'état naturel, acquièrent, l'un une quantité $+e$ d'électricité vitrée, l'autre une quantité $-e$ d'électricité résineuse. Je donne à celle-ci le signe négatif pour indiquer qu'ajoutée à l'autre, elle la neutralise. Sans doute, c'est la nature des deux surfaces et le pouvoir de la friction qui déterminent cette proportion entre les espèces et les quantités d'électricités qui s'attachent à chacune d'elles; et nous ignorons absolument par quel mécanisme ce phénomène s'opère. Mais, une fois que les deux électricités $+e$ et $-e$ sont dégagées de leur combinaison, il n'est pas douteux qu'elles jouissent de leurs propriétés individuelles, de sorte qu'elles doivent exercer leur force répulsive propre, et s'attirer mutuellement. En vertu de la première cause, l'électricité $+e$, développée sur A, tend à se répandre sur B par les points de contact; et, réciproquement, l'électricité résineuse $-e$ développée sur B tend à se répandre sur A. Cette double tendance est encore favorisée par l'attraction mutuelle que $+e$ et $-e$

exercent l'une sur l'autre, et en vertu de laquelle elles font effort pour se réunir. Puisque cette propagation et cette réunion ne s'opèrent pas, il faut que le pouvoir inconnu qui a forcé les deux électricités $+e$ et $-e$ à se dégager l'une de l'autre, et à se porter séparément sur l'un et l'autre corps, agisse encore sur elles après cette séparation, et qu'il ait assez d'énergie pour les maintenir séparées, malgré les deux causes qui conspirent à les réunir. Or, il paraît que cette action du frottement ne s'exerce qu'à la surface de contact même, de sorte qu'elle n'empêche pas chacune des deux électricités $+e$, $-e$ de se répandre dans le corps A ou B qui la possède, avec le degré de liberté que peut lui permettre la faculté plus ou moins conductrice de ce corps. Car si B, par exemple, est conducteur, et qu'on le touche ou qu'on le fasse communiquer avec le sol par des points différens de la surface de contact, son électricité $-e$ disparaît, et il rentre dans l'état naturel, sans que, pour cela, le corps A perde son excès $+e$; c'est ce que nous voyons tous les jours, lorsque nous frottons un corps isolé A sur un corps quelconque B non isolé. Or, il est tout simple que, dans cet état de choses, le frottement développe et maintienne sur A une quantité d'électricité plus grande qu'il ne faisait quand B était isolé. Car, dans ce premier cas, si A prenait $+e$, et B $-e$, il fallait, pour retenir $+e$, surmonter, outre sa force répulsive propre, son attraction pour $-e$: au lieu que cette dernière force n'existe plus quand $-e$ s'est écoulé dans le sol. Par une raison pareille, si un même corps A est successivement frotté contre deux corps conducteurs isolés B et B', tous deux de même nature, et offrant une même qualité de surface, mais inégaux en volume, celui qui sera le plus considérable donnera plus d'électricité à A; car l'électricité dégagée, qui se fixera sur B ou sur B', devant se répandre sur toute la surface de ces corps, elle formera une couche plus mince, à quantité égale, sur celui dont le volume sera le plus grand; et ainsi la force répulsive propre de cette électricité, à la surface de contact, sera moindre sur ce corps que sur l'autre: d'où il suit qu'elle pourra y être maintenu en quantité plus considérable dans l'état de séparation..

Outre ces conditions générales, le frottement du plateau de la machine électrique contre les coussins isolés présente, dans sa marche révolutive, une particularité qui contribue encore à rendre les effets obtenus dans cette circonstance beaucoup plus faibles que lorsque les coussins communiquent avec le sol. Cette particularité consiste en ce que les différentes parties du plateau qui viennent se présenter successivement au frottoir, à mesure que le mouvement de rotation les ramène, ont passé préalablement devant l'extrémité du premier conducteur, qui leur a enlevé entièrement, ou presque entièrement, l'électricité vitrée qu'elles avaient acquise, de sorte qu'elles se trouvent à très-peu de chose près dans l'état naturel, quand elles viennent se replacer entre les coussins. Ces diverses parties représentent donc autant de corps isolés A , tous de même nature, et dans l'état naturel, que l'on froterait successivement contre un même corps isolé B . Or, quand la répétition de ce frottement aura développé dans B le maximum d'électricité — e , qui peut y être maintenu dans le contact de A , malgré la force répulsive que cette électricité possède, il est clair que de nouvelles frictions opérées par d'autres corps A de même nature ne pourront opérer dans B aucun nouveau développement d'électricité. Car, si une nouvelle quantité — e' se développait et se joignait à — e , la force répulsive exercée par la charge totale — $e - e'$ surmonterait la résistance qui s'oppose à sa propagation à travers la surface de contact; et ainsi les nouvelles quantités d'électricités décomposées se recomposeraient aussitôt. Tel doit être aussi le résultat de la friction continuée du plateau de la machine électrique sur les coussins, lorsqu'on les isole. Les parties du plateau qui se présentent les premières développent bientôt, dans les coussins, toute l'électricité qui peut y être maintenue sous l'influence de la friction; après quoi le contact des parties suivantes ne produit plus rien, et le développement d'électricité s'arrête, de sorte que le plateau n'offre plus rien à enlever au premier conducteur, quelque nombre de tours qu'on lui fasse faire : au lieu que, si les coussins communiquent au sol, et sont ainsi maintenus constamment dans l'état naturel, les parties du plateau qui reviennent

les frotter après avoir été déchargées par le premier conducteur, les retrouvent toujours, et se retrouvent elles-mêmes, dans les conditions du premier contact. Elles peuvent donc exciter de même, dans les coussins, la décomposition des électricités naturelles; se charger de la portion d'électricité vitrée nécessaire à l'équilibre dans cette circonstance; et venir de nouveau se décharger, en passant devant le premier conducteur, d'où cette électricité se répand dans les conducteurs secondaires, sur la surface desquels elle se distribue conformément aux lois de l'équilibre électrique; et ce développement continu d'électricité vitrée ne s'arrête que lorsque la quantité totale qui s'est ainsi répandue dans le système entier de tous les conducteurs, a acquis une force répulsive assez grande pour que le premier conducteur ne puisse plus rien enlever aux parties du plateau qui viennent s'offrir à lui, après avoir passé entre les coussins communiquant au sol. Alors on a beau faire tourner la machine, son effet n'augmente plus; ou du moins elle n'acquiert que ce qu'il faut pour remplacer la déperdition opérée par le contact de l'air sur toutes les surfaces électrisées du plateau et des conducteurs.

Cette analyse exacte des phénomènes nous indique plusieurs conditions utiles au perfectionnement de l'appareil.

1°. Il faut que les parties de la surface du verre, qui sont successivement frottées, arrivent devant le premier conducteur sans avoir perdu, que le moins possible, de l'électricité qu'elles ont acquise. Pour cela, on attache au frottoir des morceaux de taffetas gommé, qui s'étendent sur la surface du verre dans le sens du mouvement de rotation. Dès que le verre s'électrise, ces taffetas adhèrent à sa surface, et la préservent du contact de l'air jusque dans le voisinage du premier conducteur.

2°. Il faut que le premier conducteur ait autant de branches qu'il y a de frottoirs, afin que les mêmes parties du verre n'entrent jamais sous un frottoir sans être déchargées. On emploie ordinairement deux frottoirs F, F', *fig.* 21, dont chacun enveloppe le plateau par ses deux surfaces. On les place aux deux extrémités opposées d'un même diamètre du

plateau ; et , pour établir sûrement leur communication avec le sol , on forme leur fond d'une plaque métallique sur laquelle on amène les deux extrémités de deux branches de métal AM , AM' , qui partent de l'axe de rotation AA' , pareillement métallique. Il ne reste plus qu'à faire communiquer celui-ci avec la terre ; pour cela , on y attache une chaîne qu'on laisse tomber sur le plancher de la chambre ; ou , ce qui est beaucoup meilleur , on le joint , par une corde métallique , avec un système de conducteurs qui va aboutir dans quelque conduite d'eau. On donne aussi au premier conducteur deux branches CB , CB' , dont les extrémités voisines du plateau sont armées de pointes pour soutirer plus aisément l'électricité développée sur chaque partie de sa surface , que le mouvement de rotation vient successivement leur présenter. Mais , quant aux extrémités opposées de ces branches , on se garde bien de les armer de pointes , qui dissiperaient rapidement dans l'air l'électricité que le conducteur aurait acquise ; et , au contraire , on les fait se rendre dans une grosse sphère. Toutefois , un conducteur aussi borné se chargerait bientôt à saturation avec une médiocre quantité d'électricité. C'est pourquoi on le fait communiquer avec un système de conducteurs isolés , formés de cylindres , longs et minces , suspendus parallèlement les uns aux autres , *fig. 22*. L'expérience et la théorie s'accordent à faire voir que , lorsque les longueurs et les diamètres de ces cylindres sont bien proportionnés , cette disposition est la plus favorable pour obtenir de fortes charges avec de faibles tensions. Cette disposition a même l'avantage que , lorsqu'on cesse de tourner le plateau ou le cylindre de verre , on peut supprimer la communication entre les conducteurs secondaires et le premier conducteur ; car , par ce moyen , on prévient l'écoulement de l'électricité accumulée qui s'échapperait rapidement par les pointes du premier conducteur , quand celle du plateau , qui ne serait plus renouvelée , cesserait de la refouler par sa répulsion.

Il est clair que ces changemens de communication ne doivent pas se faire par le contact direct d'un observateur communiquant au sol , mais par l'intermédiaire de tiges métalliques

attachées à des manches isolans que l'on tient à la main. Quand il ne s'agit que d'une communication momentanée, on donne ordinairement à ces tiges la forme de deux arcs circulaires AC, A'C, *fig.* 23, tournant à charnière autour d'un centre commun C, et munies chacune d'un manche isolant M, qui est ordinairement une tige de verre enduite de gomme-laque. On prend une de ces tiges avec la main gauche, l'autre avec la main droite; puis, ouvrant ou fermant l'angle qu'elles forment, on peut à volonté augmenter ou diminuer la distance AA' des deux extrémités de l'arc, et la proportionner à l'intervalle des conducteurs que l'on veut faire communiquer. Cet instrument s'appelle un *excitateur*, parce qu'en effet il sert à exciter des étincelles d'un conducteur sur un autre. On emploie aussi, comme moyen de communication, des chaînes et des cordons métalliques qu'on laisse pendre d'un conducteur sur un autre, et qu'on enlève aisément avec des tubes de verre, quand on veut détruire la communication.

Après avoir déterminé les formes les plus convenables pour toutes les parties d'une machine électrique, il ne me reste qu'à dire un mot de l'isolement. On conçoit que celui du premier conducteur et des conducteurs secondaires doit être le plus parfait possible, afin qu'ils conservent long-temps l'électricité qu'on leur communique. Pour cela, il faut, autant qu'il est possible, que les supports soient longs et minces. Ceux du premier conducteur sont ordinairement des colonnes de verre. Il faut qu'elles soient vernies en gomme-laque, parce que cette résine isole beaucoup mieux que le verre, et se charge moins d'humidité. Les conducteurs secondaires se suspendent avec des cordons de soie au plafond; il ne serait pas inutile que la partie supérieure de ces cordons fût terminée par un cylindre de gomme-laque. Du reste, on n'a qu'à appliquer ici les principes exposés dans le chapitre III.

Jusqu'ici nous avons supposé que les frottoirs communiquaient au sol, et que les conducteurs étaient isolés. Alors l'électricité acquise par les conducteurs est vitrée. Mais on peut aussi leur donner l'électricité résineuse. Pour cela, il faut rendre les branches CB, CB' du premier conducteur

mobiles autour de leur axe CC' , ainsi que les deux branches AM , AM' , qui font communiquer les frottoirs au sol. Veut-on changer la nature de l'électricité ? on tourne ces branches comme le représente la *fig. 24*, de manière que celles du premier conducteur, qui sont isolées, viennent toucher les plaques métalliques qui garnissent le fond des frottoirs et que celles qui communiquaient des frottoirs au sol, viennent se placer au-devant des surfaces frottées du plateau. Alors l'électricité vitrée acquise par le plateau lui est enlevée à mesure par les branches AM , AM' qui la déchargent dans le sol ; et, au contraire, le premier conducteur conserve toute l'électricité résineuse qui se développe sur les frottoirs. Dans cette expérience, il faut ôter les pointes dont les branches du premier conducteur sont armées, ou bien il faut qu'elles soient disposées de manière à se trouver alors en contact avec les frottoirs ; car, sans cela, elles détermineraient l'écoulement de l'électricité résineuse à mesure qu'elle se développerait. En outre, les supports qui soutiennent les coussins, et qui s'attachent ordinairement à la monture de la machine, doivent être, pour ce cas, faits avec des substances isolantes, et disposés de manière à produire l'isolement le plus parfait. Enfin, on sent que, pour avoir l'effet le plus complet, il est encore nécessaire de pouvoir, comme nous l'avons supposé, amener devant le plateau de verre les deux branches métalliques AM , AM' , qui communiquent au sol, afin de neutraliser toute l'électricité vitrée dont sa surface est couverte quand il sort du contact des frottoirs ; car, s'il gardait cette électricité, il ne s'en développerait plus de nouvelle lorsqu'il passerait une seconde fois entre les coussins, et la charge d'électricité résineuse que le conducteur pourrait acquérir serait beaucoup moindre.

CHAPITRE VIII.

Des Électroscopes.

LES *Électroscopes* sont, comme leur nom l'indique, des instrumens destinés à découvrir les plus petites quantités d'élec-

tricité. Nous avons déjà parlé, page 488, de celui de Coulomb, qui est une véritable balance électrique dont la suspension est formée par un fil de soie, tel qu'il sort du cocon. Tous les autres électroscopes sont fondés de même sur le principe général de la répulsion qui s'exerce entre des corps chargés d'électricités pareilles; et leur sensibilité plus ou moins grande dépend de la ténuité et de la liberté des corps que l'on emploie pour manifester cette répulsion. Ce sont ordinairement deux longs brins de paille, ou deux minces lames d'or battu, LL' , *fig. 25*, que l'on suspend parallèlement, et très-près l'un de l'autre, à deux petits anneaux métalliques $a a'$, formés de simples fils de métal, dont l'extrémité supérieure se rattache à une tige commune, pareillement métallique, terminée par un bouton arrondi. Au moyen de cette continuité de communications, toute quantité d'électricité donnée à la tige T se répand dans les fils de métal, et de là dans les pailles ou les lames, qui la manifestent aussitôt en s'écartant l'une de l'autre. Mais, puisque la portion qu'elles partagent ainsi est réellement la seule qui se manifeste, on conçoit que l'appareil sera un indicateur d'autant plus sensible que ces lames seront plus légères, leur suspension plus mobile, et que la tige T , qui sert uniquement pour leur communiquer l'électricité, en retiendra elle-même, sur sa surface, une moindre proportion. C'est pourquoi il faut que cette tige soit mince et son bouton fort petit, quoique cependant d'un volume beaucoup plus gros qu'elle. Pour éviter les mouvemens de l'air et les accidens qui pourraient briser les pailles, on enferme tout l'appareil dans un flacon de verre carré, *fig. 26*, dont on vernit le col à la gomme-laque, afin que l'isolement soit plus parfait. Le sommet de la tige seul sort du flacon, et on la tourne de manière que l'écartement des pailles se fasse parallèlement à une des faces sur laquelle on trace une petite division circulaire pour mesurer l'amplitude de l'écartement. Il est évident qu'une plus grande ou une moindre amplitude indiquera un degré d'électricité plus ou moins faible; mais, comme l'action de la pesanteur, pour ramener les pailles à la verticale, augmente à mesure qu'elles deviennent plus obliques, on

comprend facilement que la force répulsive qui les soutient n'est pas simplement proportionnelle à leur écart, et suit d'autres lois plus composées, dépendantes du poids des pailles et de leur figure ; de sorte que les parties de la division, supposées égales entre elles, ne représentent jamais des degrés égaux d'électricité. Ainsi, lorsqu'il s'agira de mesurer ces degrés, il faudra recourir à la balance de Coulomb ou à son électroscope, qui, seul, réunit le double avantage d'indiquer les plus petites forces électriques, et de les mesurer tout-à-la-fois.

On peut communiquer à toutes les espèces d'électroscopes l'électricité vitrée ou résineuse, en touchant le bouton extérieur de leur tige avec un conducteur isolé chargé de cette nature d'électricité. Mais on y parvient également par un autre moyen qu'il est très-utile de connaître, parce que, pour le mettre en pratique, il suffit d'avoir un tube de verre ou de cire d'Espagne, ou tout autre corps qui, frotté avec quelque étoffe, développe une espèce d'électricité connue.

Supposons, par exemple, que l'on se serve d'un bâton de cire d'Espagne, et que l'on opère sur l'électroscope de Coulomb, représenté *fig. 7*. Le cercle de clinquant C étant en contact avec la boule fixe A, on frotte le bâton de cire d'Espagne avec une peau de chat, et on le présente de loin au bouton extérieur B de la tige métallique AB ; aussitôt l'aiguille SC est chassée. La répulsion subsiste aussi long-temps que le bâton est tenu en présence. Si on l'approche davantage du bouton, l'aiguille est repoussée plus loin ; si on l'éloigne, elle se rapproche de la boule fixe ; si on l'ôte tout-à-fait, elle revient toucher cette boule, et reste en contact avec elle à son point de repos.

Tous ces phénomènes sont des résultats de l'influence à distance. L'électricité du bâton de cire d'Espagne est résineuse. Elle décompose les électricités combinées de la tige AB, et de la boule fixe A ; elle attire la vitrée dans le bouton extérieur, et repousse la résineuse dans la boule fixe, et dans le cercle de clinquant C qui la touche. Celui-ci s'éloigne donc de la boule, comme étant électrisé de la même manière. Approche-t-on le

bâton davantage, la décomposition des électricités combinées augmente; l'électricité résineuse de la boule fixe devient plus forte, le clinquant est donc repoussé plus loin. Le contraire arrive, si l'on éloigne le bâton de cire d'Espagne. L'enlèvement tout-à-fait, alors la tige et la boule fixe sont abandonnées à leurs propres forces, et leurs électricités décomposées se recomposent. Mais elles ne peuvent plus se neutraliser complètement, et l'électricité résineuse est trop faible de tout ce que le clinquant a emporté. La tige et la boule fixe demeurent donc chargées d'un petit excès d'électricité vitrée, correspondant à l'électricité résineuse du clinquant. Alors il doit y avoir attraction, et c'est seulement à l'époque du contact que la saturation s'achève.

Ceci bien entendu, rien n'est plus facile que de communiquer au clinquant et à la boule fixe un état d'électricité vitrée permanent.

Pour cela, touchez le bouton extérieur de la tige avec le doigt, et présentez à distance le bâton de cire d'Espagne; puis, retirez le doigt *d'abord*, et ensuite le bâton. Pendant le contact, l'influence du bâton de cire d'Espagne décompose une portion des électricités naturelles du doigt et de la tige. Cette influence chasse l'électricité résineuse dans le sol, par la route libre que le doigt lui présente; et elle retient la vitrée, qu'elle attire dans la partie la plus voisine du tube; de sorte que, si la tige est assez longue, le clinquant placé à l'autre bout ne part point. Quand vous retirez votre doigt, cette électricité vitrée ne peut plus s'échapper; et, lorsque vous enlevez ensuite le bâton, elle se trouve rester libre sur la surface de la tige et de la boule fixe; alors le clinquant part. On conçoit qu'il est essentiel de retirer le doigt avant le bâton de cire; car si l'on enlevait celui-ci d'abord, l'excès d'électricité vitrée s'enfuirait dans le sol; ou, ce qui revient au même, cet excès se neutraliserait aux dépens du sol, et tout rentrerait dans l'état naturel.

Voulez-vous avoir la preuve que cette électricité excédante est réellement vitrée? observez le mouvement du clinquant. Comme, d'après les dispositions que nous avons supposées,

il n'est parti qu'au moment où l'on a retiré le bâton de cire d'Espagne, il a la même électricité que la boule fixe. Approchez de nouveau la cire d'Espagne du bouton extérieur, plus que vous ne l'aviez fait dans la première expérience, elle y fera revenir l'électricité vitrée; et, produisant de plus une décomposition d'électricités naturelles, elle repoussera la résineuse dans la boule fixe; aussitôt vous verrez le clinquant revenir vers cette boule; et, si vous ne vous hâtez d'éloigner la cire d'Espagne, il arrivera jusqu'au contact. Ce rapprochement, sous l'influence de la cire d'Espagne, est le signe auquel on reconnaît tous les cas où le clinquant et la boule fixe sont l'un et l'autre chargés d'électricité vitrée. En opérant de même avec un tube de verre frotté par une peau de chat ou une étoffe de laine, vous communiquerez au clinquant et à la boule fixe l'électricité résineuse.

Mais on peut aussi produire le même effet avec la cire d'Espagne. Pour cela, ayez un petit tube de verre *tt*, *fig. 27*, l'extrémité duquel vous attacherez perpendiculairement, avec de la cire molle, un fil de métal *ff* de deux ou trois décimètres de longueur. Touchez le bouton extérieur de l'électroscope avec le fil isolé, en le plaçant de manière qu'il devienne, pour ainsi dire, le prolongement de la tige *AB*. Présentez alors, à quelque distance, le bâton de cire d'Espagne; puis retirez le fil auxiliaire d'abord, et ensuite le bâton: la tige et la boule fixe se trouveront chargées d'un excès d'électricité résineuse. Car, par la disposition de l'expérience, l'électricité vitrée qui s'est décomposée dans le système, a été presque toute attirée dans le fil auxiliaire *ff*, qui était le plus voisin de la cire d'Espagne. Aussi ce fil, quand on l'enlève, possède un excès d'électricité vitrée; d'où il suit que, par compensation, la tige et la boule fixe de l'électroscope, qui communiquaient avec lui, possèdent un excès d'électricité résineuse.

C'est en effet ce que l'on peut aisément vérifier d'après les mouvemens du clinquant. Car ici, quand on a enlevé le bâton de cire d'Espagne, il ne revient pas de lui-même vers la boule fixe, comme dans l'expérience précédente; au contraire, il en demeure éloigné, malgré la force de la torsion qui tendrait

à l'y faire revenir ; et il s'éloignera encore davantage , si vous présentez de loin le bâton de cire d'Espagne au bouton extérieur de l'électroscope , parce que l'influence de la cire augmente la quantité d'électricité résineuse accumulée dans la boule fixe. Cet écartement, sous l'influence de la cire d'Espagne, est le signe auquel on reconnaît tous les cas où le clinquant et la boule fixe sont chargés l'un et l'autre d'électricité résineuse. En opérant de même avec un tube de verre frotté par une étoffe de laine, on communiquerait à l'électroscope l'électricité vitrée.

On doit maintenant concevoir pourquoi il convient de donner au fil auxiliaire une longueur d'un ou deux décimètres ; c'est pour faciliter, dans cette longueur, la séparation des électricités combinées, et enlever l'une ou l'autre plus aisément ; par la même raison, il est utile de donner une longueur à-peu-près pareille à la tige métallique AB de l'électroscope. Mais il faut toujours la faire très-mince, et donner très-peu de volume aux boutons qui la terminent, afin que, la surface totale ayant peu d'étendue, de très-petites quantités d'électricités puissent y développer une force répulsive suffisante pour chasser le clinquant de l'aiguille mobile, ce qui est une des qualités les plus essentielles de l'appareil.

Les moyens que je viens d'expliquer pour communiquer à volonté l'électricité vitrée ou l'électricité résineuse, sont applicables à toutes les espèces d'électroscopes. Tout ce que nous avons dit pour le clinquant et la boule fixe, peut se dire des pailles ou des lames que la force répulsive écarte : c'est de même par influence qu'on y développe l'une ou l'autre électricité ; et, si elles sont déjà chargées, c'est aux mêmes signes qu'on reconnaît la nature de l'électricité qui produit leur divergence. Mais cette épreuve demande une précaution de plus que dans l'électroscope de Coulomb : c'est de n'approcher le corps électrisé que lentement, et de loin d'abord, comme si l'on voulait en quelque sorte pressentir la nature de l'électricité. Car, si les pailles ou les lames divergent, par exemple, par une électricité vitrée, et qu'on approche de la tige de l'électroscope un bâton de cire d'Espagne frotté sur une étoffe de

laine, outre l'action de cette cire pour attirer à elle l'excès d'électricité vitrée répandue sur la tige et les pailles, il s'opérera encore une décomposition d'électricités combinées; et l'électricité de même nom que celle de la cire d'Espagne, c'est-à-dire la résineuse, sera refoulée dans les pailles. S'il arrive qu'elle soit plus que suffisante pour saturer le peu d'électricité vitrée qui leur reste encore, elles divergeront de nouveau, mais résineusement; et l'alternative des deux répulsions pourra être quelquefois si rapide, qu'on n'apercevra pas le passage de l'une à l'autre. Alors on croira que la divergence primitive était due à une électricité résineuse; ce qui serait une erreur. Cela n'arrivera pas, si l'on approche lentement le bâton de cire d'Espagne, et l'on aura le temps d'observer d'abord l'affaiblissement de la première répulsion avant le développement de la seconde qui lui succède.

De tous les électroscopes, celui de Coulomb est le plus aisé à construire; c'est aussi le plus sensible, et celui qui conserve le mieux l'électricité qu'on lui a communiquée. Toutes ces qualités le rendent d'une utilité incomparable pour les recherches délicates; et j'aurai bientôt l'occasion d'en rapporter des exemples frappans.

CHAPITRE IX.

Des Électricités dissimulées.

MAINTENANT que nous nous sommes formé une théorie complète et sûre de l'action de l'électricité, nous comprendrons avec facilité le jeu de quelques instrumens qui la rendent plus énergique et plus durable, soit en attirant dans un seul point toute l'électricité d'un système de conducteurs, par l'influence d'une électricité de nature contraire, soit en employant l'influence permanente d'une même quantité d'électricité, pour déterminer successivement la séparation des électricités combinées de divers conducteurs présentés à distance. Nous n'aurons, pour ainsi dire, qu'à faire la description de ces appareils, leur théorie se présentera d'elle-même.

LE CONDENSATEUR.

Lorsqu'un conducteur *A*, isolé et dans l'état naturel, est mis en contact avec un système de conducteurs électrisés, ou avec une source permanente d'électricité, il acquiert une charge électrique déterminée; mais si l'on approche de lui un autre corps *B*, dans l'état naturel et communiquant librement avec le sol, la présence de ce corps le fait se charger beaucoup plus fortement. En effet, l'électricité dont *A* s'est d'abord couvert, agit sur les électricités combinées de *B*, à mesure qu'on l'approche; elle refoule l'électricité de même nom dans le sol, et attire celle de nom contraire, qui se fixe sur la surface de *B* la plus voisine de *A*. Mais, par cette attraction même, l'équilibre est rompu dans le système de conducteurs auquel *A* communique. Une nouvelle quantité de fluide libre se répand donc sur *A*, d'où résulte une nouvelle décomposition de fluide sur *B*, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le fluide accumulé sur *A* se trouve en équilibre entre la répulsion qu'il exerce sur lui-même et l'attraction du fluide de *B* pour le retenir.

Tous ces phénomènes, que la théorie indique, sont parfaitement confirmés par l'expérience.

On communique aux grands conducteurs de la machine une faible électricité; après quoi prenant un plateau métallique *A*, *fig. 28*, que l'on tient isolé et suspendu par son crochet *C*, au moyen d'un tube de verre *M*, on fait toucher ce crochet aux conducteurs. Le plateau prend ainsi une petite quantité d'électricité qui, lorsqu'on l'a éloigné du conducteur, peut donner un certain degré de divergence aux boules de sureau d'un électroscope isolé, formé par deux fils de lin suspendus à une tige de cuivre.

Après cette opération, les conducteurs ont perdu une si petite quantité d'électricité, qu'on peut les regarder comme presque aussi chargés qu'auparavant; on recommence à les toucher de la même manière, mais en tenant au-dessous du plateau isolé *A* un autre plateau *B* communiquant au réservoir commun, *fig. 29*. On maintient la présence de *B* jusqu'à ce que le premier plateau *A* soit séparé des conducteurs; de cette

manière, il prend une quantité d'électricité beaucoup plus considérable que la première fois, comme on peut s'en assurer en le présentant de nouveau à l'électroscope. Il est évident qu'il faut retirer A du contact sous l'influence de B; car si l'on retirait B d'abord, le fluide accumulé dans A retournerait aussitôt dans le système des conducteurs, conformément aux lois de son premier équilibre.

Si vous répétez cette expérience en tenant d'abord le plateau B très-éloigné de A, ensuite un peu plus près, et enfin très-voisin, vous trouverez que la charge de A augmente de plus en plus. Cela est en effet conforme à la théorie; car l'attraction réciproque de l'électricité de B et de A doit augmenter à mesure que leur distance devient moindre; le maximum de charge correspondrait donc au cas où la distance des deux plateaux serait tout-à-fait nulle. Mais, comme on ne pourrait arriver à cette distance sans exciter une étincelle à travers l'air qui les sépare, on interpose entre eux un corps très-mince et difficilement perméable à l'électricité, par exemple, une plaque de verre, un morceau de taffetas verni ou une mince couche de résine. Avec cette précaution l'on peut diminuer presque à volonté la distance des deux plateaux. Les instrumens construits de cette manière s'appellent des *condensateurs*.

Le condensateur à plaque de verre est sujet à se charger d'humidité, qui adhère facilement au verre et détruit la perfection de l'isolement: le condensateur de taffetas n'est pas comparable à lui-même, parce que la pression plus ou moins forte des plateaux sur le taffetas peut faire varier leur distance, et par suite l'intensité de la condensation. Le meilleur de tous est celui où la séparation se fait par une simple couche de vernis résineux appliquée séparément sur chaque plateau. Il faut seulement avoir l'attention de poser les plateaux l'un sur l'autre sans les froter; car le frottement développerait dans la couche de résine de l'électricité qui adhérerait très-fortement à sa surface, et qui pourrait ensuite occasionner des erreurs dans les expériences délicates. Pour rendre l'usage de ces instrumens commode, on donne au plateau B un pied solide

en métal, et l'on adapte sur la surface supérieure de A un manche isolant M, de verre verni. Tout l'appareil est représenté *fig. 30*. Quand on veut s'en servir, on pose les plateaux l'un sur l'autre; on touche l'inférieur B pour le faire communiquer avec le sol; puis on touche les corps électrisés avec le bouton *a* d'un fil métallique attaché fixement au plateau supérieur A, que l'on nomme le plateau *collecteur*, parce qu'en effet c'est lui qui prend l'électricité des corps auxquels on l'applique. Après le contact, on pose le pied du condensateur sur une table solide; puis, tandis qu'on l'y retient fixement pressé, on enlève le plateau collecteur par le manche isolant M, et l'on éprouve l'électricité dont il s'est chargé. Il faut avoir soin de séparer ainsi les plateaux perpendiculairement à leur place; car, si on les séparait obliquement, l'électricité du plateau collecteur se porterait vers le rebord du plateau le plus voisin de B, et son accumulation pourrait y produire une étincelle qui percerait la couche de vernis et déchargerait subitement le condensateur. C'est pour cela que le pied de l'instrument doit être maintenu bien fixe pendant qu'on enlève le plateau collecteur; car l'adhérence des deux plateaux tend à les faire glisser l'un sur l'autre obliquement. Il faut encore ne pas charger ces instrumens d'électricité au-delà du degré de résistance que peut offrir la double couche isolante qui sépare leurs plateaux; car si cette résistance peut être vaincue, les deux électricités accumulées percent la couche et se rejoignent par explosion, comme elles feraient à travers l'air. C'est ce qui arrive très-aisément au condensateur à plateaux vernis, et par cette raison, il faut le réserver pour les quantités d'électricités très-faibles. Quand la charge doit être forte, il faut employer le condensateur à lame de verre. Mais alors, si les plateaux ne sont pas fortement vernis, la plus grande partie de l'électricité accumulée se répand sur le verre et s'y attache, de sorte qu'elle ne suit plus le plateau collecteur quand on l'enlève. On peut remédier à cet inconvénient en appliquant à la surface de chaque plateau un disque de verre mince que l'on y fixe, et qui empêche l'électricité de quitter cette surface. Mais, pour que ce système garde de fortes charges, il faut pré-

venir les explosions latérales en donnant aux disques de verre un diamètre plus grand que celui des plateaux, et recouvrant la portion excédante de leur surface avec une forte couche d'un vernis très-isolant (1).

Lorsqu'un pareil condensateur communique avec une machine électrique par une de ses faces métalliques, l'autre communiquant au sol, celle-ci se trouve réellement dans le même état que si on eût pu l'approcher, sans explosion, extrêmement près d'un conducteur très-fortement chargé : la réunion de ces circonstances est donc éminemment propre à produire une décharge énergique. Aussi, lorsque l'on prend d'une main le pied du condensateur, ce qui fait que l'on partage son état électrique, et que de l'autre on touche le plateau collecteur, les électricités accumulées se déchargent et se rejoignent avec beaucoup de force à travers le corps, ce qui produit dans tous les organes une secousse d'autant plus énergique, que le condensateur est plus grand, sa charge plus forte et ses plateaux plus rapprochés. Cette commotion se transmet en s'affaiblissant à travers une chaîne formée par plusieurs personnes qui se tiennent par la main; et son affaiblissement tient sans doute à la résistance qu'opposent au passage des fluides électriques ces corps qui ne sont pas des conducteurs parfaits.

Tout le jeu des condensateurs peut se calculer par le principe suivant, qui indique à-la-fois le mode et les bornes de l'accumulation qu'ils produisent. L'électricité A introduite dans le plateau collecteur, neutralise à distance une portion — B d'électricité contraire sur le plateau inférieur qui communique au sol, et elle l'empêche de s'échapper. Celle-

(1) On obtient très-facilement un vernis de ce genre en faisant dissoudre de la cire d'Espagne dans de l'alcool. Pour cela, il faut la pulvériser et la laisser dans l'alcool pendant quelques jours. On accélère l'opération si l'on chauffe l'alcool. Quand on veut employer cette dissolution, on chauffe légèrement le verre ou, en général, la substance sur laquelle on veut l'appliquer, on l'y étend avec un pinceau. L'action de l'air enlève l'alcool et laisse la couche de cire d'Espagne. Par-dessus celle-ci, on en peut mettre une seconde, une troisième, et ainsi de suite. On obtient un vernis plus isolant encore en dissolvant de la gomme-laque au lieu de résine.

ci, à son tour, fixe de même une portion A' de l'électricité du plateau collecteur, et lui ôte sa force expansive. Le plateau collecteur se trouve donc exactement dans le même cas que s'il avait seulement $A - A'$ d'électricité libre; en conséquence il doit continuer à se charger, jusqu'à ce que cette quantité égale celle qu'il aurait prise immédiatement aux conducteurs auxquels il communique, s'il eût été mis seul en contact avec eux, sans l'influence du plateau inférieur. Le rapport de A à $-B$ et de $-B$ à A' dépend de la distance plus ou moins considérable qui existe entre les plateaux. Mais, dans tous les cas, $-B$ doit être plus faible que A , abstraction faite du signe, en sorte que si A est vitrée et B résineuse, ces deux quantités mises en contact devront donner un résidu vitré. Car l'attraction des molécules de $+A$ sur $-B$ doit être moindre, à distance, qu'elle ne serait au contact; puis donc qu'à travers la couche isolante elles neutralisent $-B$ et lui ôtent sa force expansive naturelle, il faut qu'elles compensent par leur nombre l'affaiblissement de leur action. En conséquence, nous devons toujours nous représenter B comme une fraction de A . Pour fixer les idées, supposons-le, par exemple $\frac{99}{100}$ de A ; et suivons les conséquences de cette détermination.

De même que $+A$ neutralise $-B$ à travers l'épaisseur de la couche isolante, de même il y a dans A la portion A' que $-B$ neutralise; et le mode d'action étant exactement le même, la proportion de saturation devra être la même aussi, c'est-à-dire $\frac{99}{100}$. Ainsi A' sera $\frac{99}{100}$ de B ; et, comme B lui-même est $\frac{99}{100}$ de A , il s'ensuit que A' sera $\frac{99}{100} \cdot \frac{99}{100}$ de A ou $\frac{9801}{10000}$ A . L'excès de A sur A' , qui exprime la portion d'électricité demeurée libre sur le plateau collecteur, sera donc $A - \frac{9801}{10000} A$ ou $\frac{1999}{10000} A$; fraction presque exactement égale à $\frac{1}{50} A$; ainsi ce plateau devra continuer à acquérir de l'électricité jusqu'à ce que le cinquantième de sa charge égale la quantité qu'il prendrait naturellement aux mêmes conducteurs, si on le leur présentait seul, et sans l'influence du plateau inférieur. Sa charge, sous cette influence, sera donc cinquante fois plus grande que dans l'état de séparation.

Le mode de raisonnement dont nous venons de faire usage

montre qu'en général la force condensante de l'instrument dépend de la fraction qui exprime le rapport de saturation à distance entre ses deux surfaces. Plus cette fraction approchera de l'unité, plus les quantités d'électricité qui peuvent se neutraliser à travers la couche isolante approcheront d'être égales entre elles, et moindre sera l'excès d'électricité qui reste libre sur le plateau collecteur. Le rapport de cet excès à la charge totale pourra toujours se calculer comme dans l'exemple précédent; et, en le renversant, on aura la mesure de la condensation.

Ceci suppose que l'on connaît la valeur de la fraction qui exprime le rapport de saturation à distance entre les deux plateaux. C'est à quoi l'on peut parvenir par l'expérience. Pour cela, on isolera l'instrument et l'on chargera son plateau collecteur d'une quantité d'électricité quelconque, le plateau inférieur communiquant au sol. Cela fait, on rompra cette communication; et, les deux plateaux étant redevenus isolés, on les séparera bien parallèlement l'un à l'autre avec leurs couches isolantes, en les tenant par leurs manches de verre; puis on portera le plan d'épreuve sur chacun d'eux en un point semblablement situé, par exemple, sur leur circonférence; et l'on mesurera à la balance de torsion les charges que ce plan aura acquises dans l'un et l'autre cas. Elles seront proportionnelles aux épaisseurs des couches électriques dans les points de contact, et par conséquent aux quantités totales d'électricités des deux plateaux, puisque ceux-ci sont supposés égaux en grandeur, et que les points de contact sont semblablement situés. Ainsi, la charge prise par le plan d'épreuve sur le plateau collecteur représentant *A*, celle qu'il aura prise sur le plateau inférieur représentera — *B*; et le rapport de celle-ci à la première sera la fraction qui exprime la proportion de saturation; d'où l'on pourra ensuite, par le calcul, conclure la mesure de la force condensante. Cette méthode est plus sûre que de chercher à déterminer directement la proportion de condensation, comme il semble qu'on pourrait le faire en comparant, par le plan d'épreuve, la charge que le plateau collecteur reçoit d'un même système de conducteurs lorsqu'il

est seul et lorsqu'il est sous l'influence de l'autre plateau. Car, pour que cette comparaison fût exacte, il faudrait que, dans les deux cas, les conducteurs fussent chargés exactement au même degré; et cette égalité est une chose dont on ne peut jamais répondre.

La force condensante étant déterminée, l'effet absolu d'un condensateur dépend encore de la quantité absolue d'électricité que le plateau collecteur prendrait aux conducteurs électrisés qui le chargent, s'il était mis seul en contact avec eux. Or, toutes choses d'ailleurs égales, cette quantité doit augmenter avec la surface du plateau collecteur. Ainsi les condensateurs d'un grand diamètre accumuleront plus d'électricité que ceux d'un diamètre moindre, et devront, par leur décharge, donner de plus grands chocs; c'est ce que l'expérience confirme.

Ces neutralisations réciproques, dont nous venons de faire usage pour établir nos calculs, peuvent être rendues sensibles par l'expérience suivante. Après avoir chargé un condensateur à lame de verre, le plateau inférieur communiquant au sol, isolez tout l'appareil, et touchez d'abord le plateau inférieur : vous n'en tirerez pas d'électricité; par conséquent toute celle qui y existe est dissimulée. Touchez alors le plateau supérieur, il vous donnera une étincelle; mais pour cela toute son électricité ne partira pas, il en conservera encore une portion considérable. Cette portion était donc aussi dissimulée à son tour. Pour la rendre sensible, touchez de nouveau le plateau inférieur. Cette fois il vous donnera une étincelle; car son électricité n'est plus toute entière dissimulée, depuis que vous avez enlevé une partie de celle qui la retenait à distance. Mais, par ce nouveau contact, une nouvelle portion de celle-ci est devenue libre; le plateau collecteur vous donnera donc encore une étincelle, et ainsi de suite jusqu'à ce que les deux plateaux soient complètement déchargés. Il est facile de déterminer la loi de cette progression par le calcul, d'après la proportion constante de saturation à distance d'un plateau à l'autre. On trouve ainsi que le premier contact enlève plus d'électricité que le second; celui-ci plus que le troisième, et ainsi de suite; de telle sorte que les quantités ainsi enlevées suivent une pro-

gression géométrique décroissante, dont la raison est le rapport de saturation.

Lorsque l'on touche à-la-fois les deux plateaux, toutes les quantités d'électricités qui se seraient échappées de l'une et l'autre face dans les contacts successifs, se transmettent simultanément à travers les organes, et ce seul coup décharge complètement le condensateur.

J'ai annoncé plus haut que, dans le condensateur à lame de verre et à plateaux nus, la plus grande partie des électricités accumulées n'adhère point à la surface des plateaux, mais s'attache aux deux faces opposées de la lame de verre. Alors les deux plateaux n'ont proprement d'autre effet que d'établir une communication libre entre les différens points de chacune des deux faces de cette lame, afin que l'électricité puisse facilement s'y étendre, et s'échapper de même, au moment de la décharge, de tous leurs points à-la-fois. Ce résultat peut être aisément vérifié par l'expérience; pour cela, après avoir chargé un pareil condensateur, placez-le sur un isoloir; puis, enlevez avec la main le plateau supérieur par son manche isolant, et touchez-le : vous n'en recevrez qu'une petite étincelle, et la force expansive passera du côté de l'autre plateau. Cela fait, enlevez aussi la lame de verre, en la prenant par un de ses angles, et touchez le plateau inférieur; il vous donnera à son tour une étincelle, mais pareillement fort petite. Il faut donc que les électricités accumulées soient restées attachées aux deux faces de la plaque de verre; et en effet, si vous la replacez de nouveau entre les deux plateaux isolés, sans leur communiquer, non plus qu'à elle, aucune quantité d'électricité nouvelle, le condensateur se trouvera rechargé de lui-même presque aussi fortement que la première fois. Ou bien encore, sans remettre la lame de verre entre les deux plateaux, appliquez directement vos mains sur ses deux faces, de manière à les toucher à-la-fois l'une et l'autre par un grand nombre de points; vous éprouverez une décharge, comme si la lame avait été recouverte de ses plateaux, parce que l'étendue du contact de vos mains permet à un grand nombre de points des deux surfaces de se décharger à-la-fois. Mais si, au lieu de toucher les faces

de la lame avec les mains étendues, vous vous bornez à y promener l'extrémité des doigts, vous sentirez seulement un pétitement et une décharge locale dans les points que vous toucherez; toutefois il ne s'opérera pas de décharge générale, et ainsi vous ne serez pas exposé à de fortes commotions.

Æpinus, à qui l'on doit réellement l'invention du condensateur, a fait une expérience en quelque sorte inverse de la précédente, et qui montre, de la manière la plus sensible, quel est précisément l'emploi de la couche isolante interposée entre les deux plateaux. Il a employé pour plateaux deux grandes plaques circulaires de bois revêtues de feuilles d'étain; et, les ayant approchées parallèlement l'une de l'autre sans autre intermédiaire que la couche d'air qui les séparait, il a fait communiquer le plateau supérieur aux conducteurs d'une machine électrique, l'inférieur communiquant avec le sol. Cet appareil était, comme on voit, un véritable condensateur à lame d'air; aussi s'est-il chargé comme un condensateur se charge, et a-t-il donné de même la commotion, lorsque, touchant d'une main le plateau inférieur, on a touché de l'autre le plateau supérieur. Pour obtenir de grands effets de cet appareil, il faut employer de larges plaques; car, comme on est obligé de les tenir à une assez grande distance pour qu'il ne s'échappe pas directement d'étincelle entre elles à travers l'air, il faut que l'étendue de leurs surfaces compense la faiblesse de la force condensatrice. D'ailleurs, cette largeur paraît être aussi une cause qui retarde l'étincelle, quand les plateaux sont approchés l'un de l'autre parallèlement. C'est en quelque sorte le contraire de l'effet des pointes. La seule différence qu'il y ait entre cet appareil et le condensateur ordinaire, c'est que les surfaces de la couche isolante n'ont d'existence réelle que lorsque les deux plateaux sont en présence, puisqu'elles ne sont autre chose que les limites aériennes des surfaces par lesquelles les plateaux se regardent mutuellement.

Quoique Æpinus eût, ainsi que nous l'avons dit, réellement découvert le condensateur, et qu'il en eût donné la véritable théorie, comme on peut le voir dans son ouvrage, on doit à Volta d'en avoir, pour ainsi dire, créé l'utilité, en le joignant

à l'électroscope , pour découvrir et rendre sensibles les causes d'électricité les plus faibles.

En effet , dans les recherches de physique , on rencontre souvent des causes d'électricité qui ne peuvent produire qu'une force répulsive très-faible , et qui s'arrêtent lorsqu'elles ont atteint cette limite , mais qui , lorsqu'on a détruit l'électricité qu'elles ont produite , la développent de nouveau. Nous en verrons bientôt plusieurs exemples. Or , supposons que l'on fasse communiquer une de ces sources constantes avec le plateau collecteur d'un condensateur dont la couche isolante soit excessivement mince , telle , par exemple , qu'une simple couche de vernis résineux ; il est clair que l'électricité de la source ira s'accumuler dans le condensateur jusqu'à ce que la quantité non dissimulée soit égale à celle que le plateau collecteur recevrait directement de la source même. Désignons cette quantité par E . Quand on aura atteint cette limite , si l'on sépare le condensateur de la source , et qu'on enlève son plateau collecteur , sa charge se trouvera égale à la quantité E multipliée par la force condensante. Elle pourra donc devenir sensible , quelle que soit la faiblesse de E , si le rapport de saturation est une fraction très-peu différente de l'unité , c'est-à-dire si la distance des plateaux du condensateur est extrêmement petite , condition que la couche de vernis résineux remplit parfaitement.

Pour unir les indications de cet instrument à celles de l'électroscope de paille dont Volta se sert communément comme étant le plus portatif et le plus commode , on dévisse le bouton supérieur de la tige , et on le remplace par le plateau inférieur du condensateur , *fig.* 31. Ce plateau se trouve alors isolé par les parois de verre de l'électroscope. On le fait communiquer directement par un fil métallique à la source constante d'électricité , et l'on touche seulement le plateau supérieur pour le faire communiquer au sol. Dans cette disposition , c'est le plateau inférieur qui accumule l'électricité. Quand on pense qu'il est chargé suffisamment , on le sépare de la source constante sans le toucher , et en se servant pour cela d'une tige isolante ; puis on enlève le plateau supérieur

par son manche isolant ; et l'électricité du plateau inférieur devenant libre, manifeste sa force répulsive par la divergence qu'elle donne aux pailles. Il est facile ensuite de déterminer sa nature par les épreuves ordinaires. Il est quelquefois plus commode de faire communiquer la source constante avec le plateau supérieur du condensateur ; alors on touche celui qui communique aux pailles. Lorsque l'appareil est chargé, on cesse de le toucher ; on le sépare de la source, et l'on enlève le plateau supérieur qui emporte l'électricité qu'il avait acquise. Alors le plateau inférieur qui se trouve isolé, garde l'électricité contraire, et la manifeste dans les pailles. Sa charge est ainsi un peu moindre que celle du plateau collecteur, dans la première méthode, puisque le rapport de saturation à distance est toujours fractionnaire. Mais la différence sera insensible si, comme nous le supposons, la couche est très-mince, parce que ce rapport doit être alors excessivement peu différent de l'unité. Il faut seulement ne pas oublier que cette électricité est de nature opposée à celle de la source.

Il est clair que l'on pourrait également appliquer le condensateur à l'électroscope de Coulomb ; comme la méthode est exactement la même, il est inutile de nous y arrêter.

DE L'ÉLECTROPHORE.

Lorsqu'un corps est électrisé et isolé, si l'on approche de lui un autre corps non isolé, celui-ci prendra l'électricité contraire ; et, si on l'isole subitement, on le trouvera chargé de cette électricité. Ceci a été prouvé plusieurs fois dans les chapitres précédens, et peut l'être encore de diverses manières.

On charge les conducteurs de la machine d'une certaine quantité d'électricité, et l'on en approche à distance un disque métallique soutenu par une tige de verre. Si l'on retire ce disque sans l'avoir touché on le trouvera dans l'état naturel ; mais si on le touche tandis qu'il est en présence des conducteurs, et qu'on le retire ensuite, après avoir cessé de le toucher, on le trouvera chargé d'une électricité contraire à celle du conducteur.

On prend un disque métallique porté sur un pied, on l'isole et on lui donne une étincelle ; après quoi on s'en sert comme dans l'expérience précédente, pour charger un autre disque métallique que l'on en approche à distance, en le touchant d'abord et l'isolant après. Ce phénomène se renouvelle aussi long-temps que l'électricité du disque isolé n'a pas été entièrement enlevée par le contact de l'air.

Pour savoir ce que l'électricité de ce disque éprouve pendant qu'elle agit ainsi par influence, il n'y a qu'à faire communiquer la surface inférieure du disque avec un électroscope à fils, isolé comme lui ; à l'instant les fils divergent. Mais, à mesure qu'on approche le disque non isolé, leur divergence diminue. Enfin elle devient sensiblement nulle, et l'électricité qui les animait paraît détruite. Mais elle n'est réellement que dissimulée ; car, dès qu'on éloigne le disque qui communique avec le sol, les fils recommencent à diverger de nouveau aussi fortement que la première fois.

La décomposition des électricités naturelles du corps que l'on approche, par conséquent la quantité d'électricité dont il se charge, augmente à mesure que sa distance au corps électrisé diminue ; elle serait au plus haut degré d'intensité, si cette distance était nulle. Mais on ne pourrait pas la diminuer indéfiniment sans déterminer une étincelle entre les deux corps. C'est pourquoi on interpose entre eux une lame mince formée de quelque substance imperméable à l'électricité ; par exemple, une plaque de verre ou une couche de résine.

Pour montrer l'application de cette méthode, on isole un disque métallique tel que le plateau inférieur d'un condensateur ; on le recouvre d'une lame de verre, et on lui donne une étincelle. On pose ensuite sur cette plaque l'autre plateau qui est muni d'une tige isolante ; on le touche un instant à sa surface supérieure ; puis on cesse le contact ; et, l'enlevant ensuite par sa tige, on le trouve chargé d'une électricité contraire à celle du disque isolé. On peut répéter cette expérience autant de fois que l'on voudra ; c'est pourquoi les appareils de ce genre ont reçu le nom d'*électrophores*, qui veut dire porteur d'électricité.

On voit que le condensateur et l'électrophore sont fondés tous deux sur l'action électrique exercée à distance. Mais, dans le condensateur, on emploie la présence d'un corps non isolé pour augmenter la charge d'un corps isolé ; au lieu que dans l'électrophore, c'est le corps isolé et électrisé qui détermine cette accumulation.

On peut construire des électrophores dans lesquels l'épaisseur de la couche isolante soit tout-à-fait insensible. Pour cela, il n'y a qu'à employer comme plateau inférieur une lame de verre ou une couche de résine électrisée par le frottement. Ces substances retenant fortement l'électricité, on peut poser le disque supérieur immédiatement sur leur surface, sans qu'elles lui en abandonnent une quantité notable ; tandis que leur influence, pour décomposer les électricités naturelles de ce disque, s'exercera très-énergiquement. Aussi les électrophores les plus usités sont construits de cette manière avec un gâteau de résine coulé dans une enveloppe de métal, *fig. 32*. On électrise la surface de ce gâteau en le frappant avec une peau de chat bien sèche. Alors il prend l'électricité résineuse ; et son influence fixe, dans le plateau supérieur, l'électricité vitrée. Cet appareil est d'une application fréquente dans les recherches de chimie où l'on a souvent besoin d'électricité. On peut aussi en tirer plusieurs confirmations frappantes de la théorie que j'ai exposée dans le *Traité général*.

Lorsque le plateau supérieur est chargé et posé sur la résine, l'électricité vitrée qui réside sur sa surface inférieure, et l'électricité contraire développée sur la résine, se neutralisent mutuellement, et n'ont, ni l'une ni l'autre, aucune tendance à s'échapper. Conséquemment, elles ne peuvent pas être enlevées par le contact de l'air, qui d'ailleurs éprouve de la difficulté à s'insinuer entre les surfaces où elles reposent. Un appareil ainsi chargé doit donc conserver très-long-temps ses deux électricités ; aussi durent-elles des mois entiers, si l'électrophore n'est pas placé dans un lieu humide.

Cependant l'attraction permanente des deux électricités opposées doit, peu-à-peu, vaincre la résistance que la résine oppose

au dégagement du fluide résineux qu'elle possède, et à l'introduction du fluide vitré du plateau. C'est probablement là l'unique cause qui fait qu'après un temps plus ou moins long, les électrophores se trouvent enfin déchargés, et leurs diverses parties ramenées à l'état naturel.

On peut accélérer les effets de cette attraction réciproque en augmentant beaucoup son énergie. Pour cela, lorsque l'électrophore est chargé, enlevez le plateau métallique et posez-le de nouveau sur la résine, non plus parallèlement à son plan, et dans le sens de sa surface, mais obliquement et par sa circonférence. Alors son électricité vitrée, s'accumulant presque toute entière dans la partie de son contour qui touche la résine, prendra une force répulsive beaucoup plus grande. Elle sortira du plateau, neutralisera complètement l'électricité résineuse des endroits vers lesquels elle s'élance; et, après quelques contacts ainsi répétés sur diverses parties du gâteau de résine, celui-ci se trouvera tout-à-fait déchargé.

De là on peut déduire une expérience assez curieuse. Au lieu de reporter sur la résine l'électricité vitrée qu'elle a développée dans le plateau par son influence, portez-la de même sur un autre gâteau, qui soit dans l'état naturel. Elle s'attachera pareillement à la surface de cette résine, qui se trouvera ainsi électrisée vitreusement, et deviendra capable, à son tour, de développer par son influence l'électricité résineuse. Lorsque le second gâteau sera ainsi chargé, posez un plateau métallique sur sa surface; vous aurez un électrophore d'électricité contraire au premier. Vous vous servirez de celui-ci pour charger de même la surface d'un troisième gâteau qui prendra l'électricité résineuse. Enfin, vous pourrez étendre ces alternatives à un nombre quelconque de gâteaux qui se trouveront tour-à-tour électrisés vitreusement et résineusement.

On peut même, par ce procédé, électriser la surface de chaque gâteau uniquement dans certaines parties déterminées. Pour cela, il suffit d'adapter au plateau qui apporte l'électricité, une tige et un bouton métallique pareils à celui du plateau collecteur du condensateur. Alors, si l'on touche la

résine avec ce bouton , l'électricité se portera toute entière au point de contact. On peut donc , en choisissant ces points à la suite les uns des autres , tracer ainsi des contours déterminés.

Si l'on veut rendre ces contours visibles , il n'y a qu'à répandre sur la surface de la résine quelque poudre légère formée d'une substance non conductrice , par exemple , de la poussière de résine ou de soufre. Les petites particules qui composent ces poussières s'attachent uniquement aux endroits électrisés ; de sorte qu'en renversant le gâteau , toutes celles qui ne répondent pas à ces parties tombent par leur propre poids , et il ne reste que ce qui s'est attaché aux contours électrisés. On remarque que les petites particules de poussière affectent des arrangemens réguliers et différens , suivant la nature de l'électricité qui les attache ; de sorte qu'en formant des traces avec les deux électricités sur diverses parties du même gâteau , on obtient à-la-fois les deux sortes de figures qui en résultent. Cette curieuse observation est due à Lichtemberg , physicien allemand ; aussi les figures tracées de cette manière s'appellent-elles des figures de Lichtemberg.

Pour rendre ces phénomènes plus sensibles , on emploie un mélange de soufre et de minium triturés ensemble. Le frottement , produit par la trituration , électrise le soufre vitreusement , et le minium résineusement. On met cette poudre dans une espèce de soufflet qui sert à la projeter sur le gâteau de résine électrisé. Alors , en s'y attachant , les deux substances se séparent et se distinguent à-la-fois par leur arrangement et par leur couleur ; le soufre est jaune , et le minium est rouge.

Dans les premiers temps de cette découverte , il y eut des physiciens allemands qui remarquèrent que la poudre de résine , ainsi répandue sur un gâteau électrisé , éprouvait peu-à-peu des mouvemens progressifs , qui n'avaient toutefois rien de régulier. On se hâta de bâtir sur cela un système. Mais des observateurs plus attentifs reconnurent que ces mouvemens étaient produits par de très-petits insectes que l'on appelle des *acarus* , qui se trouvaient dans la poudre de résine et qui se promenaient sur la surface électrisée.

LA BOUTEILLE DE LEYDE.

Dans les deux paragraphes précédens, nous avons examiné les phénomènes que produisent les deux électricités vitrée et résineuse, lorsqu'elles sont dissimulées l'une par l'autre, en vertu de leur action à distance. Nous avons vu que, lorsqu'elles sont dans cet état, si on leur présente des corps conducteurs qui communiquent de l'une à l'autre, elles s'y précipitent avec force, se rejoignent et retournent ainsi à leur état naturel de combinaison.

Les expériences que nous allons parcourir tiennent encore au même genre d'action, et s'expliquent exactement par les mêmes principes; mais elles sont intéressantes à examiner, parce qu'elles fournissent des moyens puissans d'accumuler la force électrique, et qu'elles donnent naissance à une foule de phénomènes qui exigent cette accumulation.

On tient à la main un vase de verre en partie rempli d'eau. On y plonge un conducteur métallique communiquant à la machine. Après quelques tours de plateau, si l'on essaye d'ôter le conducteur d'une main en tenant toujours le vase de l'autre, on reçoit une commotion d'autant plus énergique, que le vase est plus grand, la machine plus forte, et qu'on l'a fait agir plus long-temps.

Cette expérience, bien antérieure au condensateur, à l'électrophore, et à toute théorie de l'électricité, est due au hasard, mais à *un hasard observé*. Elle fut faite d'abord à Leyde, par Cunéus et Muschenbroeck. Le résultat fut pour eux un sujet de surprise, et même d'épouvante. Tous les physiciens la répétèrent; et, bientôt familiarisés avec le phénomène qui les avait effrayés d'abord, ils cherchèrent les conditions d'appareil les plus propres à les reproduire. Ils reconnurent d'abord la nécessité d'une substance conductrice telle que l'eau, le mercure, ou des plaques métalliques appliquées sur les parois intérieures du vase; ils virent aussi qu'il fallait une enveloppe extérieure également conductrice, et que la main n'en faisait l'office que d'une manière imparfaite. Enfin, ils trouvèrent qu'il était essentiel d'ôter à l'électricité toute com-

communication directe de l'intérieur du vase à l'extérieur, excepté à l'instant de l'explosion.

Pour remplir ces conditions, il ne se trouve rien de plus commode que d'employer une bouteille ou un flacon de verre ordinaire, à l'extérieur duquel on colle une mince enveloppe de métal, et dont l'intérieur est rempli de pareilles feuilles aussi collées ou simplement disséminées. Une tige métallique, terminée au-dehors par une boule, passe dans le bouchon de la bouteille, et sert à porter l'électricité dans l'intérieur. On vernit extérieurement le bouchon et une partie du col. Cet appareil, représenté *fig. 33*, reçoit généralement le nom de *bouteille de Leyde*, du nom de la ville où ses propriétés avaient été observées pour la première fois.

La théorie de cet appareil est si exactement conforme à celle du condensateur, que les mêmes expressions s'y appliquent presque littéralement.

L'électricité que l'on introduit dans l'intérieur de la bouteille, et que nous supposons être de l'électricité vitrée, décompose par influence les électricités naturelles de la face extérieure, chasse la vitrée, fixe la résineuse, qui, par son attraction réciproque, la fixe aussi en partie à son tour; la bouteille forme ainsi un véritable condensateur. Lorsque l'on fait communiquer ses deux faces, les deux électricités qui y sont accumulées se précipitent l'une sur l'autre avec une grande vitesse, et, traversant rapidement les organes, y produisent une vive commotion; ou, ce qui revient au même, le corps qui établit la communication éprouve une décomposition brusque de ses électricités naturelles, dont chacune se porte sur la face de la bouteille où réside l'électricité opposée.

Cette explication peut être vérifiée dans tous ses détails par des expériences pareilles à celles que nous avons employées pour le condensateur. En général, la bouteille de Leyde n'est qu'un condensateur dont la lame isolante est courbe, et qui a pour armure, à l'extérieur, la feuille métallique dont on recouvre la surface de la bouteille; à l'intérieur, les corps conducteurs dont la bouteille est remplie.

Lorsqu'une bouteille de Leyde électrisée est suspendue dans

l'air, l'action absorbante de ce fluide ne peut agir que sur la portion d'électricité qui se trouve libre sur l'une et l'autre face de la lame, et ainsi l'attraction réciproque des deux électricités dissimulées sert à les protéger l'une et l'autre. C'est aussi ce que l'observation confirme de la manière la plus évidente, par le temps considérable que des bouteilles de Leyde d'un verre mince mettent à se décharger complètement lorsqu'on les isole, et que la communication directe de leurs deux surfaces est empêchée par une couche de gomme-laque de bonne qualité.

Si l'on étudie, à différentes époques, les progrès de cette absorption, en touchant les deux surfaces avec le plan d'épreuve, on trouve qu'il s'est développé sur toutes deux des quantités d'électricités libres, de nature contraire, qui finissent par devenir sensiblement égales; après quoi elles se maintiennent toujours dans cet état d'égalité, jusqu'à ce qu'elles soient l'une et l'autre complètement épuisées. Le calcul rend compte très-exactement de ce phénomène, d'après les lois de l'absorption de l'électricité par l'air. Quoi qu'il en soit, lorsque l'égalité des charges est ainsi établie sur les deux surfaces, si l'on y répandait quelque poudre formée de substance non conductrice, elle y adhérerait évidemment par l'attraction des électricités libres; et si de plus ces électricités n'étaient pas assez fortes pour chasser les particules de la poudre, elles se trouveraient ainsi préservées du contact de l'air; de sorte que leur déperdition étant nulle, l'appareil pourrait rester chargé indéfiniment. C'est ce que l'on observe en effet, avec les lames de verre minces, lorsque, après avoir chargé leurs deux faces, on y répand le mélange de soufre et de minium dont nous avons parlé plus haut. Si l'on suspend ces lames par un cordon le long d'une muraille sèche, elles conservent leur électricité pendant des mois entiers.

En général, quand on s'occupe de phénomènes électriques, il ne faut jamais perdre de vue l'influence que le contact de l'air peut avoir sur eux. Sans cela, par exemple, on croirait, d'après l'expérience, qu'une bouteille de Leyde, ou tout appareil de ce genre, peut se charger en recevant seulement

l'électricité de la machine sur une de ses faces, sans communiquer par l'autre avec le sol. Car, dans le fait, une bouteille ainsi isolée se charge peu-à-peu ; sur-tout si on l'électrise long-temps. Mais c'est que l'électricité de sa seconde surface, que l'influence à distance repousse et rend libre, se trouve alors exposée à l'action absorbante de l'air qui la diminue peu-à-peu ; ce qui permet l'accumulation d'une certaine quantité d'électricité sur la surface qui communique directement aux conducteurs. Pour pousser cette déperdition à l'extrême, il n'y a qu'à armer la surface extérieure de quelques pointes ; alors la bouteille, quoique isolée dans l'air, se charge presque aussi fortement que si la face armée de pointes communiquait avec le sol.

DES BATTERIES ÉLECTRIQUES.

Quand on veut accumuler beaucoup d'électricité, on forme des bouteilles de Leyde avec de grandes jarres de verre que l'on revêt de feuilles métalliques sur leurs deux surfaces, et l'on fait communiquer toutes les tiges de ces bouteilles à un même conducteur métallique qui détermine, quand on le touche, leur décharge simultanée. Cet appareil s'appelle une batterie électrique ; il est représenté *fig. 34* : on l'établit ordinairement sur un support isolant qui communique au sol par un conducteur métallique que l'on peut ôter ou mettre à volonté.

Plus une batterie contient de surface de verre armée, plus elle accumule d'électricité à force répulsive égale ; mais aussi plus il faut de temps pour la charger avec une machine donnée. En général, quand on emploie de très-grandes batteries, il est utile de les séparer en plusieurs divisions, pour pouvoir proportionner la quantité d'électricité aux effets que l'on veut produire. Cela offre encore l'avantage de pouvoir charger les batteries plus vite avec la même machine ; c'est ce que je vais expliquer.

Je suppose un nombre quelconque de bouteilles de Leyde, ou en général de surfaces de verre armées, suspendues les unes sous les autres par des conducteurs métalliques, comme

Le représente la *fig. 35*. Attachons la première à un cordon de soie S , et faisons communiquer la dernière avec le sol. Conduisons ensuite sur la face supérieure $A_1 A_1$ l'électricité de la machine que je supposerai vitrée; il est évident que toutes les lames inférieures se chargeront en même temps que la première, par les répulsions successives de l'électricité de l'une dans l'autre. Mais le raisonnement et l'expérience s'accordent à montrer que, dans cette manière de charger *par cascade*, la décomposition des électricités naturelles s'affaiblit avec une extrême rapidité à mesure que l'on s'éloigne du premier conducteur; de sorte que, pour peu que l'on multiplie le nombre des surfaces, les dernières ne se chargent presque pas. En outre, si l'on fait communiquer le premier anneau et le dernier de la chaîne par leurs faces opposées, on n'obtient que la décharge des quantités d'électricité qu'ils ont individuellement acquises; et celles des lames intermédiaires se recomposent d'elles-mêmes sans produire aucun effet; au lieu qu'on en profiterait également si, après avoir chargé le système par cascade, on en désunissait les parties successives pour faire communiquer ensemble les faces chargées d'électricités de même nature, et les décharger simultanément. On applique avec succès cette méthode à la charge des grandes batteries. Pour cela il faut les séparer en plusieurs divisions établies sur des pieds isolans, comme le représente la *fig. 36*. Quand on veut les charger toutes, ou seulement quelques-unes d'entre elles, on établit d'abord la communication entre les faces successives $B_1 A_2, B_2 A_3, \dots$, au moyen de verges métalliques C_1, C_2, \dots , que l'on passe dans des anneaux disposés pour cet usage; et l'on fait communiquer avec le sol la dernière face B_n . Puis, lorsque l'on croit la charge suffisante, on détruit la communication de la face B_n avec le sol. Alors, on peut impunément enlever les unes après les autres les tiges métalliques C_1, C_2, \dots . Car, lorsqu'on ôte C_1 , par exemple, il ne peut se faire aucune décharge, puisque l'électricité B_1 est retenue par A_1 et l'électricité A_2 par B_1 . Cela fait, et les batteries partielles étant ainsi séparées, on établit des communications entre leurs surfaces A_1 . Pour cela on y jette, je

ne dis pas on y pose, car on s'exposerait à une décharge, on y jette, dis-je, les mêmes tiges métalliques C_1, C_2, \dots , qui, rencontrant les conducteurs par lesquels les parties de chaque batterie sont liées, les mettent naturellement en communication. Chaque fois que la tige tombe sur deux batteries consécutives, elle excite entre elles une étincelle, ce qui vient de l'inégalité des charges qu'elles avaient acquises dans la première disposition. Quand toutes les batteries sont réunies, on peut les décharger toutes d'un seul coup, en faisant communiquer ensemble une partie quelconque des faces extrêmes A_1 et B^n ; ou, si l'on veut, on continue de faire encore tourner la machine pour achever de les charger complètement.

Dans ces opérations, il importe d'avoir un régulateur qui vous indique à chaque instant l'état de la batterie. Car, à un certain degré de charge, la portion d'électricité des faces A qui jouit de sa force répulsive, peut surmonter la résistance de l'air, et se porter par explosion vers une face B , ce qui déchargerait brusquement la batterie, et souvent avec rupture d'une partie des jarres, parce que toute la force du choc se porte alors en un seul point de leur garniture métallique. Pour éviter cet accident, on visse à demeure, sur les conducteurs des faces A , un petit pendule formé par une tige métallique TT , *fig. 37*, et par une légère tige d'ivoire, portant à son extrémité une petite boule b , faite avec de la moelle de sureau. Le fluide libre des faces A exerçant sa force répulsive sur ce petit pendule, le fait s'éloigner de sa tige; et ses écarts sont marqués par une division tracée sur le cadran cc . Il est clair que cet instrument ne donne aucune mesure absolue; mais il offre au moins une indication constante sur laquelle on peut se régler, lorsqu'on a, une fois pour toutes, déterminé par expérience le degré de répulsion auquel une décharge spontanée pourrait devenir à craindre.

Pour décharger les batteries, on se sert de l'excitateur à deux branches décrit page 553. On pose l'une d'elles sur une face A , l'autre sur une face B , et la décharge s'opère à travers leur substance. Généralement, quand on opère avec de fortes batteries, on doit bien se garder de s'exposer à en rece-

voir la décharge ; car on pourrait en éprouver les accidens les plus graves, et même la mort.

CHAPITRE X.

Des Piles électriques, et des Phénomènes que présentent les cristaux électrisés par la chaleur.

J'AJOUTERAI ENCORE, sur la charge par cascade, quelques développemens qui nous deviendront utiles dans la théorie du galvanisme et du magnétisme. Ils auront d'ailleurs l'avantage actuel d'offrir de nouveaux exemples du jeu des électricités dissimulées.

Concevez une suite de plaques de verre, armées de métal sur leurs deux surfaces, et disposées parallèlement les unes aux autres, comme le représente la *fig.* 38, en sorte que la face B_1 de la première communique par un fil métallique à la face A_2 de la seconde; la face B_2 de la seconde à la face A_3 de la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière dont la face postérieure B_n communique avec le sol. Supposons que tout cet appareil étant isolé, on fasse communiquer la première face A_1 au premier conducteur d'une forte machine, et qu'après l'avoir ainsi électrisé par cascade pendant quelques temps, on rompe les communications avec le conducteur et avec le sol au moyen de tiges isolantes. On demande quel sera l'état électrique de toutes les parties de l'appareil après un certain temps.

Pour le prévoir, il faut considérer qu'au moment de la rupture des communications, la première face A_1 contient une certaine charge électrique, en partie libre, et en partie dissimulée par l'électricité de nature contraire qu'elle a elle-même attirée et fixée sur la seconde face B_1 ; il en est de même de la face A_2 par rapport à B_2 , de A_3 par rapport à B_3 , et ainsi de suite pour toutes les autres. De toutes ces quantités, il n'y a que la charge de A_1 qui soit étrangère à l'appareil, toutes les autres proviennent de simples décompositions

des électricités naturelles. L'intensité absolue de ce développement décroît rapidement d'un élément à l'autre ; mais tout ce qui est développé sur chacun d'eux n'est pas sensible ; il n'y a de sensible que les portions d'électricités libres, qui sont toutes de même nature que celle qui est fixée sur A_1 .

Cela posé, si l'appareil était exposé dans un milieu parfaitement isolant, il est clair que cet état d'équilibre s'y maintiendrait sans cesse ; mais s'il est entouré d'un milieu absorbant, tel que l'air, il perdra graduellement son électricité. Pour savoir comment cela arrivera, il faut se rappeler que, dans un même état de l'air, et pour une même forme de surface, cette déperdition est proportionnelle à la quantité totale d'électricité libre qui y réside. Ainsi, dans les premiers instans, elle sera plus forte pour la première face A_1 que pour la seconde A_2 , puisque celle-ci a moins d'électricité libre ; de même, elle sera plus forte pour A_2 que pour A_3 , et ainsi de suite jusqu'à la dernière face B_n , où elle sera nulle tout-à-fait, puisqu'il ne se trouve point alors d'électricité libre sur cette face. Mais, par suite de ces déperditions inégales, il s'y en développera. Car l'équilibre précédemment établi n'avait pas lieu entre les portions d'électricité libre des différentes faces, mais entre leurs charges absolues ; et, puisque la première A_1 se trouve affaiblie, elle ne peut plus neutraliser sur B_1 ce qu'elle y neutralisait auparavant ; il en est de même pour l'action de A_2 sur B_2 , et de même encore en continuant jusqu'à la dernière face B_n . Alors l'électricité de cette face n'étant plus complètement neutralisée, une portion devient libre, et cette portion, d'abord très-petite, augmente graduellement. Car, bien que, dès l'instant où elle paraît, elle se trouve pour toujours exposée à l'action absorbante de l'air ; cependant, à cause de sa faiblesse, elle perd d'abord moins que les portions libres des autres faces, de sorte que le changement d'équilibre continue à s'opérer de la même manière, la perte d'électricité libre diminuant de plus en plus sur la première face, et augmentant sur la dernière, et les élémens intermédiaires éprouvant des changemens moyens entre ces deux-là. Il ne peut donc y avoir de limite à ces varia-

tions que dans l'égalité des quantités d'électricité libre existantes sur les deux faces extrêmes de l'appareil, ce qui réduira aussi leur charge à l'égalité ; alors la disposition de l'électricité sera en général symétrique à partir de ces deux faces, en allant des extrémités au centre de la colonne ; les quantités d'électricités libres seront de nature contraire de part et d'autre de ce centre et graduellement décroissantes à mesure qu'on s'en approche ; de sorte qu'au centre même elles seront tout-à-fait nulles, et l'on pourra toucher impunément la plaque qui y sera placée. Mais si l'on rompt la pile en cet endroit ou en tout autre, et qu'on isole les fragmens, il se développera peu-à-peu, à l'extrémité rompue, une certaine quantité d'électricité libre, qui sera de nature contraire à celle du pôle extrême que l'on a laissé intact.

Voilà ce que le raisonnement indique, et ce que le calcul démontre en détail. L'expérience y est aussi parfaitement conforme, comme je m'en suis assuré.

Les phénomènes que présentent les minéraux susceptibles de s'électriser par la chaleur, sont tellement analogues à ceux que je viens de décrire, qu'on ne peut guère douter que la nature n'y ait réalisé un appareil semblable, c'est-à-dire une pile électrique composée d'un nombre infini de plaques parallèles. Le seul exposé des faits suffira pour établir cette vérité.

Je prendrai pour exemple la variété de tourmaline que M. Haüy nomme *isogone* ; elle a la forme d'un prisme à neuf pans, terminé d'un côté par un sommet à trois faces, et de l'autre par un sommet à six faces. Quand on expose cette pierre à une température moindre que 34° de Réaumur, elle n'offre aucun signe d'électricité ; mais plongez-la pendant quelques minutes dans l'eau bouillante ; et, après l'avoir retirée en la tenant avec de petites pinces par le milieu du prisme, présentez-la au disque de l'électroscope, ou à un petit pendule déjà chargé d'une électricité connue ; vous verrez qu'elle l'attire par un de ses bouts, et le repousse par l'autre. Le sommet à trois faces possède l'électricité résineuse, et le sommet à six faces l'électricité vitree. En rendant l'é-

lectroscope extrêmement sensible, on trouve que chaque espèce d'électricité va en décroissant rapidement depuis le sommet où elle réside ; qu'elle devient très-faible à une petite distance de chaque extrémité du prisme; et que, de là jusqu'au centre, tout le reste du minéral semble dans l'état naturel ; en un mot, les effets sont absolument les mêmes que dans la pile électrique isolée dont j'ai décrit plus haut la construction. Le mode seul d'exciter l'électricité est différent. On peut voir dans le *Traité général* différentes manières de varier ces expériences.

On a reconnu depuis des phénomènes analogues dans beaucoup d'autres cristaux. Plusieurs même sont beaucoup plus sensibles à cet égard que la tourmaline ; car il suffit d'élever un peu leur température, pour les électriser. M. Haüy, qui a fait sur cet objet beaucoup de recherches curieuses, a remarqué que cette faculté existe seulement dans des cristaux dont les formes ne sont point symétriques, et que les parties où résident les pôles électriques opposés dérogent toujours à la symétrie, comme les deux extrémités du prisme de la tourmaline.

Il ne serait pas impossible qu'un grand refroidissement développât, dans la tourmaline, une rupture d'équilibre électrique, comme le fait l'élévation de température ; ou que cette rupture s'opérât par de plus faibles degrés de chaleur, si la tourmaline était préalablement exposée à un haut degré de froid artificiel. Ces particularités, qui pourraient éclairer davantage le mystère de l'électrification de ce minéral, mériteraient d'être examinées.

Lorsque l'on fond du soufre dans un bassin de fer, et qu'on le laisse refroidir dans ce bassin, après l'avoir isolé, on trouve qu'il acquiert l'électricité résineuse, et le fer l'électricité vitrée. Ce fait semble nous indiquer ce qui se passe dans chaque élément de la tourmaline et des autres cristaux qui deviennent électriques par la chaleur. Une suite d'éléments pareils, mis en contact les uns avec les autres, formerait probablement une véritable pile électrique, dans laquelle l'isolement et la séparation des plaques seraient produits par la non-conductibilité de la substance du cristal.

CHAPITRE XI.

Effets mécaniques produits par la force répulsive des Électricités accumulées.

Nous avons déjà plusieurs fois remarqué que l'électricité, répandue sur la surface des corps conducteurs, exerce une contre-pression sur l'air atmosphérique qui la contient à cette surface par son poids. Nous avons vu que cette réaction, toujours proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique, peut devenir assez grande pour vaincre la résistance que l'air lui oppose. Alors l'électricité s'échappe par explosion, en écartant les particules de l'air. D'après cela, on doit présumer que, à des degrés plus grands d'accumulation, l'électricité deviendra capable de faire explosion à travers des substances beaucoup plus denses que l'air, et pourra de même séparer leurs particules. C'est aussi ce que l'expérience confirme.

La décharge d'une batterie électrique peut, lorsqu'elle est suffisamment forte, briser des cylindres de bois qu'on lui fait traverser. Elle enflamme les corps facilement combustibles, tels que le phosphore, l'éther, et les autres liquides spiritueux, c'est-à-dire qu'elle détermine leur combinaison avec l'oxygène de l'air, sur-tout s'ils ont été préalablement chauffés. Elle tue les animaux vivans lorsqu'on la fait passer à travers leur corps, et leurs cadavres se putréfient avec la même promptitude que ceux des animaux foudroyés. Elle brise de même et traverse des lames de verre dans le sens de leur longueur, pourvu que leurs surfaces soient polies; car sans cela, le verre devenant conducteur, la décharge pourrait passer sans le briser. Transmise à travers des fils de fer, d'argent ou de cuivre, elle les fond en petits globules. Enfin, avec un degré d'accumulation plus grand encore, ces fils, et des lames d'or même, sont subitement volatilisés. On peut voir dans le *Traité général* la manière la plus commode de faire chacune de ces expériences, et les précautions qu'il faut prendre pour les exécuter sans danger.

On conçoit donc qu'une telle force pourra, par une action semblable, produire dans les substances liquides ou gazeuses tous les phénomènes qui résulteraient naturellement d'une forte compression ou d'une subite élévation de température; c'est en effet ce qui a lieu. Ainsi la décharge électrique, même celle d'une simple bouteille de Leyde, enflamme les gaz hydrogène et oxygène, lorsqu'ils sont mêlés ensemble à-peu-près dans la proportion de deux parties d'hydrogène contre une d'oxygène en volume; et le résidu est de l'eau liquide, ou plutôt de la vapeur d'eau, qui se trouve saisie et élevée à une température excessivement haute par la grande quantité de calorique que la combinaison dégage. L'appareil le plus convenable pour cette expérience est représenté *fig. 39*. C'est un grand ballon de verre que l'on tient toujours rempli de gaz oxygène, en le faisant communiquer à des récipients à pression constante, et dans lequel on fait aboutir un courant constant de gaz hydrogène par l'extrémité d'un tube de verre très-fin. On enflamme le jet avec une faible étincelle transmise dans le ballon, par des conducteurs métalliques, et l'inflammation une fois déterminée se soutient d'elle-même. Cette expérience demande des précautions très-déliçates pour éviter les explosions; mais, lorsque l'on veut observer seulement le fait de la combinaison des deux gaz, on peut, sans aucun danger, employer l'appareil représenté *fig. 40*. C'est un tube de verre fermé par le haut avec un bouchon métallique, qui y est fortement luté, et qui a un petit bouton saillant en-dedans du tube: une tige métallique flexible monte à ressort dans le même tube, et peut s'approcher du bouton à une petite distance. Alors, le tube étant plongé dans une cuve pleine d'eau, on le remplit de gaz comme un récipient ordinaire; et, l'ayant sorti en partie, et essuyé, on donne au chapeau métallique une étincelle: elle se propage dans le mélange gazeux, et l'enflamme en le faisant détonner. Au reste, la simple compression mécanique produit le même effet, comme je l'ai montré autrefois par l'expérience; et une élévation de température suffit également pour l'opérer.

De même que l'on détermine la formation de l'eau par l'étincelle électrique, on est parvenu aussi à la décomposer. On s'est d'abord servi, pour cela, de violentes décharges transmises à travers ce liquide, et qui y produisaient des explosions accompagnées d'étincelles. Mais l'habile et ingénieux physicien, M. Wollaston, est parvenu à produire le même effet d'une manière infiniment plus marquée, plus sûre et plus facile, en conduisant le courant électrique dans l'eau par des fils de platine très-fins, terminés en pointes aiguës, et isolés dans des tubes de verre, ou enveloppés de résine, de manière à ne pouvoir perdre leur électricité que par la dernière extrémité de cette pointe. On conçoit déjà qu'une électricité, même faible, peut acquérir, dans de semblables circonstances, une intensité extrême qui se porte au sommet de la pointe, et dont l'énergie s'exerce toute entière contre la seule molécule d'eau avec laquelle la pointe est en contact. Aussi le courant électrique d'une machine assez peu énergique, étant transmis de cette manière, suffit pour dégager de l'eau une continuité de petites bulles qui, recueillies et essayées de nouveau par l'étincelle électrique, se trouvent être les deux gaz dont ce liquide est composé. On rend l'effet plus sûr et plus rapide, en faisant arriver à-la-fois, par les deux pointes, deux courans d'électricités de natures diverses.

Si la transmission est ainsi opérée à travers deux pointes très-fines, l'une de cuivre, l'autre d'argent, plongées dans une dissolution de sulfate de cuivre, et dont la première communique au conducteur vitré, le sulfate est décomposé. Le cuivre séparé de l'acide se revivifie à l'état métallique sur le fil d'argent, et l'autre fil se dissout. Si l'on intervertit les communications en sorte que le fil d'argent ainsi recouvert communique au conducteur résineux, le dépôt de cuivre formé sur sa surface se redissout, et la précipitation s'opère sur l'autre fil.

Ces belles expériences, et plusieurs autres du même genre, également dues à M. Wollaston, et que j'ai rapportées dans le *Traité général*, montrent que l'électricité résineuse tend à

dégager l'oxygène des combinaisons où il entre, et que l'électricité vitrée favorise au contraire ces combinaisons; résultat important dont nous aurons plus loin des confirmations nombreuses.

CHAPITRE XII.

De l'Électricité atmosphérique et des Paratonnerres.

Dès que l'on eut découvert la bouteille de Leyde et les batteries électriques, les effets de l'électricité accumulée par ces appareils se trouvèrent si ressemblans à ceux de la foudre, qu'on ne put s'empêcher de soupçonner cette analogie. Cependant Franklin fut le premier qui, ayant reconnu le pouvoir des pointes pour décharger à distance les corps électrisés, conçut la possibilité d'employer ce moyen pour rendre sensibles les effets de l'électricité atmosphérique, et se préserver de ses explosions. Mais n'ayant pas, en Amérique, des moyens suffisans pour faire ces expériences, il engagea les physiciens d'Europe à les essayer. Le premier qui répondit à cet appel fut Dalibard, physicien français, qui fit construire à Marly-la-Ville une cabane au-dessus de laquelle était fixée une barre de fer de quarante pieds de longueur, isolée dans sa partie inférieure. Un nuage orageux étant venu à passer vers le zénith de cette barre, elle donna des étincelles à l'approche du doigt, et présenta tous les autres effets qu'offrent les conducteurs électrisés par nos machines ordinaires. Cette expérience mémorable eut lieu ainsi pour la première fois le 10 mai 1752.

Bientôt les appareils de ce genre se multiplièrent; mais ils avaient tous un défaut commun, qui consistait dans le défaut d'isolement de leur base, laquelle se trouvait exposée à être mouillée par la pluie, et à laisser dissiper ainsi l'électricité. Canton imagina de remédier à ce défaut en plaçant, à l'extrémité inférieure de la barre métallique, un chapeau en métal qui recouvrait le support isolant, et le mettait à l'abri de la pluie. Au moyen de cet appareil perfectionné, il trouva que

certain nuages sont chargés d'électricité vitrée, d'autres d'électricité résineuse ; en sorte que l'électricité de l'appareil changeait souvent cinq ou six fois en une demi-heure. La pluie et la neige, en tombant, l'électrisaient aussi, et ces phénomènes avaient lieu l'hiver comme l'été. Pour ne pas être obligé d'aller le visiter sans cesse, et souvent sans utilité, Canton imagina d'y adapter un petit appareil extrêmement ingénieux, représenté *fig. 41*. Ce sont trois timbres T_1 , T_2 , suspendus à une même tige métallique horizontale AB , celui du milieu T , par un fil de soie, les deux autres par une chaîne métallique. De plus, le timbre T communique au sol par une autre chaîne attachée sous sa partie inférieure. Entre ces timbres pendent de petites sphères métalliques bb' suspendues à des fils de soie. D'après cela, il est clair que, si la tige AB est mise en communication avec le conducteur vertical qui reçoit l'électricité de l'atmosphère, cette électricité se transmettra d'abord aux deux timbres extrêmes T_1 , T_2 , par le moyen des chaînes métalliques qui les suspendent. Alors, les petits globules bb' seront attirés vers les timbres, et viendront les toucher ; mais, aussitôt après, ils en seront repoussés, et ils seront au contraire attirés par le timbre T communiquant au sol ; ils se porteront donc vers lui, se déchargeront, et iront se recharger de nouveau par le contact des timbres extrêmes. Ces oscillations continuelles des petits globules feront sonner les timbres, et l'on sera ainsi averti de la présence de l'électricité. Cet appareil se nomme un *carillon électrique*.

Cependant Franklin, en Amérique, avait continué de suivre ses idées qui devaient en effet lui offrir un vif attrait. A défaut d'édifices d'une grande hauteur, il imagina de faire descendre l'électricité des nuages sur la terre, le long de la corde d'un cerf-volant ; et, depuis les belles expériences de Newton sur les couleurs développées par les bulles d'eau savonneuse, ce fut la seconde fois que des jeux d'enfants devinrent, pour la physique, les instrumens des plus belles découvertes. Mais Franklin ne prévoyait pas lui-même l'extrême danger auquel il s'exposait. Son cerf-volant était enlevé, et il en tenait la

corde à la main ; mais elle ne donnait encore aucun signe d'électricité, quoique le cerf-volant fût voisin d'un nuage qui paraissait porteur de la foudre. Déjà Franklin craignait de s'être trompé dans ses conjectures, lorsqu'enfin une petite pluie étant venue mouiller la corde, et augmenter sa faculté conductrice, Franklin réussit à en tirer quelques étincelles ; et il faut l'entendre lui-même raconter la joie qu'il ressentit à l'aspect de ce phénomène qu'il avait prévu. Cependant, si la corde eût été mouillée, ou si elle eût été faite d'une matière plus conductrice, il est probable que cet homme célèbre eût payé de sa vie sa témérité ; et nous eussions été privés de tout ce qu'il a fait depuis de grand et d'utile pour les sciences, la philosophie et la liberté. En France, M. de Romas fit cette même expérience d'une manière beaucoup plus parfaite, soit qu'il l'eût conçue de lui-même, soit qu'il y eût été conduit par la tentative de Franklin. Il imagina d'entrelacer un fil de fer très-fin avec la corde du cerf-volant (1) ; et, pour que l'observateur ne fût pas exposé à des décharges imprévues, l'extrémité inférieure de la corde se terminait par un cordon de soie de huit ou dix pieds de longueur, au moyen duquel le cerf-volant et le fil étaient isolés. De plus, au lieu d'en tirer des étincelles avec le doigt, ce qui fait que l'observateur reçoit lui-même la décharge, Romas imagina de les tirer à l'aide d'un conducteur métallique communiquant au sol par une chaîne, et tenu à la main par l'intermédiaire d'un manche isolant : c'était proprement notre excitateur actuel. Ayant donné ainsi à cet appareil toute la perfection que suggérait une prudence éclairée, Romas n'hésita point à le lancer dans les nuages les plus orageux ; et, dans une de ses expériences, pendant un orage qui ne fut remarquable ni par les éclats de la foudre, ni par une pluie abondante, il en fit jaillir pendant des heures entières des jets de feu de plus de dix pieds de longueur. « Imaginez-vous, écrivait-il à Nollet, imaginez-vous voir des lames de feu de neuf ou dix pieds de longueur et d'un pouce de

(1) Il vaut mieux employer, comme le fait M. Charles, une corde métallique filée.

grosseur, qui faisaient autant ou plus de bruit que des coups de pistolet. En moins d'une heure, j'eus certainement trente lames de cette dimension, sans compter mille autres de sept pieds et au-dessous. Mais, ce qui me donna le plus de satisfaction dans ce nouveau spectacle, c'est que les plus grandes lames furent spontanées, et que, malgré l'abondance du feu qui les formait, elles tombèrent constamment sur le corps conducteur le plus voisin. Cette constance me donna tant de sécurité, que je ne craignais pas de provoquer ce feu avec mon excitateur, dans le temps même que l'orage était assez animé; et, lorsque les branches de verre de cet instrument eurent seulement deux pieds de longueur, je conduisis où je voulus, sans sentir à ma main la plus petite commotion, des lames de feu de six ou sept pieds, avec la même facilité que je conduisais des lames qui n'avaient que sept à huit pouces. » Cette seule description suffit pour montrer que de semblables expériences ne doivent être tentées qu'avec d'extrêmes précautions. On peut voir dans le *Traité général* celles que la théorie suggère, et au moyen desquelles elles n'offrent plus qu'un spectacle admirable sans aucun danger. Toutefois, il en est une que je ne dois pas négliger d'indiquer ici, parce qu'elle est la plus importante, et qu'elle s'applique aussi aux barres métalliques isolées, élevées à la manière de Canton; c'est de placer, près de l'extrémité inférieure de ces barres ou de la corde du cerf-volant électrique, un gros piquet de fer enfoncé en partie dans la terre, ou communiquant à une masse d'eau considérable. Lorsque l'écoulement de l'électricité devient assez fort pour pouvoir être dangereux, les explosions s'opèrent sur la partie saillante du conducteur métallique plutôt que sur tout autre corps qui serait un peu plus, ou même également éloigné; et, à l'aide de cet artifice, on peut être témoin du phénomène sans rien craindre.

Une fois qu'il est bien constaté que la foudre est une explosion électrique, on ne peut douter que l'électricité d'un nuage orageux ne puisse, comme celle de nos machines, être considérablement affaiblie par l'action des pointes. Cette conséquence, comme nous l'avons dit, n'échappa point à Franklin;

car un des caractères les plus distinctifs de son génie était d'être aussi prompt à saisir les applications utiles des faits nouveaux qu'à découvrir ces faits mêmes. Lorsqu'il n'eut plus de doute sur la nature de la foudre, il songea aussitôt à la neutraliser par le pouvoir qu'il avait reconnu aux pointes métalliques, et il imagina les *paratonnerres*.

On appelle ainsi des verges métalliques pointues que l'on élève sur le sommet des édifices, sur le haut des mâts des navires, etc..... Une de leurs extrémités, celle qui est terminée en pointe, plonge dans l'atmosphère, l'autre communique avec le sol. L'effet de ces appareils est de recevoir ou de neutraliser l'électricité des nuages, et de la conduire sans explosion jusque dans l'intérieur de la terre. Depuis environ cinquante ans qu'ils ont commencé à être en usage, un grand nombre d'exemples en a prouvé l'utilité : elle est en effet évidente par la théorie. Lorsqu'un nuage électrisé passe à une proximité telle que son influence puisse être sensible, il décompose les électricités naturelles de la barre, repousse celle de même nom dans le sol, et attire celle de nom contraire qui se porte à l'extrémité supérieure de la pointe, et y acquiert une intensité d'autant plus grande que l'action du nuage est plus forte. De là il résulte que les particules d'air humide, situées entre le nuage et le paratonnerre, doivent se précipiter vers celui-ci avec une grande rapidité, y perdre l'électricité que leur avait donnée le nuage, en prendre une autre très-forte de nature contraire ; puis, fuyant alors la pointe qu'elles repousse, se porter vers le nuage, et neutraliser l'électricité de toutes celles de ses particules qui se rencontrent sur leur passage, jusqu'à ce que ce mouvement alternatif l'ait complètement déchargé. Il doit donc arriver, en général, que cette décharge s'opérera sans explosion, et que tous les corps conducteurs qui se trouveront au-dessous du paratonnerre à peu de distance seront préservés par lui. Mais enfin si, dans un cas extraordinaire, ce rapide écoulement de l'électricité ne suffit pas encore, et qu'une explosion se produise, c'est infailliblement sur la pointe qu'elle doit se porter, puisque c'est là que l'attraction réciproque des deux électricités contraires

est incomparablement la plus énergique ; aussi, en cela, l'expérience a-t-elle confirmé pleinement la théorie. Dans les premiers temps que cette invention fut mise en usage, on présenta à l'Académie des sciences une pointe de paratonnerre qui avait reçu une explosion si forte qu'elle en avait été fondue, comme les fils de fer que nous fondons par nos batteries. Cependant cette explosion si terrible, qui aurait causé infailliblement les plus grands malheurs sur la maison où elle était tombée, ne fit pas même éprouver la commotion la plus légère, et ne fut aperçue que par l'effroyable bruit qu'elle excita.

On peut, par une expérience très-simple, donner une image sensible de l'effet des paratonnerres sur les nuages électrisés. On suspend aux conducteurs d'une machine électrique un fil de lin, au bas duquel on a attaché un petit lambeau de coton cardé qui peut assez bien nous représenter un nuage. On électrise le tout, et l'on présente au coton, non pas une pointe, mais un corps sphérique communiquant au sol ; aussitôt il est attiré, et il se produit une étincelle entre ces deux corps. Mais si, au lieu d'une sphère, on présente au coton une pointe non isolée que l'on tient à une grande distance, il se décharge d'abord invisiblement de son électricité, après quoi il retourne vers les conducteurs pour se recharger, et il redescend vers la pointe pour se décharger de nouveau. On peut suspendre ainsi plusieurs lambeaux de coton à des fils de différentes longueurs, et on les voit se replier successivement les uns sur les autres. C'est exactement ainsi que les lambeaux inférieurs d'un nuage, qui ont été déchargés par l'influence d'un paratonnerre, doivent se replier vers les parties supérieures du nuage qui sont encore électrisés.

L'effet et l'utilité des paratonnerres étant incontestables, il importe de déterminer quelle est la construction la plus avantageuse qu'on puisse leur donner. Deux conditions sur-tout paraissent indispensablement nécessaires ; la première, c'est que la communication soit parfaitement bien établie avec le sol, et entre les diverses barres métalliques dont l'appareil est composé ; la seconde, c'est que les barres conductrices aient une grosseur telle que, dans les explosions les plus

violentes de la foudre, les quantités d'électricité transmises s'écoulent à travers leur substance, sans acquérir une force répulsive capable de les faire s'élaner au-dehors. Il paraît, par tous les exemples jusqu'à présent observés, que des barres d'un pouce d'équarrissage, ou des assemblages de gros fils de fer d'une dimension équivalente, suffisent pour obtenir parfaitement ce résultat.

Si ces conditions sont remplies avec exactitude, la théorie comme l'expérience s'accordent à montrer que le voisinage, le contact même d'un paratonnerre, ne sont nullement dangereux; la décharge électrique choisissant toujours les meilleurs conducteurs, et suivant par conséquent les barres métalliques du paratonnerre, plutôt que tout autre corps voisin. Ainsi, quand on a fait traverser un paquet de poudre à canon avec un fil de fer, on peut impunément transmettre par ce fil toutes les décharges électriques qui ne sont pas capables de le fondre, ou de l'échauffer assez pour qu'il enflamme la poudre par son contact. De même, suspendez un oiseau à l'un des conducteurs de la machine, chargez la batterie et déchargez-la, l'oiseau n'en ressentira aucun effet; cependant il se trouve alors sur le passage de l'électricité. Enfin, en s'enveloppant le corps d'un cordon métallique dont on tient dans les mains les extrémités, on peut, sans aucun danger, décharger par ces cordons les plus fortes batteries, en s'isolant comme l'oiseau dans l'arc de communication.

Dans ces expériences, on éprouve quelquefois une petite commotion instantanée, mais incomparablement plus faible que la décharge de la batterie. Cette commotion vient de ce que l'électricité accumulée dans la batterie ne se transmet pas avec une liberté absolument parfaite, et n'opère pas sa décharge en un seul instant indivisible, quelque bon conducteur qu'on lui présente. Alors, pendant son passage, elle agit par influence sur les électricités naturelles des corps qui touchent ce conducteur, et y produit une séparation qui ne dure qu'un moment; l'équilibre se recompose aussitôt, mais l'alternative subite de ces deux états produit une commotion dans les organes qui l'éprouvent. On voit par cela même que cet effet

doit être d'autant plus faible que la communication entre les deux faces de la batterie est établie par des conducteurs plus parfaits et de plus grosse dimension.

Pour mettre ces résultats en évidence, on isole un conducteur cylindrique *AB*, *fig. 42*, et on le fait toucher à la face extérieure d'une batterie qui communique avec le sol. Vis-à-vis une des extrémités de ce conducteur, on en place un autre *A' B'* pareillement isolé, mais séparé du premier par un petit intervalle. Au moment de la décharge, il s'échappe une étincelle du premier conducteur au second, et un électroscope placé sur ce dernier s'érige et s'abaisse en un instant. Si l'on veut terminer ce second conducteur par l'appareil décrit *fig. 40*, en faisant communiquer son chapeau au conducteur *A' B'*, et sa tige avec la terre, la décharge latérale enflammera le mélange gazeux qui y sera contenu.

Le seul danger que pourraient offrir les paratonnerres viendrait donc uniquement de ce choc latéral, que l'on peut, pour ainsi dire, atténuer à volonté en augmentant les dimensions et la faculté conductrice du corps par lequel on fait écouler l'électricité. La théorie et l'expérience viennent de nous montrer que ce choc est incomparablement moindre que la décharge directe; et, si jamais il devenait sensible dans un éclat de foudre, qu'aurait donc été la décharge elle-même, s'il ne s'était pas trouvé là de conducteur métallique pour la transmettre au sol?

On a vu quelquefois, dans des momens d'orage, des animaux et des hommes tomber morts subitement au moment d'une explosion, quoique la foudre eût éclaté à une grande distance du lieu où ils se trouvaient. Ce phénomène peut être facilement expliqué par les considérations que nous venons d'établir. Concevons un nuage fortement électrisé et dont les deux extrémités soient pendantes vers la terre; elles y refouleront l'électricité de même nature que celle dont elles sont chargées, et attireront l'électricité contraire. Si, par une circonstance quelconque, la décharge s'opère brusquement à l'une des extrémités du nuage, l'équilibre se rétablira aussitôt dans le point de la terre qui se trouve sous l'autre extrémité; et ce rétablisse-

ment d'équilibre pourra, si la décharge est très-forte, occasionner la mort des animaux ou des hommes qui y seront soumis. Ce phénomène s'appelle le *choc par retour*.

On peut en donner une idée par l'expérience suivante :

Suspendez par un cordon de soie une grenouille vivante, à quelque distance du conducteur d'une machine électrique, comme le représente la *fig. 43*; attachez à l'une de ses jambes un cordon métallique très-léger et flexible, qui la fasse communiquer avec le sol; puis faites agir la machine; et, à mesure que l'électricité se développe, tirez de temps en temps des étincelles du premier conducteur, en lui présentant une tige de métal terminée en demi-sphère. A chaque explosion, vous verrez la grenouille tressaillir, quoiqu'elle ne soit pas dans l'arc de communication; ses électricités naturelles, que l'influencé du conducteur électrisé sépare, se rejoignent subitement chaque fois que cette influence est détruite, et excitent une commotion dans les organes de l'animal.

Ces effets se produisent encore après la mort : pour les observer alors dans toute leur énergie, il faut tuer subitement la grenouille en lui coupant le corps en travers; après quoi on la dépouille et on la prépare comme le représente la *fig. 44*. Alors l'irritabilité est telle que les contractions musculaires se produisent encore par l'influence d'une forte machine, à la distance de dix ou douze mètres. Ce phénomène, simple en lui-même, montre que les organes musculaires des grenouilles sont des électroscopes d'une sensibilité extrême. On verra, dans un des chapitres qui vont suivre, que cette susceptibilité a été la cause accidentelle d'une des plus belles découvertes qu'on ait faites dans la physique.

Jusqu'ici nous n'avons étudié l'électricité atmosphérique que dans l'état violent et passager où elle se trouve pendant les orages; mais, en augmentant la sensibilité de l'appareil qui sert à la manifester, on peut espérer de la rendre sensible lorsqu'elle paraîtrait nulle avec des instrumens plus grossiers. Pour cela, on a imaginé d'armer l'électroscope à pailles ou à lames d'or d'une verge métallique pointue, que l'on visse par son bout inférieur sur l'extrémité de la tige qui

communiqué aux pailles, *fig. 45*. On donne ordinairement à cette verge un mètre de longueur, et on la compose de plusieurs pièces emboîtées les unes dans les autres, pour que sa longueur puisse être variée à volonté. A l'aide de cet instrument, on reconnaît que l'atmosphère, lorsqu'elle est pure, est dans un état habituel d'électricité vitrée ; mais les moindres nuages, les moindres vapeurs modifient cet état. A plus forte raison change-t-il quand l'équilibre ordinaire de la température est troublé plus violemment ; par exemple, par des vents impétueux, par la pluie, la neige, la grêle, ou par des orages.

L'électroscope de Coulomb, si commode et si sensible pour toutes les autres expériences, s'adapte également bien à l'observation de ces phénomènes. Pour cela, il n'y a qu'à mettre sa tige fixe en communication avec une verge métallique isolée, pareille à celle dont on arme l'électroscope à lames, et les plus petites variations électriques, qui surviendront dans l'atmosphère, deviendront sensibles par leur influence sur le disque mobile, sur-tout si on commence par le charger d'une petite quantité d'électricité connue. Coulomb se dispensait même d'une verge ou d'un conducteur permanent. Il fixait une petite sphère métallique au bout d'une tige de cire d'Espagne, qui servait à l'isoler, et il attachait cette tige à une perche de bois longue de un ou deux mètres. Puis, quand il voulait éprouver l'état électrique de l'atmosphère, il tenait sa perche élevée en l'air, en touchant un moment la petite sphère avec une verge de métal, ou même avec un simple fil métallique qu'il tenait à la main. Puis, cessant le contact, il redescendait la petite sphère à laquelle son isolement faisait conserver l'électricité qu'elle avait acquise, et il la présentait au cercle mobile de l'électroscope, sur lequel elle agissait aussitôt. Cette expérience réussit toujours quand l'électroscope est placé dans un lieu découvert, où l'air a un libre accès, et où l'état électrique des couches situées près du sol n'est pas modifié par le voisinage de corps conducteurs, tels que les arbres, et les murailles des maisons.

L'intensité de cette électricité habituelle croît à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère ; aussi, pour la rendre plus

sensible, de Saussure a imaginé de jeter en l'air une boule pesante attachée à un fil de métal très-fin, dont l'extrémité inférieure, bouclée autour de la tige de l'électroscope, adhère à cette tige par la légère pression de son propre ressort. Quand le fil est déployé par le mouvement de la boule, il donne à l'électroscope la même espèce d'électricité que possède la couche la plus haute où cette boule s'élève. Mais, par la continuation même de ce mouvement, lorsque le fil est tout-à-fait déployé, il se détache de la tige de l'électroscope, et celle-ci reste isolée avec l'électricité qu'elle a acquise.

Lorsque nous nous sommes élevés en ballon, M. Gay-Lussac et moi, pour des expériences que je rapporterai plus tard en parlant du magnétisme de la terre, nous avons également recueilli l'électricité atmosphérique par un moyen pareil à celui de Saussure. Un fil de métal de cinquante mètres de longueur était suspendu par un bout à notre nacelle, et pendait librement au-dessous, tendu par le poids d'une boule de métal. Il nous mettait ainsi en communication avec une couche d'air située à cinquante mètres au-dessous de celle où nous nous trouvions. L'électricité atmosphérique recueillie au haut de ce fil était fort sensible à l'électroscope; et, en l'éprouvant avec la cire d'Espagne, nous la trouvâmes résineuse, quoique le temps fût parfaitement serein.

Ce résultat semble contraire à celui qu'a trouvé de Saussure, et qu'ont vérifié après lui tous les physiciens; mais cette discordance n'est qu'apparente, et, dans le fait, les deux résultats sont d'accord. Pour le prouver, représentons notre fil par AB, fig. 46; et à ses deux extrémités menons deux plans horizontaux qui séparent l'atmosphère en trois portions, dont une comprise entre les extrémités du fil et deux au-delà. Puis supposons que l'atmosphère soit réellement dans un état d'électricité vitrée croissant avec les hauteurs. Il faudra admettre que cette électricité est faible et son accroissement peu considérable, sur-tout dans une épaisseur de cinquante mètres. Cela posé, considérons d'abord les actions des deux couches extrêmes. Il ne s'agit pas ici de leur action par le contact; car celle-ci doit employer un certain temps à se transmettre, mais

de l'influence à distance de leurs électricités libres sur les électricités naturelles du fil. Alors, la portion supérieure S qui est à l'état vitré attire l'électricité résineuse du fil avec une force que je représenterai par $+R$, et repousse la vitrée avec une force que je représenterai par $+V$. La couche inférieure S' fera la même chose en sens inverse, mais ses actions seront plus faibles, puisque l'intensité de l'électricité vitrée est supposée croître avec les hauteurs. Soient donc v et r les deux forces qu'elle exerce. D'après cela, il est clair que l'électricité résineuse du fil sera attirée vers sa partie supérieure avec un excès de force égal à $R - r$, et l'électricité vitrée sera repoussée vers l'extrémité inférieure avec un excès de force égal à $V - v$. Ainsi, pour nous qui observions l'électricité à la partie supérieure du fil, elle devait être résineuse. Pour de Saussure, qui la prenait à l'extrémité inférieure, elle devait être vitrée.

Nous n'avons pas encore eu égard à l'action de la couche intermédiaire AB , dans laquelle le fil se trouve. Si cette couche était uniformément électrique dans toute sa hauteur, ses actions au-dessus et au-dessous de chaque moitié du fil se compenseraient d'elles-mêmes, et il n'en résulterait aucune décomposition des électricités naturelles du fil. Mais, dans l'état d'une électricité vitrée croissante avec les hauteurs, il est clair que les actions réunies de toutes les molécules de la couche produiront une résultante de même nature que l'action de la couche supérieure, de sorte que celle-ci s'en trouvera augmentée; et l'effet total le sera pareillement, si toutefois l'épaisseur de cette couche est assez grande pour que son action puisse être comptée comparativement à celles des portions supérieures et inférieures de l'atmosphère.

Voici une autre expérience de M. Hermann, qui s'explique par les mêmes principes. Un électroscope à lames d'or très-sensible est placé fixement à une certaine hauteur dans l'atmosphère, le temps étant serein. Il n'y donne aucun signe sensible d'électricité. On porte dans la couche d'air supérieure, quelques pieds seulement au-dessus de l'électroscope, un fil métallique ou tout autre conducteur placé horizontalement,

lement à l'extrémité d'une tige isolante; et, après l'avoir tenu quelque temps dans cette couche, on l'abaisse rapidement sur l'électroscope jusqu'à ce qu'il le touche; aussitôt les lames d'or divergent par une électricité vitrée. Au contraire, si l'on porte le conducteur isolé dans une couche inférieure à l'électroscope, et qu'après l'y avoir laissé quelque temps on le relève avec rapidité, il donne à l'électroscope une électricité résineuse.

Ces phénomènes s'expliquent en remarquant que le conducteur mobile prend à chaque fois le degré d'électricité qui convient à la couche où on le place. Lorsqu'ensuite on le ramène assez rapidement pour que son état ne soit pas tout-à-fait détruit par le contact des molécules d'air parmi lesquelles on le transporte, il communique cet état à l'électroscope; s'il vient d'en haut, il lui porte un excès d'électricité vitrée; s'il vient d'en bas, il lui porte un défaut de cette même électricité. Généralement soit $+E$ la quantité d'électricité vitrée libre que doit posséder le conducteur isolé pour être en équilibre électrique dans la couche d'air où se trouve l'électroscope; de sorte que lorsqu'il a $+E$ les molécules d'air de cette couche ne lui donnent ni ne lui prennent rien. On le porte dans une couche supérieure où il prend $E + \delta E$; δE désignant le petit excès d'électricité vitrée qu'il y acquiert. Alors, si on le ramène rapidement dans la couche de l'électroscope, il aura de trop $+ \delta E$, et il communiquera cet excès à tous les corps qu'il touchera; il le communiquera donc aussi à l'électroscope, s'il le touche promptement; et, jusqu'à ce que celui-ci ait perdu par le contact de l'air cet excès qu'il a partagé, ses lames divergeront vitreusement. Au contraire, quand le conducteur isolé revient des régions inférieures, il a $E - \delta E$; de sorte que pour lui rendre E , il faut lui communiquer $+ \delta E$ d'électricité vitrée. Si on le fait toucher à l'électroscope, celui-ci partagera cet état; alors la quantité d'électricité vitrée qu'il possédera ne pourra plus faire équilibre à l'influence de la masse d'air environnante, et ses fluides naturels seront décomposés. Mais la portion de fluide vitré

que cette décomposition rendra libre, ne fera point diverger les lames d'or, parce que sa force répulsive sera employée toute entière à compenser celle de l'électricité extérieure E. Il n'y aura donc que la force répulsive du fluide résineux qui s'exercera, parce que rien ne la compense; et les lames d'or divergeront en vertu de cette électricité jusqu'à ce qu'elle ait été enlevée et neutralisée par le contact immédiat et successif des molécules d'air. Les expériences de ce genre présentent la singulière circonstance d'un milieu indéfini, qui est l'air, dont toutes les molécules sont individuellement chargées d'un excès d'électricité de même nature, adhérente à leur surface; de sorte que la masse entière du milieu s'en trouve pénétrée dans une proportion variable avec les hauteurs. Alors les diverses particules de ce milieu ne peuvent être en repos que par la mutuelle compensation de leurs forces répulsives combinées avec leur pesanteur; et la même condition s'applique aussi aux corps conducteurs qui s'y trouvent plongés. Ainsi, pour tous ces corps, l'équilibre électrique n'aura pas lieu quand leurs électricités naturelles seront complètement neutralisées, mais lorsqu'ils posséderont l'excès de l'une ou de l'autre électricité qui convient à la couche où ils se trouvent, excès qui est vitré dans l'atmosphère, lorsqu'elle est pure. S'ils possèdent un plus grand excès de cette même électricité, ils agiront uniquement en vertu de cet excès les uns sur les autres, et sur toutes les molécules d'air environnantes : ils devront donc se repousser mutuellement. Si, au contraire, l'excès d'électricité qu'ils possèdent est moindre que celui qu'ils prendraient naturellement dans la couche où on les place, la masse du milieu agira sur chacun d'eux en vertu de cette différence; et leurs électricités naturelles seront décomposées autant qu'il le faut pour compléter ce qui leur manque de l'électricité du milieu : en vertu de cette addition, ils repousseront le milieu autant que le milieu les repousse, et n'en éprouveront plus aucune action. Mais ils agiront les uns sur les autres avec l'excès qu'ils ont acquis de l'électricité opposée; et, si le milieu est un fluide indéfini composé de particules suscep-

tibles de s'électriser par le contact, cet excès se dissipera peu-à-peu dans l'espace. Il y aurait beaucoup d'expériences curieuses à faire pour constater les lois de l'équilibre électrique dans des circonstances aussi différentes de celles que l'on a généralement coutume de considérer.

CHAPITRE XIII.

De la lumière électrique.

LA lumière qui se développe dans les explosions électriques a passé long-temps, aux yeux des physiciens, pour une modification du principe électrique même, lequel jouissait de la faculté de devenir lumineux à un certain degré d'accumulation. Mais l'observation de la lumière qui se dégage de l'air par une pression mécanique, m'a fait penser que la lumière électrique pourrait avoir une semblable cause, et être purement l'effet de la compression opérée sur l'air par l'explosion de l'électricité (1). C'est ce qu'une discussion approfondie des expériences rend extrêmement probable, comme on peut le voir dans le *Traité général*. Suivant que l'air traversé par le choc électrique est plus ou moins dense, ou selon que la décharge électrique qu'on y transmet est plus ou moins énergique, elle produit des lueurs variées, depuis le violet le plus tendre jusqu'au blanc le plus éclatant. Cet effet se produit dans le vide de nos machines pneumatiques, et même dans le vide de nos baromètres. Mais qu'est-ce qu'un tel vide, sinon un espace où il y a des vapeurs d'eau ou de mercure qui peuvent, comme les autres, dégager de la chaleur quand elles sont suffisamment comprimées.

L'électricité développée produit encore deux autres effets, que l'on a voulu regarder comme deux de ses caractères physiques. Le premier est cette sensation pareille au contact d'une toile d'araignée que les corps électrisés produisent quand on les approche d'une partie quelconque de la peau nue. Le se-

(1) *Annales de Chimie*, tome 53, pag. 321. 1805.

cond, c'est l'odeur de phosphore très-sensible et très-distincte que produisent les pointes électrisées lorsqu'on les présente vers les organes de l'odorat. Mais les commotions données par la bouteille de Leyde et les batteries électriques prouvent que l'électricité en mouvement secoue violemment les organes, et y excite des contractions musculaires très-énergiques. On verra plus tard encore d'autres exemples de cette faculté. Maintenant, lorsqu'un conducteur électrisé se présente devant une partie quelconque de notre corps, il se fait en cette partie une décomposition de nos électricités naturelles, et celle qui est de nom opposé à celle du conducteur, se condense à l'extrémité qui en est la plus voisine; ce mouvement intérieur, le départ de cette électricité, ou l'introduction de celle qui vient du dehors, ne peuvent-ils pas produire en nous quelque sensation? et le seul contact de l'air qui se renouvelle et s'électrise sur les parties de notre peau où l'électricité est devenue libre, ne doit-il pas y exciter aussi quelque frémissement? Or, si cela doit être ainsi, il n'y a aucun motif d'aller imaginer des causes particulières pour produire ces effets; et il n'y a, par conséquent, aucune vraisemblance à en faire des propriétés physiques attachées à la nature de l'électricité.

En variant la marche et les scintillations de la lumière électrique, on l'a employée à plusieurs jeux de physique intéressans, que j'ai décrits dans le *Traité général*. Je me bornerai à rapporter ici deux phénomènes qu'elle présente, et qui semblent indiquer une différence physique entre les deux électricités.

On arme le premier conducteur de la machine électrique, ou l'un des conducteurs secondaires qui s'y rattachent, avec une pointe métallique qui se projette dans l'air environnant. Puis on dispose successivement les frottoirs de manière à charger successivement ces conducteurs d'électricité vitrée et d'électricité résineuse. Si l'expérience est faite dans l'obscurité, on observe dans le premier cas, à l'extrémité de la pointe, une gerbe de feu accompagnée d'un bruissement très-sensible; dans le second cas, on n'y voit qu'un point lumineux sans aucun bruissement.

On suspend à un fil de soie une carte à jouer que l'on met

en contact par ses deux surfaces avec deux pointes métalliques dirigées parallèlement l'une à l'autre, mais qui ne sont pas opposées dans leur contact, *fig. 47*. On fait communiquer l'une de ces pointes à la face extérieure d'une forte bouteille de Leyde que l'on tient à la main, et l'on touche l'autre pointe avec le crochet. La décharge s'opère d'une pointe à l'autre en traversant la carte. Or, on observe que l'endroit où elle est percée est toujours placé précisément au-devant de la pointe qui communique à la face résineuse de la bouteille : et, si l'expérience est faite dans l'obscurité, on voit, au moment de la décharge, un trait de feu passer sur la surface de la carte qui touche le conducteur vitré ; tandis que la surface qui touche le conducteur résineux reste obscure ; on peut même rendre les traces de ce trajet permanentes en peignant les deux faces de la carte avec du vermillon, qui se trouve altéré seulement sur l'une d'entre elles.

Ce phénomène et le précédent s'expliquent très-bien en supposant que l'air se laisse beaucoup plus aisément traverser par l'électricité vitrée que par l'électricité résineuse. Alors, une pointe chargée d'électricité vitrée peut la dissiper en la lançant autour d'elle ; tandis que, si elle est chargée d'électricité résineuse, il faudra que la décharge s'opère par le contact successif des particules d'air qui viendront toucher le sommet de la pointe et y enlever l'électricité. La lumière ne se produira donc qu'à ce sommet même ; pareillement, dans le cas de la carte, l'électricité de la pointe vitrée est la seule qui puisse s'élaner dans l'air, et aller rejoindre l'électricité résineuse de l'autre pointe ; ce qu'elle fait par la route de moindre résistance, en glissant d'abord sur la surface de la carte, et ne la perçant qu'au moment où sa proximité de l'autre pointe donne la plus grande énergie à son attraction. M. Tremery, qui a eu le premier l'idée d'expliquer ainsi ces phénomènes, a cherché à affaiblir l'influence de la force coercitive, en diminuant la densité de l'air interposé ; ce qu'il a fait en répétant les mêmes expériences sous un récipient de machine pneumatique. Il a trouvé ainsi que, dans la carte percée, le trou se rapproche du milieu de l'intervalle

des deux pointes, à mesure que l'air ambiant devient plus rare, et offre ainsi une résistance moindre. Ce résultat semble conforme à la supposition d'un pouvoir coercitif inégal pour l'une et l'autre électricité. Nous verrons plus tard d'autres phénomènes qui prouvent l'existence d'une inégalité pareille dans d'autres corps que l'air. Mais cette inégalité n'y devient sensible que pour des charges électriques dont la force répulsive est excessivement faible ; et il est très-difficile de concevoir comment elle peut exister dans l'air, même pour les plus fortes charges, lorsque d'ailleurs tous les autres phénomènes semblent indiquer que la résistance offerte par l'air, à l'expansion de l'électricité, provient uniquement de sa pression. C'est pourquoi il serait utile de répéter de nouveau ces expériences avec des circonstances nouvelles, par exemple, dans des milieux divers, pour voir s'il serait possible de lever cette apparente contradiction.

CHAPITRE XIV.

Des diverses manières par lesquelles on peut développer l'électricité.

POUR étudier les diverses propriétés des principes électriques, et pour établir leurs caractères, il suffisait d'avoir un moyen sûr et facile d'en opérer le développement. La friction réunissait ces avantages ; et comme, en outre, ses effets pouvaient être infiniment agrandis, je me suis borné à l'indiquer au commencement de ce livre, et nous n'avons pas employé jusqu'ici d'autres procédés. Mais maintenant, il devient nécessaire de faire connaître aussi les autres modifications des corps qui peuvent y exciter une séparation de leurs électricités naturelles ; car ce genre d'expériences est peut-être la seule voie qui puisse nous conduire à connaître comment les deux principes électriques sont liés à la constitution naturelle des corps.

D'abord, quant à la friction, j'ai annoncé que les circonstances, en apparence les plus légères, peuvent déterminer l'un ou l'autre des deux corps que l'on frotte à prendre l'une ou

l'autre électricité : par exemple , si l'on frotte l'un contre l'autre deux rubans de soie AB, A'B', *fig.* 48, coupés l'un à la suite de l'autre dans la même pièce, en les plaçant en croix de manière que l'un d'eux, AB, frotte successivement dans toute sa longueur, tandis que A'B' est seulement frotté en C; le premier prend toujours l'électricité résineuse; le second, l'électricité vitrée. Dans ce cas, le choix est uniquement déterminé par le mode de friction. Mais la température plus ou moins élevée de chacun des deux corps exerce aussi une influence puissante sur l'espèce d'électricité dont il se charge, comme Bergman l'a, je crois, le premier fait voir. Par exemple, dans l'expérience précédente, si le ruban AB, qui frotte successivement sur toute sa longueur, est d'abord fortement chauffé, et que la friction dure assez peu pour que la différence de température entre lui et le ruban A'B' soit considérable, cette circonstance l'emportera sur le mode de friction; et ce sera AB qui prendra l'électricité vitrée, A'B' ayant l'électricité résineuse. Après le refroidissement du ruban AB, ou lorsque les deux rubans se seront communiqué mutuellement leur température, les choses reviendront telles que nous les avons décrites d'abord, et le passage de l'une de ces conditions à l'autre sera marqué par un état d'indifférence. Pour donner aux expériences de ce genre toute la délicatesse qu'elles exigent, et pouvoir suivre sûrement les diverses oscillations de l'état électrique, il faut, après chaque opération, présenter promptement chacun des corps sur lesquels on opère à un électroscope à feuilles d'or très-sensible, dont on touche seulement le bouton avec le corps dont on veut constater l'état. On peut aussi employer avec avantage l'électroscope à fil de soie de Coulomb. J'ai rapporté, dans le *Traité général*, une suite curieuse d'expériences faites ainsi par cet habile physicien même. Elles lui avaient paru indiquer un principe général, qui, bien qu'un peu vague dans son expression, paraît cependant accorder un trop grand nombre de résultats pour ne pas renfermer le germe de quelque vérité générale. En voici l'énoncé : lorsque les surfaces de deux corps sont frottées ensemble, celle dont les particules intégrantes s'écartent le moins les

unes des autres et font des excursions moindres autour de leurs positions naturelles d'équilibre, paraît, par cela même, plus disposée à prendre l'électricité vitrée. Cette tendance augmente, si la surface éprouve une compression passagère. Réciproquement, celle des deux surfaces dont les particules se trouvent plus écartées par la rudesse de l'autre, ou par toute autre cause quelconque, est, par cela même, plus disposée à prendre l'électricité résineuse. Cette tendance augmente, si la surface éprouve une véritable dilatation. La chaleur écartant les particules des corps, paraît agir de cette manière : elle les dispose à l'état résineux. Il faut bien remarquer que ces conditions indiquées par Coulomb ne sont pas présentées par lui comme absolues, mais simplement comme relatives : c'est-à-dire, qu'elles disposent seulement les corps à tel ou tel état électrique, mais ne les y contraignent point nécessairement ; car, sans doute la nature même des corps que l'on frotte a aussi, sur le phénomène, une influence ; mais Coulomb n'a pas cru pouvoir l'évaluer.

Le principe précédent s'applique très-bien à une expérience de M. Libes, qui est bien postérieure à l'époque où Coulomb mit en avant ces idées. Voici en quoi elle consiste : on prend un disque de métal que l'on tient isolé par un manche de verre, et on le presse sur du taffetas gommé, soit simple, soit plié en plusieurs doubles. L'enduit dont ce taffetas est couvert est susceptible d'être comprimé par la pression, et c'est ainsi qu'il adhère aux corps dont les aspérités se moulent, pour ainsi dire, sur sa surface. Il est donc, selon le principe de Coulomb, dans une condition qui facilite le développement à l'électricité vitrée. Aussi, lui trouve-t-on cette espèce d'électricité lorsqu'on enlève le disque, et celui-ci possède un excès correspondant d'électricité résineuse. L'effet est d'autant plus marqué que la pression est plus forte. Il s'éteint lorsque le taffetas a perdu cette gluinosité, qui rend sa surface facilement compressible. Le frottement n'a aucune part à la production de ce phénomène ; car si, au lieu de presser le disque sur le taffetas, on le pose légèrement sur sa surface, et qu'on l'y promène çà et là pour la froter, c'est

lui qui prend l'électricité vitrée, et le taffetas prend l'électricité résineuse, résultat inverse de celui que produit la pression.

La curieuse remarque faite par M. Libes a été étendue, par M. Haüy, à plusieurs substances minérales, avec cette particularité singulière que quelques-unes d'entre elles acquièrent l'état électrique sous la pression la plus légère, et le conservent ensuite obstinément. Par exemple, la chaux carbonatée rhomboïdale, vulgairement nommée spath d'Islande, devient électrique seulement lorsqu'on la presse un instant entre les doigts secs; elle montre alors une électricité vitrée très-sensible, qu'elle retient avec beaucoup d'énergie; car elle ne la cède pas lorsqu'on la touche avec un corps conducteur communiquant au sol, ni même lorsqu'on la plonge dans l'eau. D'autres minéraux présentent cette propriété à un degré moindre; d'autres enfin en avaient paru privés; mais M. Lecquerel a montré que cette exception n'était qu'apparente, et tenait à ce que les corps dont il s'agit n'ont pas, comme les premiers, la facilité de retenir l'électricité qu'ils ont une fois acquise; de sorte que, pour la rendre sensible, il faut les isoler pendant le contact. A cet effet, il fixe la substance qu'il veut éprouver à l'une des extrémités d'une tige de verre, dont l'autre extrémité est terminée par un manche de bois sec, pour qu'on puisse la tenir à la main sans l'électriser par friction; il laisse ensuite ce petit appareil pendant quelque temps sans le toucher; puis, pour s'assurer qu'il n'est point électrisé, il le présente au disque d'un électroscope de Coulomb, chargé d'une électricité connue; et, lorsque sa neutralité est bien constatée, il presse le minéral avec le doigt, ou sur un corps solide quelconque, soit isolé, soit non isolé. Or, en opérant ainsi, il a trouvé que, non-seulement les minéraux, mais toutes les substances de nature quelconque, étant isolées et pressées les unes contre les autres, sortent de la pression dans des états électriques différens; l'une avec un excès d'électricité vitrée, l'autre avec l'excès correspondant d'électricité résineuse. Si un seul des deux corps est isolé, celui-là seul conserve l'électricité que la pression lui fait acquérir, et l'autre la perd dans

le sol, à moins que sa substance ne soit isolante, ou n'ait un degré de conductibilité imparfaite qui permette à l'électricité de la surface de se fixer par la décomposition des électricités naturelles des couches intérieures. Le spath d'Islande paraît être dans ce cas. L'intensité absolue des effets est inégale pour les diverses substances; et, pour quelques-unes, ils sont si faibles que l'on ne peut les rendre sensibles que par des précautions particulières. La plus essentielle est de donner, aux corps que l'on emploie, la forme de petits disques de quelques millimètres de diamètre. On augmente aussi, très-notablement, leur propriété électrique en les chauffant. Quelques substances même, l'amadou et la moelle de sureau, par exemple, n'offrent de résultats bien sensibles qu'à l'aide de cette dernière précaution.

On verra, dans le chapitre suivant, que, d'après une très-belle découverte due à Volta, tous les corps, lorsqu'ils sont mis seulement en contact les uns avec les autres, sortent du contact dans des états électriques différens; mais les phénomènes découverts par M. Becquerel semblent, par leur intensité, et par plusieurs particularités qui les accompagnent, être d'une autre espèce. Par exemple, si l'on pose un disque de liège isolé, sur la paume de la main, les cheveux vivans, sur une table de bois, ou sur une écorce d'orange, et qu'après l'avoir retiré, on lui fasse toucher le bouton d'un électroscope à feuilles d'or, deux ou trois pressions successivement répétées, et quelquefois une seule, suffiront pour donner aux lames un écart considérable; tandis qu'il faut armer l'électroscope d'un condensateur, pour y rendre sensible l'électricité développée par le seul contact. En outre, la facilité qu'ont les substances à se laisser comprimer et à revenir ensuite sur elles-mêmes, favorise beaucoup ce développement d'électricité par pression. On en excite beaucoup, par exemple, en pressant un disque de liège isolé sur un amas de brochures superposées. Les liquides imparfaits, qui se laissent presser et reviennent ensuite sur eux-mêmes, sont également aptes à produire ces effets; comme on le peut voir en pressant le disque de liège isolé sur de l'essence de

térébenthine épaissie au feu, qui forme comme une sorte de vernis d'une fluidité imparfaite. M. Becquerel a remarqué aussi que, dans ces expériences comme dans celle de M. Libes, l'électricité développée par la pression devient plus intense à mesure que les substances pressées adhèrent plus intimement l'une à l'autre, quand on les presse, et exigent un effort plus sensible pour être détachées. En général, ce développement lui a paru modifié par une infinité de particularités, telles que le poli des surfaces, leur exposition à un air plus ou moins humide, leur séparation plus ou moins récente.

M. Dessaignes a, depuis long-temps, fait connaître un phénomène qui paraît avoir beaucoup de rapport avec les précédens; c'est que, lorsqu'on plonge une tige de verre ou de tige d'Espagne dans le mercure, elle en sort ordinairement électrisée, soit qu'on l'y plonge entièrement, ou qu'on se borne à la poser sur la surface de ce liquide; ou qu'on lui fasse choquer vivement cette surface. Le moyen le plus simple de vérifier ce phénomène, c'est de présenter la tige, après sa sortie du mercure, au disque de l'électroscope de Coulomb préalablement chargé d'une espèce d'électricité connue. L'effet est sur-tout remarquable avec la gomme-laque: l'électricité qu'elle acquiert, par une seule immersion, est si vive que ce procédé, pour la rendre électrique, est beaucoup plus commode que le frottement.

M. Dessaignes a remarqué, dans l'espèce et l'intensité de l'électricité acquise par la tige plongée, des variations qui lui ont paru tenir à l'état d'humidité de température et de pression de l'atmosphère. Si l'électroscope dont il a fait usage a été d'une sensibilité suffisante pour que ces variations soient bien certaines, on pourrait, avec quelque vraisemblance, les attribuer uniquement à l'état hygrométrique de la surface des tiges, qui, selon ses rapports avec celui de l'atmosphère environnante, leur ferait émettre ou condenser des vapeurs; en effet, Volta, et plusieurs autres physiciens après lui, ont affirmé que les vapeurs aqueuses, en se formant, absorbent de l'électricité vitrée.

La séparation brusque des particules des corps, lorsqu'on

l'observe dans l'obscurité, est souvent accompagnée d'un dégagement de lumière plus ou moins durable. Cet effet s'observe, par exemple, lorsqu'on écrase du sucre, même lorsque le sucre est plongé dans l'eau. Il est alors subit comme le choc qui le produit. La phosphorescence est plus durable dans la craie, lorsqu'on l'écrase avec un marteau. Ne pourrait-il pas se faire que la lumière ainsi dégagée fût, lorsqu'elle est subite, l'indice d'une décomposition des électricités naturelles? Par exemple, lorsque l'on sépare rapidement, dans l'obscurité, les feuillettes d'une lame de mica de Sibérie, dont on a préalablement fixé les extrémités à des tiges isolantes, on voit un vif éclair bleuâtre paraître sur les surfaces qui se quittent. Or, si l'on présente ces surfaces à l'électroscope, après leur séparation, on trouve, comme l'a observé M. Becquerel, que l'une est électrisée vitreusement et l'autre résineusement. Pourquoi n'en serait-il pas de même dans les autres cas de séparation violente? Des quantités d'électricités trop faibles pour être sensibles à nos meilleurs électroscopes sont peut-être encore capables de dégager, par leur développement, une lumière sensible aux yeux.

L'exposé même que je viens de faire, de ces diverses expériences, montre que le développement des principes électriques est encore un phénomène très-obscur; mais il doit en même temps faire sentir que l'examen de ce phénomène offre un des plus beaux sujets de recherche qu'un physicien puisse se proposer.

CHAPITRE XV.

Du développement de l'Électricité par le simple contact.

Nous allons maintenant nous occuper du développement de l'électricité par le simple contact. Cette partie de la physique, créée depuis seulement trente années, nous offrira le contraste d'une grande découverte due au hasard, et d'une découverte plus grande encore obtenue directement, et conduite à son dernier terme par les expériences et les inductions les plus rigoureuses.

Ce fut vers 1789 que les premières observations de ce genre se présentèrent. Galvani, professeur de physique à Bologne, faisait des recherches sur l'excitabilité des organes musculaires par l'électricité. Il employait à ces épreuves des grenouilles tuées et écorchées, dont il coupait la colonne dorsale, pour isoler et mettre à nu les nerfs lombaires, comme le représente la *fig. 48 bis*. En outre, pour pouvoir les manier facilement, il avait passé dans la portion restante E de la colonne dorsale, un fil de cuivre recourbé en crochet. Il arriva par hasard qu'un jour il suspendit plusieurs cadavres de grenouilles, par ces crochets de cuivre, au balcon de fer d'une terrasse; à l'instant leurs pieds et leurs jambes, qui posaient aussi en partie sur le fer, entrèrent en convulsion spontanée; et l'effet se répéta autant de fois qu'on réitéra le contact. Galvani saisit habilement l'importance de ce phénomène, et s'efforça d'en déterminer les circonstances essentielles. Il vit d'abord qu'au lieu de tenir la grenouille à la main, on pouvait la poser sur une plaque de fer, et qu'en appliquant sur ce fer le crochet de cuivre, les convulsions se manifestaient encore. Il reconnut ensuite que tout se réduisait à établir entre les muscles et les nerfs de la grenouille une communication par un arc métallique. Il observa que les convulsions s'excitaient encore quand cet arc était d'un seul métal, mais qu'elles étaient alors très-rares et très-faibles, et que, pour les rendre fortes et durables, il fallait employer le contact de deux métaux différens. Cette condition remplie, on pouvait compléter la communication par des substances quelconques, pourvu qu'elles fussent conductrices de l'électricité. Il fit entrer dans la chaîne de communication d'autres parties animales, et même des personnes vivantes qui se tenaient par la main; les convulsions se manifestèrent encore. Or, Galvani avait récemment reconnu que l'électricité développée par les procédés ordinaires, produisait des effets pareils sur les organes des grenouilles, quand ils étaient exposés à son influence. L'analogie la plus évidente semblait donc devoir le porter à imaginer que les convulsions produites par le contact des métaux hétérogènes étaient aussi l'effet de quelque courant électrique

que ce contact développait. Toutefois, il n'en tira point cette conséquence si simple ; il crut y voir l'effet extraordinaire d'une nouvelle source d'électricité, qu'il appella l'*électricité animale*, et qui, existant primitivement dans les muscles et dans les nerfs, circulait quand on mettait ces parties en communication par un arc métallique, ou en général par de bons conducteurs de l'électricité. Galvani essaya vaguement d'assimiler cette action à celle de la bouteille de Leyde ; mais, en lisant l'ouvrage même où il a exposé cette hypothèse, et qui est intitulé, *De Viribus electricitatis in motu musculari Commentarius*, on s'aperçoit aisément qu'il n'avait aucune connaissance de la vraie Théorie des influences électriques ; et, en s'expliquant ainsi, comment il s'est laissé entraîner à des idées systématiques dépourvues de netteté et de rigueur, on n'en est que plus porté à admirer la sagacité rare, et le véritable génie qui lui a fait saisir, comme par divination, et varier, avec tant d'art, le phénomène extraordinaire des convulsions, en apparence spontanées, dont le hasard l'avait rendu témoin.

Lorsque ces nouveaux phénomènes furent connus en Italie, ils y excitèrent une admiration générale, et tous les esprits se portèrent vers les vues de Galvani. Mais Volta ne les eut pas plus tôt répétés, qu'il y reconnut des indications toutes différentes ; et l'on peut dire que le hasard même, en les faisant succéder aux effets sensibles d'influences électriques artificielles, avait, pour ainsi dire, pris soin d'en indiquer, par ce rapprochement, la véritable source. Aussi Volta n'hésita-t-il point sur sa nature ; mais, concevant que la cause d'excitation de ces mouvemens, quelle qu'elle fût, devait être très-subtile, puisqu'elle s'était produite indépendamment de la volonté même de l'observateur, il se mit d'abord à chercher, par des expériences exactes, quelle quantité précise d'électricité était nécessaire pour exciter des convulsions dans les organes des grenouilles, en les traversant par décharge. Il reconnut ainsi que cette quantité était excessivement faible, tellement qu'elle suffisait à peine pour faire diverger sensiblement les pailles de l'électroscope délicat dont il se servait. Ce résultat étant

Bien établi, il le rapprocha de cet autre fait établi par les expériences de Galvani même, que le contact de deux ou de plusieurs métaux hétérogènes était, ou du moins paraissait jusqu'alors être nécessaire à l'excitation des convulsions; et il en tira cette conséquence, que le contact même des métaux hétérogènes était la circonstance jusqu'alors inaperçue, mais réelle, qui déterminait le développement subit de l'électricité. En suivant cette idée vraiment fondamentale, Volta rassembla sous un même point de vue toutes les expériences déjà faites par Galvani, et il indiqua les moyens d'en reproduire les effets d'une manière sûre, avec le plus haut degré d'énergie dont elles étaient susceptibles. En essayant l'application de divers métaux, il reconnut que le meilleur excitateur était le zinc mis en contact avec l'argent ou le cuivre, quoiqu'on pût produire aussi les convulsions avec un arc hétérogène composé de deux métaux quelconques.

D'après l'ensemble de ces observations, la meilleure préparation pour répéter l'expérience de Galvani est la suivante : prenez une grenouille, et après avoir coupé son corps transversalement au-dessous des bras, dépouillez promptement ses jambes et ses cuisses de la peau qui les recouvre; retranchez ensuite toutes les chairs et toutes les parties qui recouvrent les nerfs lombaires désignés par NN dans la *fig. 49*; puis, coupez la colonne dorsale de manière que les jambes et les cuisses restent suspendues uniquement par ces nerfs. Alors enveloppez-les d'une petite feuille de cuivre ou de zinc; posez la grenouille ainsi préparée sur un support isolant, par exemple, sur une plaque de verre vernie à la gomme laque; et, prenant un morceau de tout autre métal recourbé en forme d'arc, posez une des extrémités sur l'armature des nerfs, et l'autre extrémité sur les muscles des cuisses; aussitôt vous verrez les convulsions se manifester, non-seulement dans la cuisse et la jambe que vous aurez touchée, mais encore dans l'autre. Ces convulsions cessent quelque temps après la mort, et elles cessent d'autant plus vite, qu'elles ont été plus excitées. Mais, dans le premier moment de leur affaiblissement, on peut les ranimer par l'application de tous les excitans qui exaltent l'irritabilité

animale. Il en est de même, au reste, des convulsions que l'on produit sur les organes des grenouilles par l'influence à distance de l'électricité ordinaire; et il en résulte seulement que ces organes, lorsque leur irritabilité subsiste encore, sont des indicateurs sensibles aux plus petites décharges d'électricité.

Conduit par l'idée fondamentale qui lui avait donné le secret de ce genre d'action, Volta rattacha aux expériences de Galvani plusieurs phénomènes de sensation, auxquels on n'avait pas fait assez d'attention jusqu'alors, sans doute à cause de leur isolement, mais qui, convenablement examinés, se rapportaient, de la manière la plus évidente, à l'action irritante excitée par le contact mutuel de plusieurs métaux. Par exemple, il fit revivre une expérience que l'on trouve dans un ancien ouvrage intitulé *Théorie du plaisir*, et qui est extrêmement propre à montrer cette influence. On prend deux pièces de métaux différens; le mieux est que l'une soit d'argent ou de cuivre, et l'autre de zinc. On pose l'une de ces pièces au-dessus, l'autre au-dessous de la langue, de manière qu'elles la débordent un peu en avant. Tant que les pièces ne se touchent point, on n'en reçoit aucune sensation particulière. Mais, lorsqu'on les met en contact, il s'excite une saveur tout-à-fait analogue à celle du sulfate de fer. Ici, d'après Volta, l'électricité est développée par le contact mutuel des deux pièces; et c'est la surface de la langue, couverte de papilles nerveuses extraordinairement sensibles, qui lui sert de conducteur. Quelquefois encore l'excitation se transmet à d'autres nerfs; et, si l'on est dans l'obscurité, l'on voit une sorte d'éclair passer subitement dans les yeux. Toutes les parties sensibles de l'homme et des animaux peuvent être irritées de la même manière. Cette faculté d'entrer en convulsion sous l'influence des métaux en contact est devenue, pour l'anatomie, un moyen aussi sûr que délicat, pour découvrir l'existence des fibres nerveuses les plus subtiles, dans les diverses parties des organes des animaux.

Galvani chercha à soutenir son opinion d'une électricité animale contre le professeur de Pavie; il lui objecta les convu-

sions excitées par un arc d'un seul métal, et il s'efforça d'en varier les circonstancs. Par exemple, après avoir promptement préparé une grenouille, comme nous l'avons dit tout-à-l'heure, si on la jette aussitôt sur un bain de mercure bien nettoyé, de manière qu'elle le touche par ses nerfs et par ses muscles, il se manifeste ordinairement des convulsions. Volta répondit que, dans cette circonstance même, il pouvait y avoir quelque hétérogénéité entre les diverses parties de l'arc conducteur, soit sur la surface du mercure, soit par le contact des métaux dont on s'est servi pour préparer l'animal. En effet, les plus petites différences dans les substances employées pour former la chaîne suffisent pour exciter des convulsions, qui avant ne se produisaient pas. Par exemple, si l'on arme les nerfs de la grenouille avec une lame de plomb impur, tel que celui dont les vitriers se servent, et que l'on achève la communication par un arc de même métal, pris dans la même feuille, et par conséquent d'une nature exactement pareille, on produit rarement des effets. Mais si on l'établit avec du plomb purifié, tel que celui dont les essayeurs se servent, l'armature restant la même, les convulsions se manifestent aussitôt; et même il suffit de frotter l'arc d'un seul métal contre un autre métal pour lui donner une hétérogénéité suffisante, comme M. Hallé l'a fait voir. Néanmoins Galvani ne se rendit point encore à ces remarques; il poussa la précaution jusqu'à préparer les organes de la grenouille avec des lames de verre effilées en couteau. Il obtint encore des convulsions par un arc d'un seul métal, mais seulement dans les cas que nous avons signalés, c'est-à-dire où l'irritabilité est extrêmement vive. Enfin, après avoir préparé la grenouille avec toutes ces précautions, il réussit à produire les contractions par le seul contact des muscles et des nerfs de l'animal même, sans avoir besoin d'employer aucune autre substance quelconque pour compléter l'arc conducteur (1). Mais

(1) Pour obtenir cet effet, il faut préparer rapidement la grenouille, comme je l'ai dit page 615; puis, la prenant d'une main par une de ses pattes, on la tient dans une situation renversée, de manière que

si, comme le dit Volta, et comme nous le prouverons tout-à-l'heure, il se développe de l'électricité par le seul contact mutuel de deux métaux, il est également possible qu'il s'en développe par le contact de deux substances hétérogènes quelconques, comme les muscles et les nerfs. Seulement, si cette action est beaucoup plus faible que celle d'un métal sur un métal, il faudra, pour la manifester, employer un électroscope d'une susceptibilité encore plus vive, et tel que les organes de la grenouille paraissent l'être dans les premiers instans qui suivent la mort. Le nouveau fait observé par Galvani, quoique extrêmement remarquable, ne conduit donc qu'à une généralisation de l'idée de Volta, bien loin de la renverser.

Il s'agit maintenant d'établir cette idée par l'expérience. Pour cela, Volta emploie deux disques métalliques, l'un de zinc, l'autre de cuivre, de cinq ou six centimètres de largeur, bien plans, non vernis, et ayant à leur centre des tiges isolantes perpendiculaires à leurs surfaces, par le moyen desquelles on peut les mettre en contact sans les toucher immédiatement. On approche ainsi ces disques l'un de l'autre, jusqu'à ce qu'ils se touchent, *fig.* 50; puis, on les sépare, en les retirant parallèlement; et l'on éprouve leur état électrique à l'aide d'un électroscope à pailles ou à lames d'or. Mais, comme l'électricité qui s'y développe par un seul contact est toujours extrêmement faible, on n'essaie pas isolément sa force répulsive sur l'électroscope; on arme celui-ci de son petit condensateur à plateaux vernis; puis on y accumule l'électricité de plusieurs contacts, en faisant communiquer son

les nerfs lombaires pendent isolés, sous le poids du petit tronçon de la colonne vertébrale qui y reste attaché. Alors, prenant dans l'autre main la patte libre, on la replie de manière à porter la cuisse en contact avec les nerfs lombaires. Aussitôt, si la grenouille était très-vive, les convulsions se manifestent. Néanmoins, il faut quelquefois essayer plusieurs individus avant de les obtenir. Je suis entré dans ces détails parce que cette expérience a été contestée, quoique le résultat en soit très-certain quand on prend les précautions que je viens d'indiquer.

plateau supérieur avec le sol, et touchant le plateau inférieur qui communique aux pailles, avec le disque métallique dont on veut éprouver l'électricité. Cela fait, on retire ce disque; on le touche ainsi que l'autre pour les remettre tous deux dans l'état naturel; on les replace de nouveau isolés et en contact; on les sépare, et l'on reporte au condensateur celui que l'on veut éprouver. Après sept ou huit contacts de ce genre, si l'on enlève le plateau supérieur du condensateur, les pailles divergent très-fortement en vertu de l'électricité déposée dans le plateau inférieur par les contacts successifs du disque métallique; on peut ainsi éprouver et reconnaître la nature de cette électricité. Pour que l'expérience réussisse, il faut que les plateaux du condensateur soient dévernissés sur les surfaces par lesquelles on y dépose l'électricité; car, dans cet état de faiblesse, le plus petit obstacle suffirait pour l'empêcher de s'y introduire. Il faut en outre, pour la rigueur, que chaque plateau soit fait du même métal que le disque avec lequel on le touche, autrement l'influence électrique de ce nouveau contact se combinerait avec l'effet du premier, et en modifierait le résultat. Néanmoins, quand on n'a pas la possibilité de remplir cette condition, on peut y suppléer encore en plaçant sur les plateaux, à l'endroit où on les touche, une petite bande de papier mouillée d'eau, ou de quelque liquide conducteur de l'électricité. Car, ainsi qu'on le verra tout-à-l'heure, le contact du papier imbibé de pareils liquides n'exerce pas sur les métaux une influence électrique sensible. Admettons que l'on ait pris ces précautions; et, pour fixer les idées, supposons que les deux disques soient, l'un de cuivre, l'autre de zinc. Si c'est le disque de cuivre qui a touché le plateau inférieur de l'électroscope, l'électricité qui fait diverger les pailles est résineuse; si l'on a touché avec le zinc, elle est vitrée. Ainsi, ces deux métaux, isolés et dans l'état naturel, se mettent, par leur simple contact, dans des états électriques différens: le zinc acquiert un excès d'électricité vitrée, et le cuivre l'excès complémentaire d'électricité résineuse.

On peut encore répéter l'expérience d'une autre manière. Ne faites pas communiquer les plateaux du condensateur

avec le sol ; laissez-les tous deux isolés sur l'électroscope ; mais, chaque fois que vous séparez les deux disques du contact, touchez en même temps chacun des plateaux avec celui des deux disques qui est fait de même métal que lui. Comme les électricités libres qu'ils possèdent sont de nature contraire, elles s'attireront mutuellement et se fixeront sur les surfaces contiguës des plateaux. Après quelques contacts de ce genre, séparez les plateaux, et chacun d'eux se trouvera chargé de l'espèce d'électricité qui convient au disque par lequel on l'a touché.

On pourrait croire que l'électricité qui se développe dans cette circonstance tient à une sorte de compression des plateaux l'un contre l'autre, comme celle qui se développe en général par la compression des substances hétérogènes. Mais il est facile de prouver que l'action développée au contact des métaux est d'une toute autre espèce, et est excitée par une influence réciproque qui décompose leurs électricités naturelles. Pour établir ce fait capital, Volta fait l'expérience suivante. Il forme une lame métallique avec deux morceaux C, Z, *fig.* 51, l'un de zinc, l'autre de cuivre, soudés bout à bout. Puis, prenant entre les doigts l'extrémité de la lame qui est de zinc, il touche, avec l'autre extrémité, qui est de cuivre, le plateau supérieur d'un condensateur qui est aussi de cuivre, et dont le plateau inférieur communique avec le sol. Après le contact, si l'on enlève le plateau touché, on le trouve électrisé résineusement. Ceci n'a rien qui ne soit conforme aux expériences précédentes ; seulement l'on n'a plus à craindre l'effet d'une pression ou d'une séparation entre les molécules du zinc et celles du cuivre, puisque leur juxtaposition est établie d'une manière permanente, et que le contact sur le condensateur s'opère entre cuivre et cuivre, ce qui ne peut développer aucune nouvelle électricité. Pour que l'électricité, ainsi produite par un seul contact, soit très-marquée, il faut que le condensateur soit beaucoup plus large que celui de l'électroscope, et que sa force condensante soit considérable.

On obtient encore des effets pareils, sans toucher la lame de zinc avec les doigts, et en la tenant seulement par des tiges de verre ou d'autre substance isolante. Mais alors, comme

cette lame ne communique plus au sol, il faut la mettre en contact avec quelque corps d'une grande capacité, dont elle puisse tirer l'électricité qu'elle doit fournir au plateau collecteur du condensateur. C'est à quoi l'on parvient, soit en donnant beaucoup de surface à la lame de zinc, soit, ce qui vaut mieux encore, en lui faisant toucher l'intérieur d'une grande bouteille de Leyde armée en dedans par une feuille de zinc, et dont la surface extérieure, armée aussi d'un métal quelconque, est mise en communication avec le sol.

Cette épreuve faite, on la répète en sens inverse. On prend entre les doigts l'extrémité de la lame qui est de cuivre, et l'on touche avec l'autre extrémité, qui est de zinc, le plateau supérieur du condensateur, qui est aussi de cuivre, *fig. 52*. Lorsqu'on détruit le contact et qu'on enlève le plateau touché, il n'a point acquis d'électricité, quoique le plateau inférieur communique au réservoir commun. Pourtant, dans cette expérience, le cuivre et le zinc communiquent encore ensemble et se touchent encore comme précédemment. La seule différence, c'est qu'alors les deux morceaux de cuivre qui communiquaient au zinc étaient situés consécutivement; tandis que, dans la seconde expérience, ils sont situés des deux côtés opposés du zinc. Cette opposition est donc ici une condition suffisante pour empêcher le condensateur de se charger. De là Volta a cru devoir conclure que la cause inconnue qui développe l'électricité dans le contact du zinc et du cuivre agissait comme une force motrice attractive ou répulsive, qui s'exercerait du zinc sur le cuivre, et du cuivre sur le zinc. Selon lui, dans la première expérience où les deux pièces de cuivre sont d'un même côté du zinc, cette force peut s'exercer, et l'électricité qu'elle développe se répand sur le plateau de cuivre du condensateur. Mais, dans la seconde expérience, où le zinc se trouve entre deux cuivres, l'action *électromotrice*, quelle que soit sa nature, s'exerce également des deux côtés du zinc; il ne doit donc pas se développer d'électricité.

Cette explication satisfait aux circonstances générales du phénomène; mais elle n'en est pas l'expression pure, encore moins la déduction nécessaire. Tout ce que l'expérience de

Volta montre, c'est que le zinc et le cuivre manifestent, dans l'état de contact, une propriété pareille à celle qu'offrent, en général, tous les corps hétérogènes, quand on les frotte l'un contre l'autre. Les deux électricités ne peuvent pas s'y maintenir en équilibre, dans les rapports qui constituent l'état naturel des corps. Si les deux métaux sont isolés, il faut que le zinc ait un excès déterminé d'électricité vitrée, et le cuivre l'excès correspondant d'électricité résineuse. Alors, par une conséquence naturelle, quand on fait communiquer le cuivre avec le sol, le zinc restant toujours isolé, il arrive la même chose que nous observons quand on fait communiquer au sol les frottoirs de la machine électrique, le plateau restant dans l'état d'isolement. L'électricité résineuse, qui est en excès dans le cuivre, se perd dans le sol; et le zinc acquiert un nouvel excès d'électricité vitrée, qui complète son état d'équilibre dans cette circonstance. L'excès total qui en résulte, non-seulement se répand sur toute la surface du zinc, mais peut encore se propager, et se propage en effet sur tous les corps conducteurs dont la nature est telle, qu'en touchant le zinc, ils ne troublent point l'équilibre de ses électricités naturelles; de même que l'excès d'électricité vitrée développé par la friction sur le plateau de la machine électrique se répand sur les conducteurs voisins. Et la quantité ainsi transmise par communication est encore limitée, dans les deux cas, de la même manière, par la condition que les forces répulsives exercées par les charges des deux corps sur les points où ils communiquent soient égales entre elles. Maintenant, plaçons le zinc Z entre deux pièces de cuivre C, C' , *fig.* 53, dont l'une C communique au sol. Alors, les relations du zinc avec cette pièce seront telles que nous venons de les décrire tout-à-l'heure; c'est-à-dire que la pièce de cuivre C sera dans l'état naturel, et que le zinc Z aura un excès d'électricité vitrée, que nous pouvons représenter par $+e$. Maintenant, si ce même zinc eût été en contact, par son autre face seule, avec l'autre pièce de cuivre C' , et que celle-ci eût communiqué directement au sol, la charge du zinc eût encore été la même, et représentée par $+e$, tandis que celle du cuivre C' eût été nulle,

à cause de sa communication avec le sol. Or, cette communication existe en effet à travers le système du zinc et du cuivre inférieur; ainsi, rien n'empêche la pièce de cuivre C' de tirer du sol, à travers ce système, l'électricité vitrée dont elle a besoin pour neutraliser l'excès d'électricité résineuse que le zinc lui imprime par son contact, et pour se mettre ainsi dans les conditions qu'exige l'équilibre électrique, lorsque le cuivre communiquant au sol est en contact avec le zinc. Nous avons vu, par la première expérience, que ces conditions mettent le cuivre dans l'état naturel lorsque le zinc a $+e$; tel sera donc aussi l'état du cuivre supérieur C' dans cette circonstance; de sorte que l'équilibre électrique du système entier sera exprimé de la manière suivante, où le signe $+$ désigne un excès d'électricité vitrée :

Pièce de cuivre supérieure C' posant sur le zinc. . . 0

Pièce de zinc Z , inférieure à C' et posant sur C . . . $+e$

Pièce de cuivre inférieure C communiquant au sol. . . 0

On voit donc, par cette analyse du phénomène, qu'en effet un pareil système ne peut communiquer aucun excès de charge au condensateur, lorsqu'on le tient à la main par la partie C , et qu'on touche avec la partie C' le plateau collecteur du condensateur, supposé pareillement de cuivre; et, pour arriver à ce résultat, nous n'avons eu besoin d'aucune hypothèse; il ne nous a fallu qu'exprimer nettement, et appliquer avec précision, la condition de l'équilibre électrique donnée par la première expérience, où le zinc supérieur est seul en contact avec un cuivre inférieur communiquant au sol. On verra plus loin que le même genre de considération résout, avec la même facilité, plusieurs autres cas dans lesquels une action électrique a lieu, quoique le zinc soit en contact plus ou moins parfait avec deux morceaux d'un même métal : de sorte que ces phénomènes, qui ont été quelquefois présentés comme opposés à l'idée du développement de l'électricité par le contact des substances hétérogènes, en deviennent au contraire autant de confirmations, quand ils sont envisagés sous leur point de vue véritable.

D'après cette manière de voir, lorsque l'on touche le con-

densateur avec l'extrémité cuivre d'une lame cuivre et zinc, dont l'extrémité zinc communique au sol, comme dans la *fig. 51*, la charge d'électricité que le plateau collecteur acquiert ne doit pas dépendre de l'étendue des surfaces de contact du cuivre et du zinc, mais seulement de la force répulsive qu'exerce l'électricité lorsqu'elle est en équilibre à ces surfaces; de sorte que toutes les lames, grandes ou petites, doivent communiquer au même condensateur des quantités d'électricités égales entre elles. C'est en effet ce que l'expérience confirme. Néanmoins, cette égalité ne doit avoir lieu qu'entre les charges totales et définitives; car, quant au progrès de la charge, il doit être plus rapide avec de larges surfaces de contact qu'avec de petites surfaces. Mais l'excessive vitesse de circulation de l'électricité à travers les métaux rend cette différence insensible, parce que la charge du condensateur se fait toujours dans un temps si court qu'elle paraît absolument instantanée; et alors elle semble aussi toujours égale. Au reste, peut-être n'a-t-on pas cherché avec assez de soin à y reconnaître de très-petites différences. Il ne serait pas impossible que la forme de la surface de contact, si elle était fort petite, influât sur les conditions de l'équilibre, en donnant à la couche électrique une configuration qui rendît sa force répulsive beaucoup plus forte ou beaucoup plus faible, ce qui augmenterait ou diminuerait la quantité absolue des deux électricités qui pourraient y être maintenues à l'état de séparation. C'est du moins une question qu'il importerait d'examiner; et il serait facile de le faire, en amincissant la lame de cuivre et celle de zinc à leur point de jonction, jusqu'à les y réduire en de simples fils; ou en leur donnant la forme de deux surfaces convexes tangentes l'une à l'autre en un seul point.

Les métaux et un grand nombre de substances non métalliques agissent sur leurs électricités naturelles, comme le zinc et le cuivre, quand on les met en contact les unes avec les autres, et il est extrêmement vraisemblable que cette propriété s'étend avec des degrés divers à tous les corps de la nature. Parmi toutes les combinaisons que l'on en peut faire, il y en aura donc où le développement de l'électricité sera le plus

énergique, et d'autres où il sera plus faible, ou même insensible. Dans la première classe sont les métaux hétérogènes, lorsqu'on les met en contact les uns avec les autres; dans la dernière se trouvent l'eau pure, les dissolutions salines, et même les liqueurs acides mises en contact, soit entre elles, soit avec des métaux.

Pour vérifier cette propriété, prenons un tube de verre ouvert à ses deux extrémités; fermons l'une d'elles avec un bouchon de cuivre terminé inférieurement par une tige de même métal, qui se prolonge au-dehors, comme le représente la *fig. 54*. Puis, remplissons le tube avec un des liquides dont nous venons de parler, par exemple avec de l'eau ou des dissolutions salines, ou même un acide; nous aurons ainsi un assemblage exactement pareil à celui des lames de zinc et de cuivre soudées au bout l'une de l'autre. Mais la propriété électromotrice sera incomparablement plus faible. Car, si nous l'éprouvons de la même manière, en touchant avec le doigt le liquide du tube, et portant la tige de cuivre sur le plateau du condensateur, ce qui est précisément le même mode que dans la première expérience, nous aurons beau répéter le contact, le plateau touché ne prendra jamais une quantité appréciable d'électricité; et cela arrivera ainsi même quand le liquide contenu dans le tube agirait chimiquement sur le bouchon de cuivre avec une grande énergie; à moins que l'on n'employât de très-grandes masses de liquide et de métal agissant violemment l'une sur l'autre, par exemple, plusieurs kilogrammes d'acide sulfurique et de limaille de fer. Car MM. Lavoisier et Laplace ont observé qu'alors il se développe assez d'électricité pour charger un condensateur jusqu'à en obtenir des étincelles; soit que le dégagement de cette électricité résulte de l'acte même de la combinaison chimique, ou de la simple friction des particules en effervescence les unes sur les autres, et contre les parois du vase, alternative qui paraît très-difficile à décider. Mais il est évident que le développement d'électricité qui s'opère alors est un phénomène différent de celui que produit le contact des métaux, ou en général des substances hétérogènes; puisque, dans cette dernière

circonstance, les plus petites quantités de ces substances soudées ensemble, et qui ne produisent l'une sur l'autre aucune altération sensible, communiquent au condensateur autant d'électricité que les plus grandes masses; et, pour mettre cette distinction dans la dernière évidence, il n'y a qu'à répéter les deux opérations avec des masses du même ordre, qui soient alternativement toutes deux métalliques, ou l'une métallique et l'autre liquide; car on trouvera que l'effet de ce dernier système est, relativement à l'autre, absolument inappréciable.

Mais, par cela même, les liquides peuvent servir pour transmettre l'action réciproque du cuivre et du zinc, sans l'affaiblir par leur contact. Ainsi, par exemple, en reprenant la seconde expérience, *fig. 52*, où le zinc était entre deux cuivres, dont l'un communiquait au sol, nous avons vu qu'en vertu des conditions d'équilibre électrique propres à un pareil système, les deux cuivres devaient être dans l'état naturel, de sorte que le condensateur ne se chargeait point. Mais il se chargera si, entre le zinc et le plateau collecteur, qui est de cuivre, on interpose une couche d'un liquide conducteur, par exemple, une goutte d'eau ou un papier humecté de quelque dissolution saline. En effet, ce corps intermédiaire pouvant demeurer en contact avec le zinc et avec le plateau de cuivre, sans y nécessiter aucun développement de leurs électricités naturelles, il en résulte qu'il ne fait que servir de conducteur de l'un à l'autre, en même temps qu'il empêche leur contact immédiat par son interposition. Ainsi, en supposant que le premier cuivre communique au sol, les conditions de l'équilibre électrique du système seront les mêmes que si le zinc était isolé dans l'air, c'est-à-dire, que le zinc aura, sur le premier cuivre, le même excès d'électricité vitrée $+e$ qu'il aurait eu dans cette circonstance. Mais en outre, comme il est, par son autre surface, en contact avec un système de conducteurs dans lesquels son excès d'électricité peut librement se répandre, elle s'y propagera en effet; et ainsi le condensateur se chargera, jusqu'à ce que la quantité d'électricité, qui n'est point dissimulée dans le plateau collecteur, fasse équilibre, par sa force répulsive, à l'électricité $+e$ du

zinc. C'est en effet ce que l'expérience confirme parfaitement. Par conséquent, si l'on fait adhérer ensemble, par une forte pression, deux plaques circulaires, l'une de zinc, l'autre de cuivre; et si, après avoir posé ce couple sur la main par le côté cuivre, on recouvre sa face zinc avec un conducteur humide dont le contact ne trouble point son état électrique propre, par exemple, avec une rondelle de drap imbibée d'eau ou d'une dissolution saline, tous les corps conducteurs que l'on mettra au-dessus de ce système partageront l'excès d'électricité vitrée de la face zinc et du corps humide qui la recouvre. Si donc, sur ce premier système, on en pose un autre pareil, de manière que sa face cuivre pose sur la rondelle humide, ce second système partagera d'abord, comme corps conducteur, l'excès d'électricité vitrée de la première face zinc; et en outre, la seconde pièce de zinc prendra un nouvel excès d'électricité, également vitrée, déterminé par la condition de son contact avec le cuivre auquel elle adhère. En ajoutant ainsi successivement plusieurs systèmes semblables les uns sur les autres, on aura un appareil dans lequel l'état électrique des pièces successives ira en augmentant de bas en haut, avec le nombre des couples superposés.

Tel est l'admirable instrument universellement connu aujourd'hui sous le nom de *pile voltaïque*, et dont la physique et la chimie ont obtenu de si étonnans résultats. Pour bien concevoir ses effets, il faut avoir analysé d'une manière précise l'état électrique dans lequel se mettent les diverses pièces qui le composent, ainsi que les changemens qui peuvent y survenir lorsque l'on met quelques-unes d'entre elles en communication avec le sol ou avec un condensateur. C'est ce que nous ferons dans les chapitres suivans.

CHAPITRE XVI.

Théorie de l'appareil voltaïque, en y supposant la conductibilité parfaite.

CONSIDÉRONS d'abord une seule pièce formée d'une plaque de zinc adhérente à une plaque de cuivre de dimensions égales,

et mettons la face cuivre en communication avec le sol. Cette face sera alors dans l'état naturel; mais la face zinc se couvrira d'une couche d'électricité vitrée libre, dont je représenterai par $+ 1$ la quantité totale. La valeur de cette unité dépendra de l'étendue des deux plaques, et sera proportionnelle à leur surface.

La face cuivre communiquant toujours au sol, on pose sur la face zinc une rondelle de drap imbibée d'eau salée, ou de tout autre liquide conducteur qui, dans le contact, ne s'électrise que par partage. Alors l'électricité libre de la face zinc se répandra sur la surface de ce conducteur; mais comme il faut toujours que le zinc possède l'excès d'électricité vitrée que son contact avec le cuivre exige, il le reprendra au cuivre, et celui-ci au sol. Tout ceci est un simple résumé des expériences rapportées dans le chapitre précédent.

Les choses restant dans cet état, on prend une nouvelle pièce cuivre et zinc pareille à la première; et, après avoir touché sa face cuivre, on l'isole; puis on pose cette face sur la rondelle humide, comme le représente la *fig.* 55. Alors, selon la théorie de Volta, il s'opère deux actions: 1°. la face zinc de cette seconde pièce conserve l'excès d'électricité vitrée $+ 1$ qu'elle tient de son contact avec le cuivre; 2°. le système entier de la pièce partage l'électricité libre de la rondelle, comme ferait tout autre corps conducteur. La rondelle reprend cette électricité au zinc inférieur, celui-ci au cuivre, et le cuivre au sol; de sorte qu'après un temps qui doit être infiniment petit, si la conductibilité est parfaite, il s'établit un état électrique stable, dans lequel les quantités d'électricité libres sont telles que le représente le tableau suivant:

Couple supérieur	}	face zinc z_2 adhérente à c_2	$+ 2$
		face cuivre c_2 communiquant à la	
		rondelle humide	$+ 1$
Couple inférieur	}	face zinc z_1 adhérente avec c_1	$+ 1$
		face cuivre c_1 communiquant au sol.	0

Sur ce système, posez une seconde rondelle, puis un troisième couple cuivre et zinc, de la même manière, *fig.* 56. La pièce zinc de ce nouveau couple conservera l'excès d'électricité

vitrée + 1 qu'elle tient de son contact avec le cuivre ; mais en outre elle partagera, comme corps conducteur, l'électricité libre des pièces inférieures qui se réparera aux dépens du sol ; et, quand l'état électrique sera devenu stable, on aura

$$\begin{array}{l}
 \text{Couple 3} \left\{ \begin{array}{l} \text{face zinc } z_3 \text{ adhérente à } c_3 \dots\dots\dots + 3 \\ \text{face cuivre } c_3 \text{ communiquant à la rondelle} \\ \text{humide } r_2 \dots\dots\dots + 2 \end{array} \right. \\
 \text{Couple 2} \left\{ \begin{array}{l} \text{face } z_2 \text{ adhérente à } c_2 \dots\dots\dots + 2 \\ \text{face cuivre } c_2 \text{ communiquant à la rondelle} \\ \text{humide } r_1 \dots\dots\dots + 1 \end{array} \right. \\
 \text{Couple 1} \left\{ \begin{array}{l} \text{face zinc } z_1 \text{ adhérente à } c_1 \dots\dots\dots + 1 \\ \text{face cuivre } c_1 \text{ communiquant au sol. } \dots\dots + 0 \end{array} \right.
 \end{array}$$

En continuant toujours la superposition des couples de la même manière, les quantités d'électricité vitrée libre croîtront de bas en haut, suivant une progression arithmétique.

Cette théorie suppose que la transmission de l'électricité s'opère à travers les rondelles humides sans aucun affaiblissement. C'est le cas d'une conductibilité parfaite. On y admet, en outre, que les liquides interposés entre les élémens métalliques ne s'électrisent absolument que par partage, ou au moins que, si leur contact modifie la libre distribution de l'électricité, le changement qu'ils y occasionnent est assez faible pour pouvoir être négligé. Enfin, dans le passage d'un élément à un autre, on introduit une troisième donnée ; c'est que l'excès d'électricité + 1 que le zinc prend au cuivre est constant pour ces deux métaux, soit qu'ils se trouvent dans l'état naturel ou non. Cette dernière supposition est la plus simple que l'on puisse faire ; mais toutefois ce n'est qu'une supposition dont les expériences fondamentales rapportées plus haut ne fournissent aucune preuve. J'ai ouï dire à Coulomb, qu'il avait vérifié cette loi, et qu'elle lui avait paru exacte. Il est clair qu'on ne peut l'établir avec exactitude qu'à l'aide de la balance électrique, et en mesurant les quantités d'électricités libres aux diverses hauteurs d'une pile ; mais cette observation est influencée par la conductibilité toujours imparfaite des conducteurs humides, et par plusieurs autres causes que nous

examinerons dans un des chapitres suivans. Quoi qu'il en soit, admettons d'abord l'équidifférence dont il s'agit comme la plus simple des lois imaginables, et cherchons à en développer les conséquences par le calcul.

Premièrement, si l'on touche d'une main la base de la pile, et que l'on porte l'autre main à son sommet, tous les excès d'électricité $+ 1$, $+ 2$, $+ 3$ des différentes pièces se déchargeront à travers les organes dans le réservoir commun. En supposant la transmission de l'électricité dans l'intérieur de la pile parfaitement libre, ou seulement très-rapide comparativement à sa transmission par les organes, cette décharge devra produire une commotion comme celle de la bouteille de Leyde, mais avec cette différence remarquable que la sensation en paraîtra continue. Car, la pile se rechargeant aux dépens du sol beaucoup plus vite que les organes ne peuvent la décharger, la pièce supérieure se retrouvera toujours presque aussi chargée qu'avant le contact. L'expérience confirme parfaitement ces indications. L'on peut aussi reproduire de la même manière, mais avec une intensité infiniment plus considérable, tous les phénomènes de saveur et de lumière qu'un seul couple de pièces nous a présentés.

Si l'on veut connaître dans ce cas la quantité d'électricité qui forme la décharge à chaque contact, il n'y a qu'à faire la somme des quantités d'électricité qui, d'après les déterminations précédentes, existent à l'état de liberté dans les diverses parties de l'appareil. Mais, pour simplifier cette évaluation, on peut supposer les rondelles humides infiniment minces, et négliger la quantité d'électricité qui se porte à leur contour extérieur; alors les quantités précédentes répandues sur les surfaces du cuivre et du zinc seront les seules qu'il s'agira de sommer. On trouve ainsi que leur somme est proportionnelle au carré du nombre des couples. Mais on verra plus loin que l'imperfection des conducteurs humides affaiblit extrêmement ce résultat.

Nous avons supposé la pile montée de cette manière : cuivre, zinc, humide, cuivre, etc., le premier cuivre communiquant au sol. Mais on pourrait aussi la monter en sens contraire,

zinc, cuivre, humide, zinc, en établissant la communication du sol avec le premier zinc. Dans ce cas, la théorie serait absolument la même, avec cette seule différence que notre unité $+ 1$ deviendrait négative, c'est-à-dire que les quantités d'électricité libre seraient de nature résineuse.

Au lieu de poser les plaques métalliques les unes sur les autres en colonne verticale, on peut les placer de champ, et parallèlement les unes aux autres sur des supports isolans, par exemple, sur des tiges de verre vernies. Alors, au lieu d'interposer entre elles des rondelles de drap qui se tiendraient difficilement verticales, on établit de l'une à l'autre des espèces de petites auges dont elles font les parois extrêmes, et l'on verse dans ces auges les liquides qui doivent servir de conducteurs; c'est ce qu'on nomme l'*appareil à auges*, *fig. 57*. On peut aussi souder ensemble, et bout à bout, des lames de cuivre et de zinc que l'on recourbe à leur point de soudure, de manière que chaque métal puisse plonger dans un vase de verre ou de porcelaine, rempli en parti d'un liquide conducteur. Une suite de vases semblables forme une chaîne électromotrice dont les extrémités peuvent être ramenées circulairement l'une auprès de l'autre pour la commodité des expériences; c'est ce que Volta nomme l'*appareil de tasses à couronne*. Nous examinerons plus tard les inconvéniens et les avantages qui sont propres à chacune de ces constructions; ici, il suffit d'en indiquer la disposition diverse. Quant à leur mode d'action électrique, il est exactement le même, et la théorie que nous venons d'exposer leur convient également.

Appliquons maintenant à la partie supérieure de la pile, ou en général à la dernière plaque de l'appareil, un condensateur dont le plateau inférieur communique avec le sol. Avant le contact, cette plaque, que je suppose toujours zinc, avait l'électricité vitrée libre, qui convenait à son rang dans la pile. Le condensateur lui en enlève une partie qu'elle reprend aussitôt à la pièce inférieure, celle-ci à la suivante, et ainsi de suite jusqu'à la dernière, qui reprend tout au sol. Ce mouve-

ment doit donc se continuer jusqu'à ce que la pièce supérieure ait repris la même quantité d'électricité libre qu'elle possédait d'abord, et qui convient à sa position. Ainsi le condensateur se chargera jusqu'à ce que son plateau collecteur ait la même tension que cette plaque.

Si la pile était montée en sens contraire, le zinc communiquant au sol, l'électricité libre à son sommet serait résineuse, et la charge du condensateur serait égale à la précédente, mais résineuse aussi.

De même que l'électricité de la colonne s'accumule dans le condensateur, elle s'accumulera dans l'intérieur d'une bouteille de Leyde ou d'une batterie électrique, dont l'extérieur communiquera au réservoir commun; et comme, à mesure que la pile se décharge, elle se recharge aux dépens de ce même réservoir, la batterie se chargera également, quelle que soit sa capacité, jusqu'à ce que la force répulsive de son électricité libre fasse équilibre à celle qui existe au sommet de la pile. Si l'on retire alors la batterie, elle donnera la commotion correspondante à ce degré de force répulsive; et c'est ce que l'expérience confirme.

Pour que l'action du condensateur sur la pile soit régulière, constante et aussi énergique qu'elle peut l'être, il faut avoir le plus grand soin d'établir entre ses plateaux et les pôles de la pile des communications parfaites; car les quantités d'électricité libres étant excessivement petites, le moindre obstacle suffit pour les arrêter ou pour ralentir considérablement leur propagation; et alors le condensateur prend beaucoup moins d'électricité qu'il ne ferait, si les communications étaient libres. C'est bien pis encore, si le mode de communication est lui-même variable, comme lorsqu'on tient le condensateur à la main, et qu'on se contente de poser sur le sommet de la pile le bouton de son plateau collecteur. Dans ce cas, si on l'applique plusieurs fois de suite à la même pile, les quantités d'électricité dont il se charge peuvent varier en un instant du simple au triple ou au quadruple; au lieu qu'avec un mode de communication plus uniforme, on y trouverait

une parfaite égalité. Or, c'est là ce qu'il est absolument nécessaire d'obtenir pour pouvoir connaître et mesurer l'état électrique de la pile d'une manière exacte.

Après bien des tentatives, voici la disposition d'appareil qui m'a paru la plus commode : sur une table solide je fixe par des vis un parallépipède de bois AB, *fig.* 58, revêtu d'une feuille d'étain. L'extrémité A de ce parallépipède porte un cône de métal tronqué par le haut et bien poli, sur lequel on pose la pile ; l'autre extrémité B porte une tige métallique verticale et mobile TT, terminée par un plateau métallique auquel on fixe solidement le pied du condensateur par une vis de métal. On peut ainsi amener cet instrument à la hauteur de la pile soumise à l'expérience, sans altérer l'exactitude des communications. Les disques dont je fais usage sont tous de dimensions égales, et chaque disque de zinc est serti, c'est-à-dire, serré de force et adhérent par un rebord au disque de cuivre correspondant. De cette manière, le contact est toujours parfaitement établi entre eux. On n'a que des couples à disposer les uns sur les autres, et ces couples peuvent être supposés identiques, lorsque les plaques sont neuves. Comme elles sont d'ailleurs bien dressées, il suffit, pour établir la pile, de les poser les unes sur les autres sans supports latéraux ; ce qui évite encore l'espèce de communication qui s'établit entre les pôles de la pile par l'isolement imparfait de ces supports, au grand détriment de l'appareil.

Enfin, pour établir constamment, et de la même manière, le contact du condensateur avec le sommet de la pile, je pose sur celle-ci un petit vase de fer rempli de mercure, et bien rettoyé par-dessous ; le bouton du condensateur et l'extrémité de sa tige flexible sont aussi en fer. De cette manière, lorsque l'instrument est amené à la hauteur de la pile, il suffit d'y laisser son bouton dans le mercure à l'aide d'un tube de verre verni ; après quoi, abandonnant la tige à sa propre élasticité, on est certain d'avoir un contact aussi égal et aussi instantané qu'il est possible. On peut ensuite, si l'on veut, le prolonger plus long-temps pour voir si le temps influe sur la charge du condensateur. Lorsque la tige est sortie du mercure,

on enlève le plateau collecteur bien parallèlement à lui-même; et on le touche avec la sphère fixe et isolée de la balance électrique. On remet celle-ci dans sa cage de verre; le disque mobile que je suppose dans l'état naturel vient la toucher, et est repoussé aussitôt à une certaine distance que l'on observe; ou bien encore, si l'on veut, on tord le fil de suspension jusqu'à ce que le disque soit ramené à une distance fixe de la sphère. Quel que soit celui de ces moyens qu'on adopte, comme le disque s'électrisera par le contact et aux dépens de la boule, l'angle de torsion mesurera le *carré* de la quantité d'électricité communiquée à la sphère par le condensateur, et à ce dernier par la pile. On pourra donc ainsi évaluer cette quantité fort exactement. Je me suis assuré qu'en faisant usage de cette méthode, on obtenait d'une suite d'expériences consécutives des résultats parfaitement comparables; ce qui est loin d'avoir lieu quand on néglige les précautions qui assurent la perfection et l'identité du contact du condensateur.

En comparant ainsi les charges obtenues avec des piles du même nombre d'étages, montées avec des conducteurs humides de nature diverse, on trouve que l'eau, les acides affaiblis, la plupart des dissolutions salines, en général les substances dont la conductibilité est énergique, donnent sensiblement les mêmes quantités d'électricité libre, et la donnent par un contact sensiblement instantané. Même, pour la plupart de ces conducteurs, on peut accroître ou diminuer extrêmement l'étendue de leur surface sans qu'il en résulte aucune variation appréciable dans la charge, sans doute à cause de la facilité presque infinie que leur surface offre à la transmission des courans électriques; mais cela suffit toujours pour prouver, conformément à l'opinion de Volta, qu'ils ne jouent absolument que le rôle de conducteurs, et que leur contact, ou leur action chimique, n'est pas la cause déterminante du développement de l'électricité. Néanmoins on trouve aussi des liquides avec lesquels les charges sont inégales, à même nombre d'étages, soit qu'ils affaiblissent trop la conductibilité par leur interposition, comme nous l'expliquerons par la suite, soit qu'ils modifient les conditions de l'équilibre électrique par

leur contact, ou par la nature des combinaisons qu'ils forment avec les autres parties de l'appareil. Toutes ces variétés se sont présentées dans les nombreuses expériences tentées par les physiciens lors des premiers temps de la découverte.

Dans les considérations précédentes, nous avons toujours supposé que l'appareil électromoteur communiquait par sa base au sol duquel il pouvait tirer toutes les quantités d'électricité libre nécessaires à l'équilibre de ses parties. Mais si l'on concevait que toutes les pièces qui le composent fussent placées originairement sur un isoloir, et que la colonne même, et l'observateur qui la forment, fussent isolés pendant qu'on la monte, alors les quantités d'électricité libre nécessaires à l'équilibre ne pouvant se tirer du sol, la pile se les prendrait à elle-même par la décomposition des électricités naturelles de ses plaques. Le pôle zinc aurait donc un excès d'électricité vitrée libre, compensé par un égal excès d'électricité résineuse au pôle cuivre; et, à partir de là, les quantités d'électricité libre iraient en décroissant jusqu'au milieu de la colonne qui serait dans l'état neutre. Il est visible, en effet, que, de cette manière, les conditions d'équidifférence d'une pièce à l'autre seraient satisfaites, et conserveraient le rang que nous leur avons assigné dans l'appareil non isolé. Ces considérations sont confirmées par l'expérience, au moins dans leurs résultats généraux; car toutes les piles, même après avoir été montées en communication avec le sol, se mettent d'elles-mêmes dans l'état que nous venons de décrire lorsqu'on les place pendant quelque temps sur un isoloir, parce que l'air qui les touche leur enlevant graduellement leur électricité libre, elles ne peuvent se recharger qu'aux dépens d'elles-mêmes, et les résultats de cette décomposition sont les seuls qui subsistent quand les quantités d'électricité qu'elles avaient primitivement tirées du sol ont été épuisées avec le temps. Dans cet état, les signes électroscopiques aux deux pôles de la pile sont très-faibles; et les condensateurs, même les plus forts, ne s'y chargent pas sensiblement. Ce phénomène est d'autant plus digne de remarque, qu'il ne s'accorde pas avec la théorie

de l'équilibre par équidifférence. Cette théorie indique bien que la charge du condensateur dans la pile isolée doit être moindre que dans la pile non isolée ; mais la proportion qu'elle assigne est bien éloignée de l'extrême faiblesse que l'expérience démontre.

En réfléchissant à cette discordance, j'ai été conduit à penser que l'action électrique de l'appareil électromoteur pourrait bien ne pas être due simplement aux quantités d'électricité libres qui paraissent sur ses élémens, comme Volta le supposait, mais qu'il pourrait y exister en même temps une très-grande quantité d'électricité dissimulée ; et comme cette considération changerait beaucoup la manière dont l'action de la pile devrait être envisagée, je vais l'exposer ici.

Reprenons d'abord les expériences fondamentales de Volta sur le développement de l'électricité par le simple contact de deux métaux isolés : que nous montrent-elles ? Qu'il se manifeste alors sur chacun d'eux une certaine quantité d'électricité libre et de nature opposée. Mais s'ensuit-il pour cela que ces quantités soient les seules qui se développent réellement dans le contact ? Non, sans doute ; et la décomposition des électricités naturelles des deux plaques, pendant le contact, pourrait être énorme sans produire d'autres indices extérieurs que ce x que nous avons observés. C'est ainsi que les deux faces d'un carreau de verre armé de métal peuvent être chargées de quantités d'électricité fort considérables, quoique les portions de ces électricités qui jouissent de leur force répulsive sur l'une et l'autre face soient néanmoins très-petites.

Dans cette manière de voir, deux disques de zinc et de cuivre mis en contact ressembleraient exactement à un pareil carreau, après qu'on l'a isolé, et lorsque l'action absorbante de l'air a égalisé les forces répulsives de ses deux faces. Seulement la lame isolante de verre serait remplacée par les forces inconnues, qui retiennent les deux électricités de part et d'autre de la surface du contact. Alors l'électroscope et la balance électrique ne rendraient sensibles que les portions d'électricité qui seraient libres des deux côtés de cette sur-

face ; et les quantités totales d'électricités dissimulées ne se manifesteraient qu'à l'instant où l'on établirait une communication directe entre les disques , de même que dans la bouteille de Leyde ou le carreau électrisé.

L'appareil de Volta deviendrait ainsi tout-à-fait analogue aux piles électriques que nous avons considérées dans le chapitre X. La disposition de l'électricité y serait exactement pareille , et la même théorie , les mêmes formules s'y appliqueraient. On peut , en effet , remarquer que les résultats auxquels nous sommes parvenus en considérant ces piles , offrent une représentation exacte des phénomènes électriques que produit l'appareil voltaïque , soit quand un de ses pôles communique au sol , soit dans l'état d'isolement. Cette manière de l'envisager aiderait à concevoir comment il peut exciter de si fortes commotions , et sur-tout des phénomènes chimiques que nous ne pouvons produire qu'en accumulant des quantités considérables d'électricité , soit par des batteries , soit au moyen de pointes d'une finesse extrême. C'est qu'en effet il y aurait aussi une très-grande quantité d'électricité développée dans l'action chimique de l'appareil électromoteur. Enfin , on concevrait alors pourquoi les piles , même les plus énergiques , lorsqu'elles sont isolées par leur base , ne communiquent presque pas d'électricité sensible au condensateur , tandis qu'elles donnent des charges considérables , et jusqu'à des étincelles , si l'on fait communiquer instantanément un de leurs pôles avec le sol : car les charges indiquées par le calcul , pour ces deux circonstances , auraient en effet entre elles une disproportion extrême , ce qui n'avait pas lieu dans la première manière de voir.

CHAPITRE XVII.

Effets chimiques de l'Appareil voltaïque.

APRÈS la continuité des commotions électriques , le premier phénomène chimique que l'on opéra avec la pile fut la décomposition de l'eau. Cette découverte est due à MM. Car-

lisle et Nicholson. Si l'on adapte aux pôles de l'appareil électromoteur des fils de platine qui se rendent dans un même vase de verre en partie rempli d'eau, on voit un courant continu de gaz oxigène se dégager du fil qui communique au pôle vitré, et en même temps un courant de gaz hydrogène se dégager de l'autre fil qui communique au pôle résineux. Si, au lieu de fils de platine, on emploie des fils de cuivre, d'argent ou de tout autre métal susceptible d'être facilement oxidé, l'hydrogène continue de paraître le long du fil résineux; mais l'oxigène ne se dégage plus sous forme de gaz, il se combine avec le fil vitré et l'oxide. Il est indifférent que la pile soit isolée ou non isolée.

Pour savoir si les deux gaz qui se dégagent sont réellement dans la proportion qui fait l'eau, il faut les recueillir et les mesurer. L'appareil le plus propre à cet usage est celui qui est représenté *fig. 59*. EE est un entonnoir de verre dont le bec B est fermé par un bouchon de liège, à travers lequel on a fait passer deux petits tubes de verre creux, distans d'environ un centimètre, et dont les extrémités, tant extérieures qu'intérieures, dépassent un peu les deux surfaces du bouchon. Chaque tube sert d'enveloppe à un fil de platine qui s'y trouve scellé avec de la cire d'Espagne; de sorte que le tube est parfaitement bouché. Le tout est disposé de façon que les deux fils s'élèvent parallèlement l'un à l'autre dans l'intérieur de l'entonnoir jusqu'à quatre ou cinq centimètres au-dessus de son fond. On verse de l'eau dans l'entonnoir, et on recouvre chaque fil par une petite cloche de verre pareillement remplie d'eau. Ensuite on fait communiquer les bouts extérieurs des fils, chacun avec un pôle de la pile, et l'appareil est disposé. On le laisse agir pendant quelque temps, après quoi on l'arrête et on mesure le volume des gaz dégagés sous chaque cloche. On y trouve deux fois autant d'hydrogène que d'oxigène en volume. Ce sont en effet les proportions qui constituent l'eau; car en rétablissant la combinaison par une étincelle électrique, au moyen du petit appareil décrit *fig. 40*, il ne reste aucun résidu gazeux. Afin de ne rien perdre de l'action de la pile, il faut que la communication des fils avec

les élémens extrêmes soit parfaitement établie. Pour cela, rien de plus commode que de les plonger dans un petit vase de verre rempli de mercure, où plongent aussi deux gros fils de fer scellés aux plaques extrêmes de l'appareil électromoteur.

Avec cet appareil, MM. Gay-Lussac et Thénard ont observé que la quantité de gaz dégagée dans un temps donné par une même pile, soit à rondelles, soit à auges, variait considérablement selon la nature des substances dissoutes dans l'eau dont l'entonnoir était rempli. Les dissolutions salines concentrées, les mélanges d'eau et d'acide ont donné les dégagemens les plus abondans, les plus rapides. Le produit a diminué à mesure que les proportions de sel ou d'acide sont devenues moindres; et enfin, lorsque l'entonnoir n'a plus contenu que de l'eau bouillie et parfaitement pure, il ne s'est presque plus dégagé de gaz. Il paraît que, dans ce cas, l'interposition de l'eau devient un obstacle suffisant pour empêcher la circulation du courant électrique d'un pôle de la pile à l'autre; car, si l'on introduit dans l'arc de communication les organes les plus sensibles, toutes les impressions qu'y produit ordinairement l'appareil voltaïque cessent, du moins quand la communication est établie à travers la masse même de l'eau. Ainsi l'eau pure, qui transmet une électricité forte, telle que celle que nous excitons par nos machines ordinaires, devient presque isolante pour les faibles forces répulsives que fournit l'appareil voltaïque. D'après cela, on peut appliquer ici les lois générales que nous avons trouvées relativement aux substances imparfaitement conductrices; c'est-à-dire que, pour une distance donnée des fils, l'isolement ne doit être parfait que jusqu'à un certain degré de force répulsive, déterminé par le nombre des plaques de l'appareil; et de même que, pour chaque support isolant, le degré de force répulsive où l'isolement parfait commence, est réciproque aux racines carrées des longueurs des supports, de même, pour chaque appareil électromoteur, il doit y avoir une certaine distance des fils à laquelle la communication sera tout-à-fait interrompue. On devra y retrouver également l'influence qu'exerce sur l'isolement le contact

plus ou moins étendu du support avec le corps isolé. Aussi MM. Gay-Lussac et Thénard ont-ils remarqué qu'en raccourcissant les fils au-delà d'un certain terme, les quantités de gaz dégagées dans un même liquide ont considérablement diminué ; mais elles ont augmenté de nouveau en substituant dans l'entonnoir un liquide plus conducteur. Ce défaut de conductibilité de l'eau peut être tout de suite rendu sensible par une expérience fort simple : ayant isolé une pile et placé des fils conducteurs à ses deux pôles, plongez ces fils dans un vase de verre rempli en partie d'eau commune ; aussitôt les gaz se dégageront en abondance. Si vous retirez de l'eau un de ces fils, et que, le prenant d'une main, vous plongiez l'autre main dans l'eau du vase, vous éprouverez la commotion comme à l'ordinaire. Mais au lieu de cela, établissez la communication par une colonne d'eau de 4 ou 5 millimètres de diamètre, et de 3 ou 4 centimètres de longueur, ce que vous pouvez faire en aspirant l'eau du vase avec un tube de ces dimensions que vous tiendrez à la bouche ; alors, quoique vos organes les plus sensibles se trouvent dans l'arc de communication, vous éprouverez à peine une faible saveur, mais non pas le plus léger frémissement. J'ai disposé ainsi une pile de 68 couples, dont les pôles communiquaient par des tubes non capillaires remplis d'eau distillée, et d'environ un mètre de longueur. L'appareil est resté monté pendant vingt-quatre heures, sans qu'il se soit dégagé un atome de gaz ; et, en essayant de communiquer d'un pôle de la pile à l'autre par le moyen des colonnes d'eau contenues dans les tubes, on n'éprouvait non plus aucune des sensations que l'appareil électromoteur produit ordinairement. En un mot, tout se passait comme si un corps isolant eût été interposé entre les deux pôles ; mais tous les effets reparaissaient dès que l'on communiquait immédiatement par la surface libre de l'eau (1). C'est pourquoi il aurait été à désirer que, dans les expériences de MM. Gay-Lussac et Thénard, avec l'eau distillée, on eût essayé d'étendre les fils sur la surface de l'eau de même ; car je pense que, dans

(1) Journal de Physique, an 9 (1800).

ce cas, la communication des deux pôles de la pile s'établirait.

MM. Gay-Lussac et Thénard ont cherché s'ils pourraient découvrir quelque rapport entre les quantités de gaz dégagées par une pile, et les quantités de sel mises dans l'eau de l'entonnoir; mais ils n'ont trouvé de relation simple que pour le sulfate de soude. Les quantités de gaz dégagées dans un temps donné sont à très-peu de chose près proportionnelles aux racines cubiques des quantités de ce sel qui sont contenues dans l'eau dont la décomposition s'opère. La dissolution de nitre a présenté un effet contraire; saturée de sel, elle a produit moins de gaz que non saturée. Mais il faut faire attention que la décomposition de l'eau n'est pas le seul phénomène qui s'opère dans ces expériences. La plupart des substances qui se trouvent dissoutes dans ce liquide, et soumises avec lui à l'action du courant électrique, éprouvent aussi des changemens dans leur constitution. Il ne faut donc pas s'attendre à trouver une relation constante ou simple entre l'énergie absolue de l'appareil et le seul dégagement des gaz.

Le premier exemple de cette action de la pile sur les substances différentes de l'eau fut observé par Cruikshanks en répétant l'expérience de Nicholson et Carlisle. Ayant employé pour milieu conducteur de l'eau chargée d'acétate de plomb, il vit le fil résineux se couvrir d'une multitude de petites aiguilles de plomb métallique. Il obtint des effets analogues avec les dissolutions de sulfate de cuivre et de nitrate d'argent. Dans cette dernière, les petites aiguilles d'argent s'articulaient les unes sur les autres comme par une sorte de végétation, à mesure qu'elles se déposaient, de manière à former, par leur réunion, ce que les chimistes appellent un arbre de Diane. Le courant électrique dégageait donc ici les métaux de leurs combinaisons avec les acides qui les tenaient en dissolution et avec l'oxygène qui leur est nécessaire pour se dissoudre; de même que, dans la première expérience sur l'eau seule, il séparait l'hydrogène de l'oxygène avec lequel il était combiné; et, dans un cas comme dans l'autre, l'oxygène se développait au pôle vitré, tandis que les substances qui le saturaient devenaient libres au pôle résineux.

Pour étudier la nature du pouvoir qui opère ces décompositions, Cruikshanks fit passer le courant voltaïque à travers des dissolutions chargées de couleurs bleues végétales, qui ont la propriété d'être rougies par le contact des acides et verdies par les alcalis. Il observa que le premier effet se produisait autour du fil vitré, et le second autour du fil résineux. On peut faire cette expérience avec autant de facilité que d'élégance de la manière suivante, qui se trouve indiquée dans le traité de Singer, sur l'électricité. On courbe un tube de verre un peu large en forme de V, et l'on introduit dans chaque branche un fil de platine que l'on fait communiquer aux deux pôles d'une pile voltaïque. On verse ensuite dans le tube une dissolution neutre de chou rouge qui est d'une couleur bleu tendre, fort sensible à l'action des acides et des alcalis (1). Aussitôt la décomposition de l'eau commence à s'opérer comme à l'ordinaire, et les deux gaz qui la constituent se dégagent; mais en outre on voit, après peu d'instans, la liqueur rougir autour du fil vitré et verdier autour du fil résineux. Lorsque cet effet est bien marqué, intervertissez les communications des deux fils en changeant les pôles auxquels ils s'appliquent, et laissez agir de nouveau l'appareil; bientôt le rouge disparaîtra d'un côté et le vert de l'autre; la liqueur redeviendra bleue dans les deux branches; et enfin chaque couleur se trouvera remplacée par

(1) Voici la manière indiquée par M. Singer pour préparer cette dissolution: Quand on veut faire un réactif très-sensible, on fait infuser pendant quelques instans de minces feuilles de chou rouge dans une quantité d'eau chaude suffisante pour les couvrir. Cette eau prend une belle couleur bleue que le contact des acides change en rouge, et le contact des alcalis en vert. La dissolution ne peut être conservée que peu de temps sans s'altérer. On obtient un réactif plus durable, mais sans doute moins délicat dans ses indications, en ajoutant quelques gouttes d'acide sulfurique par chaque pinte d'eau que l'on emploie à former l'infusion. Alors, la couleur de celle-ci est rouge; et lorsqu'on veut en faire usage, on en prend une petite quantité que l'on neutralise en y versant quelques gouttes d'ammoniaque, jusqu'à ce que la couleur bleue reparaisse; mais la difficulté d'atteindre exactement le point juste de neutralité, doit rendre cette préparation moins sensible que la première.

son opposée. Dans les premiers momens où l'on connut ces phénomènes, on crut pouvoir en conclure que le pouvoir électrique formait réellement un acide autour du fil vitré, et un alcali autour du fil résineux; mais des recherches plus étendues, qui furent principalement l'ouvrage de M. H. Davy, ont montré que ces phénomènes n'étaient qu'un résultat des décompositions généralement produites par le courant électrique dans les milieux à travers lesquels on le fait passer. Cet habile chimiste trouva qu'il fallait, pour les prévenir, employer des précautions incroyables. Par exemple, il obtint encore des signes d'alcali et d'acide en faisant passer pendant quelque temps le courant voltaïque à travers de l'eau parfaitement pure, contenue dans des vases de verres différens qui communiquaient seulement par des matières fibreuses insolubles, telles que des cordons d'amiante ou d'asbeste imbibés d'eau. Dans ce cas, l'alcali provient d'une décomposition partielle du verre même; l'acide est formé par l'oxigène dégagé de l'eau, lequel se trouvant à l'état naissant se combine avec l'azote de l'atmosphère environnante, et constitue de l'acide nitrique. Ces traces d'acide nitrique furent encore sensibles, quoique très-faibles, lorsqu'on employait de l'eau distillée commune, placée dans des coupes d'or; mais il se trouva aussi que de telle eau n'était pas encore parfaitement privée de toute substance étrangère. Enfin on réussit en employant de l'eau distillée avec beaucoup de lenteur dans des alambics d'argent, que l'on exposa au courant électrique dans des vaisseaux d'or. Cette fois, les traces d'alcali et d'acide disparurent complètement.

Ce travail, en prouvant la grande puissance de l'appareil de Volta comme instrument de décomposition chimique, montra la nécessité de se tenir en garde contre les effets de son action sur les vaisseaux mêmes où l'on renfermait les dissolutions que l'on voulait éprouver. Les expériences qui demandaient de l'exactitude durent être faites dans des coupes d'or ou d'agate, à l'abri du contact de l'air. On mettait dans différentes coupes les dissolutions que l'on voulait éprouver; et on établissait la communication entre elles par des fils

d'amiante. Mais alors des phénomènes aussi nouveaux qu'inattendus vinrent s'offrir aux observateurs. Des substances, qui d'abord étaient mêlées, et distribuées uniformément dans le milieu conducteur, se séparaient sous l'influence du courant voltaïque, et chacune d'elles se trouvait rassemblée dans une coupe à part. D'autres, qui avaient été placées primitivement dans différentes coupes, se trouvèrent échangées; de sorte qu'il fallut reconnaître dans ce courant un pouvoir particulier de transport qui rassemblait en général les principes acides au pôle vitré, et les bases salifiables au pôle résineux. Cette belle découverte fut due à deux chimistes suédois, MM. Berzelius et Hisinger.

Supposons, par exemple, que l'on n'emploie que deux coupes, et qu'on les remplisse toutes deux d'une dissolution de sulfate de soude. Après quelques heures d'action, tout le sel se trouve décomposé; la coupe qui communique au pôle vitré contient une solution d'acide sulfurique, et l'on trouve la soude dans la coupe qui communique au pôle résineux. Il faut donc, pour que cet effet se soit opéré, que l'alcali et l'acide aient totalement passé d'une coupe dans l'autre le long du fil d'amiante, ou plutôt parmi les molécules d'eau qui humectaient ce fil.

On peut varier cette expérience en employant trois coupes communicantes dont les deux extrêmes contiennent seulement de l'eau distillée chargée d'une infusion bleue de chou rouge, tandis que celle du milieu renferme une dissolution de sulfate de potasse. On met les coupes extrêmes en communication avec les deux pôles d'une pile voltaïque; après quelque temps, le sel de la coupe intermédiaire est décomposé, et ses élémens séparés ont été transportés dans les deux autres. L'acide s'est porté dans la coupe qui communiquait au pôle vitré, et a rougi la liqueur bleue qu'elle contenait; tandis que l'alcali s'est porté dans la liqueur qui communiquait au pôle résineux, et l'a verdie.

Une particularité extrêmement remarquable de ce phénomène de transport, c'est que les substances qui l'éprouvent se trouvent quelquefois amenées à traverser des milieux pour lesquels, dans l'état ordinaire, elles ont une affinité très-éner-

gique, sans toutefois que, dans leur passage, elles se combinent d'une manière permanente avec eux. En voici un exemple parmi beaucoup d'autres. On emploie trois coupes communicantes : la première, dans laquelle plonge le fil résineux, contient une dissolution de sulfate de potasse ; dans la seconde, celle du milieu, on met une solution d'ammoniaque, substance qui a une très-grande affinité pour l'acide sulfurique ; enfin dans la troisième, où le fil vitré plonge, on ne met que de l'eau pure. Dès que la pile commence à agir, le courant électrique décompose le sulfate, maintient la potasse dans la première coupe, et transporte l'acide dans la troisième où on le retrouve libre, quoique, pour y parvenir, il ait été obligé de traverser l'ammoniaque en dissolution. Si, à l'ammoniaque, on substitue un acide, et qu'on fasse plonger le fil vitré dans la dissolution de sulfate de potasse, c'est la potasse qui est transportée et qui vient se rendre dans la coupe où plonge le fil résineux ; ce qu'elle fait en traversant l'acide intermédiaire, sans que l'affinité de celui-ci pour elle puisse la retenir. Et, non-seulement les produits transportés échappent ainsi à des affinités très-énergiques, mais les réactifs les plus sensibles ne semblent pas affectés par leur passage et ne peuvent aucunement l'indiquer. Supposons, par exemple, que l'on emploie, comme tout-à-l'heure, trois vases communicans, dont deux, celui du centre et celui où le fil vitré plonge, contiennent de l'infusion neutre de chou rouge, tandis que l'on met une dissolution de sulfate de potasse dans le troisième où plonge le fil résineux. Après avoir fait communiquer les vases par des brins d'amiante ou de coton humectés, si l'on fait agir le courant voltaïque sur les liqueurs qu'ils renferment, le sulfate sera décomposé, et l'acide passera dans la liqueur du vase vitré qu'il rougira, sans altérer en aucune façon la teinte de la dissolution intermédiaire qu'il aura cependant traversée. Si l'on intervertit les communications des vases extrêmes avec la pile, la potasse transportée présentera un effet analogue. Il semble donc que l'électricité, s'attachant pour ainsi dire ici aux particules qu'elle transporte, modifie leurs affinités naturelles, et les modifie diversement selon leur nature ; résultat d'autant

plus surprenant que, lorsqu'on étudie le mode de distribution de l'électricité entre des corps d'un volume sensible, on trouve qu'elle s'y répand dans des proportions dépendantes seulement de leur forme, sans manifester aucune affinité particulière pour la matière qui les compose. Mais, comme je l'ai fait déjà pressentir, il ne serait pas impossible que la petitesse des particules matérielles auxquelles le courant voltaïque s'attache, expliquât cette apparente contradiction. Car la quantité absolue d'électricité, soit vitrée, soit résineuse, dont les particules de chaque substance peuvent se charger dans un milieu donné, doit dépendre de leur configuration et de leur faculté conductrice; faculté qui, ainsi que nous le verrons plus tard, est quelquefois très-différente pour l'une et l'autre électricité, lorsque la force répulsive est réduite au degré de faiblesse où elle se trouve dans le courant voltaïque. Ainsi la seule différence de forme et de conductibilité spéciale existante entre des molécules de nature diverse, pourrait suffire pour déterminer l'espèce et l'inégalité de leurs charges électriques, sans qu'il fût besoin d'admettre l'existence d'une affinité véritable entre les particules des substances et les principes des deux électricités.

Ne pouvant pas observer immédiatement ce qui se passe dans l'acte du transport même, puisque les substances transportées sont toujours invisibles pendant leur passage, il faut chercher dans les résultats définitifs de ce phénomène les conditions qui le limitent ou le modifient, et les employer comme autant d'indices caractéristiques du mode suivant lequel il est opéré. Malheureusement ces résultats sont, pour la plupart, des effets chimiques, dont le mode de production est pareillement inobservable, et qui nous deviennent sensibles seulement après qu'ils se sont effectués. Mais, quoique l'ignorance où nous sommes sur les conditions dont ils dépendent, et sur les particularités avec lesquelles ils s'accomplissent, rende difficile leur emploi comme caractères, et s'oppose même invinciblement à ce que nous en puissions déduire une analyse complète des influences électriques qui les déterminent, il n'en est que plus nécessaire de pousser dès-à-présent cette

analyse aussi loin que le permettent les données actuelles ; car c'est en séparant le certain du vraisemblable et de ce qui est tout-à-fait ignoré, que l'on peut voir nettement où sont les difficultés à résoudre, quels élémens restent encore à désirer pour établir une doctrine complète, et conséquemment quels sont les points sur lesquels il faut diriger de nouvelles recherches pour qu'elles soient utiles et fécondes.

La première chose à considérer dans cette analyse, c'est l'état électrique des milieux liquides interposés entre les pôles de la pile, et qui servent de conducteurs à la transmission de l'électricité. Or, cet état est rendu sensible par une expérience de Volta, qui consiste à joindre les pôles de la pile par un conducteur liquide assez imparfait pour qu'il puisse s'établir des différences de charges observables entre ses diverses parties. Par exemple, on atteint parfaitement ce but en se servant d'une longue bande de papier imbibée d'eau pure. Après que la communication a été ainsi établie pendant quelques instans entre les deux pôles, si l'on touche successivement différentes parties de la bandelette avec un électroscope à condensateur, afin d'éprouver son état électrique, on trouve que, lorsque la pile est isolée, chaque moitié est chargée de l'espèce d'électricité qui est propre au pôle auquel elle adhère ; l'une est vitrée, l'autre résineuse ; et l'intensité de ces charges va en diminuant depuis chaque pôle jusqu'au milieu de la bandelette qui se trouve dans l'état neutre, du moins en supposant la conductibilité constante sur toute sa longueur ; car si l'on rend l'écoulement de l'électricité plus facile sur l'une des deux moitiés que sur l'autre, comme on peut le faire en y versant quelques gouttes d'une dissolution saline plus conductrice que l'eau pure, les charges électriques de cette moitié deviennent plus fortes à égales distances, et le point neutre se rapproche du pôle opposé. Lorsque la pile, au lieu d'être isolée, communique au sol par un de ses pôles, le point neutre passe à ce pôle même, et tout le reste de la bandelette offre, avec une intensité de charge progressivement croissante, la seule espèce d'électricité qui appartient au pôle isolé.

Dans ce cas, comme dans le précédent, la loi suivant la-

quelle la dégradation progressive des charges s'opère d'un pôle à l'autre, doit dépendre de la conductibilité plus ou moins grande du liquide qui humecte la bandelette, et de l'extension plus ou moins considérable qu'offre la surface sur laquelle il est répandu. Mais le mode suivant lequel s'opère l'écoulement des deux électricités, et leur mutuelle neutralisation, doit rester le même dans ses circonstances générales; car ce n'est qu'une simple application des lois ordinaires que suit l'électricité lorsqu'elle se distribue sur des conducteurs qui la transmettent imparfaitement. Il doit donc encore en être ainsi, lorsque les deux pôles de la pile, au lieu d'être joints par une seule lame humide, le sont par une infinité de pareilles lames, unies ensemble, de manière à former une masse fluide, et chargées de quantités d'électricité assez faibles, relativement à leur faculté conductrice, pour ne pas pouvoir se les communiquer mutuellement avec rapidité. Alors chaque filet fluide commençant à un des points du fil vitré, et se terminant à un un des points du fil résineux, peut être considéré comme un conducteur imparfait, auquel tout ce que nous avons établi sur l'état électrique de la bandelette est applicable, sauf les modifications requises dans la dégradation plus ou moins rapide des intensités; c'est-à-dire que l'écoulement de l'une et de l'autre électricité doit s'opérer le long de chacun d'eux avec des différences de vitesse et de charge dépendantes de leur longueur, de leur faculté conductrice qui peut être inégale, et aussi de leur position, soit entre eux, soit relativement aux fils métalliques dont le contact leur communique l'électricité. La masse liquide interposée entre les deux pôles de la pile se trouve ainsi dans un état électrique analogue à celui de l'atmosphère, c'est-à-dire qu'elle présente un milieu continu, intérieurement pénétré d'électricité libre, qui ne peut s'en échapper à cause de l'imperfection de la conductibilité, et qui ne peut pas non plus s'y répandre uniformément à cause du renouvellement continu qu'elle reçoit de la source qui la développe. Seulement, dans l'atmosphère, lorsqu'elle est calme et pure, on trouve toujours la même espèce d'électricité libre à toutes les hauteurs au-dessus du sol, ce qui est analogue à

l'état électrique de la bandelette humide lorsque la pile communique au sol par un de ses pôles; au lieu qu'en isolant la pile, on obtient les deux espèces d'électricité libres en diverses parties du milieu imparfaitement conducteur par lequel les deux pôles sont unis. L'analogie par laquelle je viens de passer du cas d'une simple lame à celui d'une masse fluide, ne peut pas être immédiatement vérifiée par l'application de l'électroscope, ou du moins ne saurait l'être sans des précautions particulières. La multitude des points de contact du fluide avec les fils métalliques, et peut-être aussi les décompositions chimiques qui s'opèrent, absorbent si rapidement l'électricité développée à chaque pôle, et réduisent tellement sa force répulsive, qu'elle ne donne plus de charge appréciable au condensateur. Mais on peut y suppléer par les indications tirées des phénomènes chimiques. Par exemple, prenez quatre tubes de verre, A, B, C, D, recourbés en forme de V; versez-y une infusion neutre de chou rouge; et, après les avoir placés à la suite les uns des autres, unissez les deux du milieu par quelques brins de coton ou d'amiante, dont les bouts plongent dans le liquide; puis fixez dans les branches extrêmes de la chaîne deux fils de métal que vous ferez communiquer aux deux pôles d'une pile voltaïque. Après quelque temps, la liqueur des deux siphons A, B, situés du côté du pôle vitré, sera devenue rouge, celle des siphons C, D, situés du côté du pôle résineux, sera devenue verte; et leur changement de couleur se fera progressivement en allant des branches extrêmes vers le centre. La diversité des modifications ainsi exercées sur les diverses parties d'un même milieu fluide par le courant électrique qui les traverse, semble indiquer avec évidence que les deux électricités ne s'y trouvent pas distribuées uniformément.

Ce mode de répartition de l'électricité donne la clef d'un phénomène qui jusqu'ici n'a pas été expliqué, du moins à ma connaissance, quoiqu'il ait été avec raison considéré comme un des plus remarquables de ceux que présente l'appareil de Volta. Il consiste en ce que si, dans le milieu qui sert de conducteur, on suspend un fil métallique dirigé plus ou moins

exactement dans le sens du transport, ce fil manifeste bientôt à chacun de ses bouts une électricité contraire à celle qui domine au pôle que ce bout regarde, et l'on voit s'opérer à ses deux extrémités tous les phénomènes chimiques qui conviennent d'un côté à un pôle vitré, de l'autre à un pôle résineux. Par exemple, reprenez l'expérience citée tout-à-l'heure, et dans laquelle on employait quatre siphons remplis d'une dissolution neutre de chou rouge; mais, au lieu d'unir le liquide des branches intermédiaires par des fils de coton ou d'amiante, joignez-les par des fils métalliques; en peu de temps vous verrez que la liqueur a rougi autour de l'extrémité de chaque fil qui se dirige vers le pôle résineux, et qu'elle a verdi autour de l'extrémité du même fil qui se dirigeait vers le pôle vitré. Or, ceci se conçoit très-aisément avec la distribution d'électricité que nous avons attribuée à la masse fluide. Car, en supposant d'abord, pour plus de simplicité, que l'on n'introduise qu'un seul fil *AB*, *fig. 60*, ce fil se trouve soumis à deux influences électriques d'espèce et d'intensité inégales: l'une, *V*, exercée par la portion de la masse fluide qui est située du côté du pôle vitré de la pile, l'autre, *R*, par la portion située du côté du pôle résineux. Or, à la seule inspection de la figure, on voit que ces deux actions conspirent pour décomposer les électricités naturelles du fil et les décomposer dans le même sens, de manière à lui donner un pôle résineux dans le bout qui regarde le pôle vitré, et un pôle vitré dans le bout qui regarde le fil résineux. C'est précisément ainsi, comme nous l'avons vu, qu'un long fil de métal, isolé verticalement dans l'atmosphère, y prend des pôles, et devient résineux à sa partie supérieure, vitré à l'inférieure, par le seul effet de l'inégale distribution de l'électricité dans la masse aérienne. C'est ainsi encore, comme nous le verrons plus tard, qu'un fil de fer doux, placé près d'un barreau aimanté, dans une direction parallèle à l'axe de ce barreau, devient lui-même un aimant sous son influence. Maintenant, puisque chaque fil de métal interposé dans le courant voltaïque acquiert à ses deux bouts des états électriques absolument pareils pour l'espèce d'électricité et sa permanence, à ce qui

existe dans chacun des deux fils qui communiquent immédiatement aux deux pôles de la pile même, il est tout simple que le même pouvoir de décomposition s'y manifeste, et que chaque extrémité des fils interposés produise le genre d'effet qui accompagne toujours l'espèce particulière d'électricité qu'elle possède. La même influence s'exercerait également sur un nombre quelconque de fils métalliques, ainsi suspendus les uns à la suite des autres, dans le courant voltaïque, toutefois avec des différences dans l'intensité de leur charge, selon leur position dans la masse électrisée.

Ceci ne nous explique nullement pourquoi les combinaisons chimiques se désunissent sous l'influence du courant électrique, ni pourquoi certaines substances, lorsqu'elles deviennent libres, se portent de préférence vers le pôle vitré, tandis que d'autres se portent vers le pôle résineux. Ces particularités fort remarquables tiennent, sans doute, aux conditions générales qui déterminent les combinaisons chimiques, conditions qui, jusqu'à présent, nous sont complètement inconnues, puisque nous ne savons pas même définir d'une manière précise en quoi consiste l'état de combinaison. Mais, une fois que la décomposition d'un produit est supposée faite, l'inégale distribution des deux électricités dans le milieu conducteur, telle que nous avons été conduits à l'admettre, suffit pour faire clairement concevoir le phénomène du transport. En effet, partons de ce résultat d'observation que le transport existe, et considérons, par exemple, une molécule d'un acide qui s'achemine vers le pôle vitré. Puisqu'elle y est portée et conduite à travers le fluide qui l'environne, il faut que sa marche soit déterminée et réglée par la charge électrique qu'elle a reçue à l'instant où elle s'est séparée de la combinaison dans laquelle elle était primitivement engagée. Or, pour cela, il suffit que cette charge ait été résineuse et plus forte que celle des molécules liquides non décomposées qui environnent le fil métallique fixé au pôle résineux ; car alors la particule d'acide sera repoussée par la portion de la masse liquide voisine du pôle résineux, et attirée par la portion située du côté du pôle vitré. Donc, si elle ne perd pas immédiatement son excès d'électricité par communication, ce que l'excessive fai-

blesse de cet excès rend très-possible, comme d'ailleurs l'état de liquidité du milieu, qu'elle partage elle-même, y rend ses mouvemens parfaitement libres, elle devra céder aux forces de transport qui la sollicitent; et, en suivant toujours la direction que la résultante de ces forces lui imprime, se rendre enfin au fil vitré, où elle déposera l'électricité résineuse qu'elle possède pour recevoir le degré d'électricité vitrée qui convient aux molécules situées dans cette partie de la masse fluide. C'est alors que l'on voit ordinairement s'opérer de nouveaux effets chimiques, opposés à ceux que l'on observe au pôle résineux. Des produits gazeux sont dégagés, des combinaisons nouvelles se forment; mais ces effets, aussi peu explicables que les premiers, ne sont plus du ressort du physicien.

Néanmoins, je ne dois pas passer sous silence quelques résultats de ce genre qui paraissent indiquer des conditions auxquelles la possibilité des combinaisons chimiques serait en général assujettie. On a reconnu qu'un acide ne peut pas être transporté à travers un alcali avec lequel il forme un sel insoluble. Ne serait-ce pas là une extension de cette influence que le contact d'un corps solide exerce en général sur la formation ou la décomposition de certains produits? On sait que l'eau bout à une plus haute température dans un vase de verre que dans un vase de métal; ainsi le contact du verre retarde le dégagement de ses vapeurs, mais le contact de quelques particules de métal le détermine instantanément. Lorsqu'un morceau de métal, hérissé d'aspérités, est plongé dans une dissolution saturée d'un gaz, c'est en général par les pointes des aspérités que le dégagement du gaz se fait en plus grande abondance. Lorsque l'eau a été combinée avec plusieurs centaines de fois son volume d'oxygène, comme M. Thénard est parvenu à le faire, le simple contact d'un métal suffit pour rompre violemment cette union. Ne serait-ce pas en vertu de cette propriété générale que les fils métalliques attachés aux deux pôles de la pile détermineraient les combinaisons et les dégagemens des substances avec lesquelles ils sont en contact? Et cette propriété ne tiendrait-elle pas à la faculté que leur nature leur donne d'enlever et de communiquer rapidement l'électricité? La cessation du transport, quand une combinai-

son insoluble s'opère pendant le trajet d'une des substances, ne tiendrait-elle pas aussi à la même cause, au dégagement forcé de l'électricité dont cette substance s'était chargée? Et enfin l'influence de cette électricité pour empêcher les combinaisons qui ne la dégagent point, ne consisterait-elle pas en ce que sa répulsion sur l'électricité de même nature dont le milieu qu'elle traverse est chargé, jointe à la force qui l'éloigne d'un pôle et qui la rapproche de l'autre, l'empêcheraient d'avoir avec les particules du milieu un contact assez intime pour entrer avec elles en combinaison? L'examen de ces diverses questions par l'expérience pourrait former la matière d'un travail qui serait d'un grand intérêt.

En comparant les effets qu'une même substance éprouve sous l'influence du courant voltaïque dans la multitude des combinaisons où on peut l'engager, on y reconnaît généralement une tendance à se transporter vers l'un ou l'autre pôle de la pile, et par conséquent à se charger de l'une ou de l'autre électricité. La réalité de cette remarque est telle que l'on peut, dans une infinité de cas, en conclure d'avance si la décomposition d'un produit est facile ou difficile, et dans quel sens elle aura lieu, c'est-à-dire vers quel pôle se dirigera chacun des élémens après la séparation. Cela a porté les chimistes à supposer, non sans vraisemblance, que les décompositions opérées par le courant voltaïque dépendent de cette tendance même qui, se trouvant contraire dans les élémens de la combinaison, sollicite les uns vers le pôle vitré de la pile, les autres vers le pôle résineux, et les fait se séparer pour prendre ces directions diverses lorsqu'elle est assez forte pour vaincre l'affinité qui les réunit. On pourrait ajouter que l'opposition de l'état électrique influe peut-être sur la séparation, autrement que par la tendance mécanique qui en résulte vers chaque pôle, par exemple en détruisant quelque relation qui doit exister entre les charges électriques d'un produit pour que les substances qui les composent restent agrégées; car, ne connaissant point les fonctions que l'électricité peut remplir dans la constitution des corps, nous devons nous abstenir d'en limiter hypothétiquement les effets. Quoi

qu'il en soit, d'après cette manière d'envisager le pouvoir de décomposition exercé par le courant voltaïque, la possibilité de ce phénomène devra dépendre en général de trois éléments : 1°. de la disposition plus ou moins forte qu'auront les principes du composé à prendre dans chaque particule des états électriques contraires ; 2°. de l'énergie plus ou moins grande de cette opposition ; 3°. enfin, du rapport de cette énergie avec l'affinité chimique que les principes de la substance ont entre eux. Par exemple, si l'on opère sur un corps dont les principes se mettent facilement dans un état électrique très-opposé, il pourra se faire que la pile décompose ce corps, quoique l'affinité chimique qui réunit ses principes soit très-puissante. Si, au contraire, l'affinité est très-faible, mais qu'en même temps les principes constituans de la substance aient très-peu de tendance à se mettre dans des états électriques opposés, il sera fort possible que la décomposition ne s'opère pas. Enfin, de même que dans le frottement des corps les uns contre les autres, il y en a qui prennent tantôt l'électricité vitrée, tantôt l'électricité résineuse, selon la nature du frottoir auquel on les applique, de même il pourra arriver qu'un même principe chimique prenne tantôt l'état vitré, tantôt l'état résineux, selon les combinaisons où il entrera ; et quoique, en général, chaque principe doive porter dans toutes les combinaisons les mêmes dispositions naturelles, néanmoins le résultat définitif dépendra encore des dispositions analogues ou différentes des principes avec lesquels il sera uni. Dans toutes les expériences que l'on a faites jusqu'à présent avec l'appareil voltaïque, l'oxygène a paru conserver cette disposition à l'état résineux qu'il manifeste dans la décomposition de l'eau, et que l'on remarque aussi dans les expériences faites avec l'électricité ordinaire, où l'oxygène de l'air se porte toujours sur les surfaces électrisées vitreusement. Même, lorsque les corps se sont trouvés composés de plusieurs principes, dont quelques-uns avaient de fortes affinités pour l'oxygène, celui-ci leur a communiqué sa disposition résineuse, et les a entraînés vers le pôle vitré ; tandis qu'au contraire les autres principes ont alors pris l'état vitré, et se sont portés

vers le pôle résineux. En vertu de cette loi, tous les oxides et les acides qui contiennent de l'oxigène ont été décomposés par le courant voltaïque, et le principe qui était uni à l'oxigène a été transporté au pôle résineux; tandis que l'oxigène suivant sa disposition constante est venu se rendre au pôle vitré. Ces belles observations ont, comme je l'ai dit, été d'abord faites par MM. Hisinger et Berzelius. M. Davy, en les variant, en les étendant, fut conduit à essayer l'action de l'appareil voltaïque sur les alcalis, que l'on avait jusque-là regardés comme des corps simples. Il vit alors, et ce fut depuis l'étonnement de l'Europe savante, il vit des bulles d'oxigène se dégager au pôle vitré; tandis qu'au pôle résineux s'assemblaient des substances brillantes, d'un aspect métallique et pourtant très-légères, brûlant dans l'air avec énergie, et même jouissant de la singulière propriété de s'enflammer dans l'eau. C'étaient donc les bases métalliques de la soude et de la potasse, appelées depuis *sodium* et *potassium*. Mais ces propriétés mêmes faisaient qu'on ne pouvait extraire que des atomes de ces substances, qui se détruisaient dans l'air à mesure qu'ils étaient formés. Il fallut donc chercher un moyen de les préserver du contact de l'air qui les dévorait. Le docteur Seebeck imagina pour cela un procédé fort simple, qui consiste à combiner le sodium ou le potassium avec le mercure à mesure qu'il se dégage. On creuse dans un petit fragment de soude ou de potasse, une cavité que l'on remplit de mercure; on pose ce fragment sur une plaque métallique, et l'on plonge dans le mercure le fil résineux d'un appareil voltaïque, qui doit contenir au moins deux cents couples de plaques. On fait communiquer l'autre fil avec le support de métal; alors la soude ou la potasse est décomposée, ainsi que l'eau qu'elle contient. L'oxigène de l'un et l'autre se rendent au pôle vitré, où leur état électrique les entraîne. L'hydrogène, et le sodium ou le potassium qu'ils abandonnent, se rendent, au contraire, au pôle résineux. Là, l'hydrogène se dégage sous la forme de gaz, et le potassium ou le sodium se combinent avec le mercure, qui les préserve ainsi de l'action de l'air. De temps en temps, on verse l'amalgame dans l'huile

de naphte, et on renouvelle le mercure. Lorsqu'on a recueilli une certaine quantité d'amalgame, on le distille dans une cornue, avec le moins d'air possible. L'huile se vaporise d'abord, ensuite le mercure; et enfin le sodium ou le potassium reste libre. Pour que la décomposition de la potasse s'opère par le procédé que nous venons de décrire, il faut que ces alcalis contiennent assez d'eau pour transmettre l'électricité de la pile, mais non pas cependant une quantité assez grande pour que la décomposition de cette eau exige tout l'emploi de l'électricité transmise; car alors la potasse et la soude ne se décomposeraient pas. M. Davy et M. Seebeck, par des procédés de ce genre, sont parvenus à reconnaître dans les autres alcalis des signes non douteux de décomposition. Mais plus de détails sur cet objet ne conviendraient pas à un traité tel que celui-ci. J'ajouterai seulement qu'en partant de la première découverte de M. Davy sur la composition de la potasse et de la soude, MM. Gay-Lussac et Thénard ont réussi à enlever l'oxygène à ces substances, par le seul effort des affinités chimiques.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que l'action de la pile pour décomposer les corps; elle a encore d'autres effets très-remarquables. Par exemple, si l'on établit la communication des deux pôles par des fils métalliques très-fins, et qu'on les approche doucement l'un de l'autre jusqu'au contact, il s'établit entre eux une attraction qui les retient unis malgré la force de leur ressort; si ces fils sont de fer, il s'excite entre eux une étincelle visible qui, comme nous le verrons tout-à-l'heure, produit une véritable combustion de fer. Ce phénomène réussit plus sûrement, lorsqu'on arme l'extrémité d'un des fils de fer avec une légère feuille d'or battu. Cette feuille est consumée à l'endroit où l'étincelle s'élançe. On peut enflammer du gaz tonnant avec cette étincelle, et même du phosphore et du soufre, comme avec celles que donnent nos machines électriques ordinaires.

Nous ne parlons ici que des effets produits avec les piles les plus communes, dont les disques ont à-peu-près la largeur d'une pièce de cinq francs. Mais on conçoit qu'ils doivent de-

venir beaucoup plus considérables si l'on emploie des plaques qui aient plus de surface, et qui soient assemblées en même nombre. Car, dans les piles où le nombre des élémens et la nature des conducteurs humides sont les mêmes, l'épaisseur de la couche électrique libre, sur chaque plaque de rang égal, est aussi la même, comme la théorie l'indique, et comme l'expérience nous l'a montré plus haut; d'où il suit que les quantités totales d'électricité que ces piles possèdent dans l'état d'équilibre, sont exactement proportionnelles aux surfaces des plaques; et la même proportion subsiste encore dans l'état de mouvement, du moins en supposant que la conductibilité du liquide interposé soit la même, et que ce liquide, ainsi que les surfaces des plaques, ne subissent, dans le cours de l'expérience, que des altérations pareilles. Aussi MM. Gay-Lussac et Thénard ont-ils trouvé que les quantités de gaz dégagés en un temps donné, sont proportionnelles aux surfaces des plaques que l'on compare, ou, ce qui revient au même, aux quantités totales d'électricité. Le même accroissement s'observe dans tous les autres effets chimiques. Une pile à larges plaques, même composée d'un petit nombre de couples, peut enflammer plusieurs centimètres de fil de fer. Ce phénomène a été observé, pour la première fois, par MM. Hachette et Thénard. Les physiciens anglais, en donnant à l'appareil voltaïque des dispositions plus avantageuses, que je décrirai dans le chapitre qui va suivre, et en joignant à la largeur des plaques l'accroissement de force qui résulte de leur nombre, sont parvenus à porter à un plus haut degré d'énergie ce genre d'effet. Alors de longs fils de fer, de platine et de toutes sortes de métaux peuvent être échauffés non-seulement jusqu'à rougir, mais jusqu'à se résoudre en globules par la fusion; et, si on les fait passer pendant une partie de leur trajet dans des liquides, ces liquides peuvent en être échauffés jusqu'à bouillir. Si, au lieu de fils métalliques, on emploie des feuilles amincies au marteau ou au laminoir, elles s'enflamment et brûlent avec des couleurs diverses, selon leur nature. Les étincelles qui s'excitent alors entre les feuilles ou entre les fils conducteurs, quand on les approche l'un de

l'autre presque jusqu'au contact, sont si énergiques qu'elles deviennent visibles même dans l'eau. Mais rien n'est plus remarquable que ce qui s'observe lorsque l'on termine les fils conducteurs par des pointes de charbon parfaitement desséché. En appliquant cette disposition à un grand appareil que possède l'institution royale de Londres, et qui est composé de deux mille couples de plaques carrées, ayant chacune quatre pouces de côté, l'étincelle commença à s'élaner d'une pointe de charbon à l'autre lorsqu'elles se trouvèrent à une distance d'environ $\frac{1}{13}$ de pouce. Mais bientôt après, les deux pointes étant amenées à un haut degré d'ignition, on put les éloigner l'une de l'autre jusqu'à quatre pouces de distance sans que ce phénomène cessât de s'opérer. Alors la continuité des décharges électriques formait entre les deux pointes un jet continu de lumière courbé en arc, d'un éclat supérieur à toute autre flamme, et accompagné d'une chaleur si intense, que les substances les plus réfractaires y entraient en fusion, et que les globules de diamant et de plombagine y disparaissaient comme s'ils y eussent été subitement vaporisés. Ces effets s'opéraient de même, et avec plus d'énergie encore, quand les pointes de charbon se trouvaient placées dans un air raréfié par la machine pneumatique. Alors le torrent de lumière continua de s'élaner d'une pointe à l'autre jusqu'à la distance de six pouces; et on put le laisser subsister pendant des heures entières sans que le charbon se trouvât diminué d'une quantité sensible. De là on peut inférer avec beaucoup de vraisemblance que la lumière développée dans cette circonstance est produite, comme dans les explosions électriques ordinaires, par le passage de l'électricité à travers l'air ou les vapeurs raréfiées qui séparent les deux pointes. La première décharge, opérée entre les pointes, doit percer cette couche d'air ou de vapeurs, et c'est pourquoi elle ne se fait qu'à une petite distance; mais une fois qu'elle a eu lieu, et qu'elle a écarté par sa force répulsive les particules du milieu environnant, les décharges suivantes qui ont lieu sans interruption après la première, s'opérant suivant la même direction, trouvent leur route ouverte dans un air raréfié, et peut-être même dans un

vide presque parfait, qu'elles n'ont qu'à maintenir, ce qui leur permet de s'opérer encore à une distance plus considérable.

Ce développement continu de lumière, et le dégagement analogue qui s'observe dans les fils de métal lorsqu'ils sont traversés par le courant voltaïque, sont des phénomènes extrêmement remarquables; d'autant plus que, pour les fils métalliques, lorsqu'on les place dans le vide ou dans des gaz avec lesquels ils ne peuvent pas entrer en combinaison, l'ignition peut se soutenir pendant des heures entières et se renouveler aussi souvent qu'on le juge convenable sans qu'ils perdent absolument rien de leur poids. Il est extrêmement difficile, pour ne pas dire impossible, d'expliquer d'où vient cette lumière et cet échauffement qui se produisent alors. Dira-t-on qu'elle est dégagée par la compression que le courant électrique fait subir aux substances sur lesquelles il agit? Mais alors, puisque le courant est continu, il semble que la compression une fois exercée devrait subsister pendant tout le temps de l'expérience; et ainsi l'on pourrait tout au plus lui attribuer la première apparition de la lumière, mais nullement la continuité de sa production. Serait-ce donc que les deux principes électriques, en se combinant l'un avec l'autre, produiraient immédiatement de la lumière? Nous ne connaissons aucun phénomène qui puisse faire regarder cette supposition comme impossible, ou même comme invraisemblable. Voici une expérience qui tendrait à la confirmer: lorsqu'un appareil à auges vient d'être chargé avec une dissolution saline ou avec un acide étendu d'eau, on observe que, dans les premiers momens, son action chimique est la plus énergique possible, et qu'elle décroît rapidement en peu d'instans, de manière à devenir très-faible ou presque insensible après quelques heures. Nous verrons bientôt la raison de cet affaiblissement. Je ne le donne ici que comme un fait. Or si, dans les premiers momens d'énergie de l'appareil, on interpose entre ses pôles la plus grande longueur de fil de fer qu'il puisse faire rougir dans une grosseur donnée, on trouvera que bientôt après il n'en peut plus faire rougir qu'une longueur moindre, et ainsi de suite en diminuant toujours jusqu'à ce qu'un fil de fer

de cette grosseur, quelque court qu'on le prenne, suffise pour décharger complètement l'appareil sans aucune apparence d'ignition. Maintenant, supposons qu'au lieu de racourcir ainsi successivement le fil de fer interposé, on lui laisse toujours la même longueur qu'on avait d'abord employée, on trouvera que la portion, toujours de plus en plus petite, qui éprouve l'ignition, est située au milieu de cette longueur; de sorte qu'à l'époque où la dernière possibilité d'ignition existe, elle s'opère précisément au milieu de la longueur du fil conducteur, où en effet il semble que la réunion des deux principes électriques doit s'effectuer le plus abondamment.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que l'on employait un appareil voltaïque composé d'un nombre de couples plus ou moins considérable; mais on peut opérer l'ignition avec un seul couple, en rendant la grosseur et la longueur du fil de métal très-petites par rapport à l'étendue des surfaces dont le couple est composé. Par exemple, on prend une plaque rectangulaire de zinc, ZZ , *fig.* 61, ayant cinq ou six centimètres de largeur, sur dix de longueur. On replie autour d'elle une lame de cuivre, CC , dont on la sépare par des bourrelets de résine, RR , de manière que le zinc ne touche le cuivre nulle part. La plaque de zinc a, sur un de ses côtés, un appendice m , de même métal, auquel est fixée une tige de cuivre t , dirigée parallèlement à sa longueur; et, une autre tige t' aussi de cuivre, fixée à la surface extérieure de la plaque de cuivre, s'élève dans une direction perpendiculaire à la tige t , de manière que les extrémités des deux tiges se trouvèrent à-peu-près à un centimètre de distance l'une de l'autre. On unit ces extrémités par un fil de platine f , de même longueur et d'environ $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre. Cet assemblage forme évidemment un couple voltaïque dont un des élémens est la lame de zinc, et l'autre est le système de la tige de cuivre t , du fil de platine f , de la tige t' , et enfin de la grande plaque de cuivre C . Le développement de l'électricité s'opère au contact de la tige t avec l'appendice m . Or, en supposant tout l'appareil suspendu par une tige isolante attachée à cet appendice, le zinc et le cuivre n'ont de com-

munication ensemble que par leur surface de contact en *mt*; par conséquent il ne se fera pas de circulation de l'électricité. Mais cette circulation deviendra possible si l'on interpose, entre les grandes plaques C et Z, quelque conducteur humide, par exemple une dissolution saline, ou mieux encore un mélange formé avec une partie en volume d'acide nitrique, une d'acide sulfurique, et 50 ou 60 d'eau. En effet, dès que l'on plonge une portion de la surface des grandes lames dans un pareil mélange, on voit aussitôt s'opérer dans le liquide conducteur une vive effervescence; et, en peu d'instans, le fil de platine interposé entre les tiges *t* et *t'* s'échauffe jusqu'à rougir. Cet état d'ignition subsiste fort long-temps, sur tout si l'on ménage au liquide conducteur un accès facile sur la plaque de zinc en pratiquant des ouvertures O, O', O'', dans la partie inférieure de la plaque de cuivre; et, lorsqu'il a cessé d'avoir lieu, on peut le faire reparaitre en substituant de nouveau liquide à celui qui a servi précédemment. D'ailleurs on doit facilement concevoir que les dimensions attribuées ici aux plaques combinées n'ont rien d'absolu, et sont seulement relatives à la grosseur et à la longueur du fil dont on veut opérer l'ignition. En diminuant beaucoup cette longueur, et rendant le fil beaucoup plus mince, on le ferait rougir avec un couple formé d'éléments bien plus petits. M. Wollaston a porté ceci à l'extrême en employant pour conducteur un de ces fils de platine d'une excessive finesse, qu'il obtient par le tirage à la filière, ainsi que je l'ai expliqué dans le premier livre, page 12. Alors de très-petites plaques de cuivre et de zinc suffisent pour former l'appareil; et, lorsqu'on le plonge dans un mélange acide, le fil, qui d'abord échappait presque à la vue par sa finesse, devient visible par son ignition.

Cette expérience présente dans ses détails quelques particularités qui, au premier aperçu, peuvent paraître difficilement conciliables avec l'idée que le développement de l'électricité qui s'y opère soit dû au seul contact des métaux. Comme l'explication de ces anomalies apparentes tient aux modifications que la conductibilité plus ou moins parfaite produit dans l'écoulement du courant électrique, elle trouvera naturellement sa place à la fin du chapitre suivant.

CHAPITRE XVIII.

Examen des altérations qui s'opèrent dans l'Appareil voltaïque par sa réaction sur lui-même. Modifications qui en résultent dans son état électrique.

L'ACTRON chimique de l'appareil voltaïque ne s'exerce pas seulement à l'extrémité des fils par lesquels on établit la communication entre ses deux pôles ; elle a lieu de même entre ses élémens métalliques , le conducteur humide qui les sépare tenant lieu du liquide dans lequel on plonge les fils. De là résultent , dans l'intérieur même de l'appareil , des altérations considérables qui modifient son état électrique, soit en changeant les conditions de l'équilibre dans le contact des élémens qui le composent , soit en y altérant la conductibilité.

Le premier effet de cette action , c'est une absorption rapide de l'oxigène de l'air qui environne l'appareil. On peut s'en assurer d'une manière très-simple , en plaçant une pile verticale sur un support entouré d'eau , et la recouvrant d'une cloche cylindrique de verre qui plonge aussi dans l'eau par sa base , *fig. 62*. En peu d'instans , on voit s'élever l'eau dans l'intérieur de la cloche , sur-tout si l'on établit la communication entre les deux pôles de la pile par des fils de métal , de manière à y déterminer la circulation de l'électricité. Quand il n'y a point de communication établie , l'absorption s'opère encore , mais avec beaucoup plus de lenteur. Dans tous les cas , après un temps plus ou moins long , selon le volume de la pile et la quantité d'air qui l'environne , l'absorption cesse , et l'air resté sous la cloche ne présente plus de traces d'oxigène. Ce phénomène a été découvert par M. Frédéric Cuvier et moi , dans les premiers temps où l'appareil voltaïque fut connu en France. Il est accompagné d'une particularité digne de remarque : c'est que , tant qu'il dure , c'est-à-dire , tant qu'il reste de l'oxigène à absorber , les effets chimiques et physiologiques de l'appareil subsistent aussi , quoique avec une intensité dé-

croissante; en sorte que, si l'on fait ressortir par-dessous la cloche les fils conducteurs attachés aux deux pôles, en les conduisant dans des tubes de verre, on peut leur faire décomposer l'eau et recevoir des commotions dans les organes. Mais tous ces effets cessent lorsque l'oxygène environnant a été épuisé. Par une conséquence naturelle de ce résultat, l'action chimique et physiologique d'une même pile est beaucoup plus vive et plus durable quand elle est environnée d'oxygène pur, que lorsqu'elle est enfermée avec un volume égal d'air ordinaire; et même, dans ce dernier cas, lorsque, par le progrès de l'absorption, la pile se trouve plongée dans une atmosphère d'azote et y paraît tout-à-fait éteinte, la restitution d'une petite quantité d'oxygène suffit pour la ranimer.

Lorsque l'on démonte les piles qui ont été ainsi tenues en action pendant plusieurs jours, sous une cloche remplie d'air atmosphérique ou d'oxygène, avec une communication constamment établie entre leurs pôles, on trouve que les disques métalliques qui les composent adhèrent entre eux et aux rondelles de drap intermédiaires avec une si grande force, qu'il est très-difficile de les séparer. Quand on y est parvenu, on voit que l'action chimique de la pile a réagi sur elle-même, et a produit des altérations remarquables sur ses propres élémens. Si la pile a été montée de cette manière, zinc, humide, cuivre, zinc... etc., *fig.* 63, et qu'on l'ait posée sur sa base zinc, on voit constamment que des molécules de chaque pièce de zinc s'en sont détachées et se sont portées sur le cuivre du couple supérieur; et, si les élémens cuivre et zinc de chaque couple sont simplement posés l'un sur l'autre, de manière que l'on puisse les séparer, on trouve encore que les molécules du cuivre de chaque couple se sont portées sur le zinc supérieur, et ainsi de suite du bas en haut de la colonne. Si la situation de la pile est inverse, cuivre, humide, zinc, cuivre... etc., *fig.* 64, le cuivre descend sur le zinc inférieur, et le zinc sur le cuivre, du haut en bas de la colonne. La direction du *transport* est inverse par rapport à la verticale; mais elle reste la même relativement à l'ordre des élémens dont l'appareil est composé.

D'après cette disposition, le zinc est obligé, pour se porter sur le cuivre, de traverser le morceau de drap humide qui les sépare. Dans les piles où la communication n'a point été établie, cette transmission n'a point lieu. La surface du cuivre est lisse, et celle du zinc qui lui est opposée est seulement couverte de petits filets noirs qui suivent la direction des fils du drap. Lorsque la communication est établie depuis un peu de temps, quelques particules d'oxide commencent à passer, et se portent sur le cuivre; enfin, si l'action est forte, la surface de ce dernier finit par en être recouverte entièrement. Alors l'action chimique et physiologique de la pile cesse, soit que l'oxide de zinc déposé sur une des faces du cuivre, et le zinc métallique qui touche l'autre face, exercent les mêmes influences électriques dans le contact; soit que l'interposition de cette couche d'oxide offre un trop grand obstacle à la transmission de l'électricité; soit enfin, ce qui est le plus probable, que les deux effets se produisent à-la-fois.

Quelquefois l'oxide de zinc, après avoir traversé le morceau de drap, se revivifie sur le cuivre à l'état métallique. Alors les parties de la pièce de cuivre sur lesquelles cette précipitation s'opère se trouvent en contact avec du zinc par leurs deux surfaces. L'inégalité d'état électrique à ces surfaces cesse donc pour elles; et ainsi elles n'agissent plus dans la pile que comme un conducteur neutre; ce qui n'empêche pas les parties de la même pièce de cuivre que le zinc ainsi transporté n'a pas totalement recouvertes de conserver, avec la pièce de zinc qui les touche par leur autre face, les relations générales d'équilibre électrique qui ont lieu dans le contact, et de développer ainsi les mêmes quantités d'électricité que précédemment.

Le mouvement de transport étant dirigé du zinc au cuivre à travers les conducteurs humides, lorsque le cuivre se porte sur le zinc, c'est toujours par les faces où ils se touchent immédiatement. Alors si le cuivre adhère au zinc, il garde son brillant métallique; quelquefois il se forme du laiton. Ces revivifications n'ont pas lieu quand la communication n'est pas établie entre les extrémités de la pile. Il faut encore, pour qu'elles puissent s'opérer, que les disques de drap ne soient pas trop épais, ni d'un tissu trop serré.

Ce sont là, je crois, les premiers phénomènes de transport qui aient été observés avec l'appareil voltaïque. Nous les avons annoncés, M. F. Cuvier et moi, dans le travail dont j'ai parlé plus haut; mais nous n'en avons pas vu l'application générale. Leur théorie est évidemment la même que celle des autres décompositions chimiques qui s'opèrent entre les pôles de la pile. Toutefois, il s'y trouve cette différence, que les fils attachés à ces pôles portent, dans les substances où on les plonge, des électricités de nature contraire, l'une vitrée, l'autre résineuse; au lieu que les pièces métalliques qui se suivent immédiatement dans l'appareil voltaïque ont des charges électriques de même nature, et seulement inégales en intensité. Une telle inégalité, perpétuellement renouvelée comme elle l'est dans l'intérieur de la pile, suffit donc pour établir entre les principes simples qui séparent ces pièces, et dans la matière des pièces mêmes, une tendance à la séparation, pareille à celle que produisent les électricités de nature contraire; et, en effet, l'influence de ces charges inégales sur les substances interposées doit y déterminer une séparation de leurs électricités naturelles, qui ramène les choses précisément au même état dans les deux cas. Il est assez digne de remarque que ces phénomènes de transport intérieur sont sur-tout sensibles dans les piles composées de plaques d'un très-petit diamètre. La réaction de ces piles sur elles-mêmes est incomparablement plus forte et plus prompte que celle des piles à larges disques.

Tous ces changemens intérieurs étant bien constatés, il faut examiner quelle influence ils peuvent avoir sur l'état électrique, et, par suite, sur la permanence de l'action chimique que l'appareil voltaïque exerce.

Commençons par l'absorption de l'oxygène, au moyen de laquelle l'énergie chimique et physiologique de la pile est augmentée. Il est clair que cet accroissement n'aurait pas lieu, si la conductibilité était parfaite; car alors chaque élément métallique de la pile tirerait instantanément du sol, par transmission directe, la quantité d'électricité qui lui est nécessaire, selon le rang qu'il occupe. Ainsi, la pile se rechargerait continuelle-

ment d'elle-même, et au même degré, aussitôt qu'on l'aurait déchargée, ce qui entretiendrait nécessairement la constance et la continuité de son action. Mais les expériences contenues dans le précédent chapitre nous ont appris que ce cas d'une conductibilité parfaite est absolument idéal; et, quoiqu'il ait été utile de le considérer d'abord pour concevoir nettement l'accroissement de l'électricité par la superposition des couples métalliques, il faut nécessairement modifier ces abstractions par la circonstance d'une conductibilité imparfaite, pour avoir une idée complète de la pile, telle qu'on peut la former réellement.

Selon les idées de Volta, l'oxygène ne pourrait agir qu'en établissant une communication plus intime entre les élémens métalliques de la pile, en les serrant pour ainsi dire par l'oxydation les uns contre les autres, et contre les rondelles imparfaitement conductrices qui les séparent. Il est en effet vraisemblable que cette adhérence contribue à augmenter la conductibilité, sur-tout dans les commencemens de l'action. Mais, lorsqu'elle est devenue assez forte pour que la pile tout entière ne forme plus, pour ainsi dire, qu'une masse solide, lorsque les rondelles humides interposées entre les disques se sont desséchées, que tout l'oxygène qui l'environnait a été absorbé, et que l'action chimique semble tout-à-fait éteinte, quel nouveau degré d'adhérence peut produire l'introduction d'une nouvelle quantité d'oxygène? Et sur-tout, comment un pareil effet pourrait-il s'opérer instantanément? Cette dernière circonstance exclut évidemment toute idée d'une cause simplement mécanique; elle prouve que la restitution de l'électricité tient à la seule présence de l'oxygène entre les couples métalliques; soit qu'il rende immédiatement à chacun d'eux, par son seul contact, la charge électrique qu'exige le rang qu'il occupe, soit que, par les combinaisons qu'il forme avec les substances qui composent l'appareil, il y rétablisse subitement la conductibilité.

Pour fixer précisément les conditions auxquelles cette restitution doit satisfaire, imaginons une pile montée de cette manière, cuivre, zinc, humide, et faisons-la communiquer

au sol par sa base cuivre. Dans l'état d'équilibre, toutes les pièces de cette pile auront un excès d'électricité vitrée dépendant du rang qu'elles occupent. Si l'on touche la pièce supérieure, l'excès qu'elle possède s'écoulera dans le sol, et elle tendra à le reprendre aux pièces inférieures à travers les conducteurs humides. Mais ces conducteurs n'étant pas parfaits, il faudra pour cela un certain temps; et, si l'on réitère la décharge avant que la communication ait pu se faire, la pièce supérieure prendra de l'électricité vitrée à la pièce de cuivre qu'elle touche immédiatement, de sorte que celle-ci acquerra un excès d'électricité résineuse; et la même chose arrivera plus ou moins à tous les couples métalliques. Tel doit donc être l'état d'une pile où, par l'effet d'une libre communication établie pendant long-temps entre les deux pôles, les conducteurs humides interposés entre les couples ont été tellement modifiés que la transmission de l'électricité ne s'y opère plus, ou ne s'y opère qu'avec trop de lenteur pour produire les phénomènes chimiques et physiologiques.

Cela posé, introduisons autour des disques une atmosphère d'oxygène. Cet oxygène se trouvera attiré par toutes les pièces de zinc qui sont à l'état vitré; il se combinera donc avec leur substance en vertu de l'affinité qu'il a pour elle, et de l'influence électrique qui l'y détermine. Mais l'oxide de zinc qui en résultera sera à son tour attiré vers la surface de la pièce de cuivre supérieure, que l'imperfection des conducteurs laisse à l'état résineux. Il portera donc à cette pièce l'électricité vitrée du zinc métallique qu'il abandonne; et ce mouvement de transport, continué du haut en bas de la pile, rétablira la transmission de l'électricité. La même chose arriverait encore dans une pile qui communiquerait au sol par son sommet zinc, parce que l'état imparfait des conducteurs permettrait de même aux élémens métalliques de se mettre dans des états opposés.

Cette explication, qui est due à M. Davy, s'applique également à toutes les autres décompositions chimiques qui s'opèrent dans l'intérieur de la pile. Les produits qui en résultent, attirés vers les surfaces diversement électrisées, transportent avec eux l'électricité de ces surfaces, et produisent directement

le même résultat qui naîtrait d'une parfaite conductibilité.

Toutefois, en reconnaissant que ce mouvement de transport doit contribuer au rétablissement de l'équilibre électrique, il est difficile d'admettre qu'il en soit l'unique cause; car il semble ne pouvoir agir que graduellement et avec lenteur, sur-tout dans les appareils où, par l'effet d'une longue communication entre les pôles, les rondelles humides ont été complètement desséchées. Il ne serait donc pas impossible que l'oxygène contribuât aussi au rétablissement de l'équilibre par son contact même, en vertu d'une décomposition opérée dans ses électricités naturelles par le contact des surfaces électrisées vitreusement. L'examen de cette possibilité pourrait offrir la matière d'une recherche utile. Au reste, quel que soit le mode par lequel la pile se trouve ainsi ranimée, il doit être assujetti à cette condition essentielle, que les deux électricités s'y trouvent développées ou transmises à-la-fois et en quantités égales, c'est-à-dire capables de se neutraliser mutuellement. Car, en essayant de recueillir, par le condensateur, l'excès de l'une ou de l'autre électricité qui peuvent se trouver développées par l'action électrique dans les appareils les plus énergiques, lorsque la communication était établie par des fils de métal entre leurs deux pôles, je me suis assuré qu'il était insensible aux épreuves les plus délicates.

En résumant les faits que nous venons d'exposer, on voit que toutes les modifications qui surviennent dans l'état chimique des conducteurs humides doivent influer sur l'action de la pile, soit en changeant les conditions de l'équilibre électrique dans le contact, soit en modifiant la conductibilité. Par suite de ces deux causes, la quantité d'électricité communiquée au condensateur par un simple contact, peut éprouver des variations considérables. C'est en effet ce qui est confirmé directement par l'expérience, et ce que font mieux sentir encore les grandes inégalités d'action chimique que présentent les mêmes piles à des époques diverses; circonstance sur laquelle nous aurons bientôt occasion de revenir.

L'affaiblissement progressif et inévitable des appareils élec-

tromoteurs montés avec des conducteurs humides, a fait faire aux physiciens une infinité de tentatives pour découvrir une construction de pile qui n'employât que des conducteurs parfaitement secs. Jusqu'ici leurs efforts ont été vains, ou du moins les piles ainsi construites n'ont pas possédé une conductibilité assez grande pour produire les décompositions chimiques, objet principal pour lequel on peut désirer un appareil permanent.

A cet égard, Volta a découvert entre les substances métalliques une relation très-remarquable, qui, si elle est aussi exacte qu'il le suppose, rend impossible la construction d'une pile avec ces seules substances. Je vais l'exposer d'après lui; mais je n'ai pas eu l'occasion de la constater.

Si l'on range les métaux dans l'ordre suivant, argent, cuivre, fer, étain, plomb, zinc, chacun d'eux deviendra vitré par le contact avec celui qui le précède, et résineux avec celui qui le suit. L'électricité vitrée passera donc de l'argent au cuivre, du cuivre au fer, du fer à l'étain, et ainsi de suite.

Maintenant, la propriété dont il s'agit consiste en ce que l'inégalité de charge électrique entre l'argent et le zinc est égale à la somme des différences qui conviennent aux métaux qui sont compris entre eux dans la série : d'où il suit qu'en les mettant en contact, dans cet ordre, ou dans tel autre que l'on voudra choisir, les métaux extrêmes seront toujours dans le même état que s'ils se touchaient immédiatement. Par conséquent, si l'on imagine un nombre quelconque d'éléments ainsi disposés, dont les extrémités seraient, par exemple, argent et zinc, on aurait le même résultat que si les éléments étaient seulement formés de ces deux métaux; c'est-à-dire qu'il n'y aura pas d'effet, ou qu'il sera le même que celui qu'aurait produit un seul élément.

Il paraît jusqu'à présent que la propriété précédente s'étend à tous les corps solides qui sont de très-bons conducteurs; mais elle ne subsiste pas entre eux et les liquides. C'est pour cela que l'on réussit à la construction de la pile par l'intermédiaire de ces derniers. De là résulte la division que fait Volta des conducteurs en deux classes : la première comprenant les

corps solides ; la seconde, les liquides. On n'a pu jusqu'ici construire l'appareil voltaïque que par un mélange convenable de ces deux classes ; il devient impossible avec la première seulement, et l'on ne connaît pas encore assez exactement l'action mutuelle des corps qui composent la seconde, pour prononcer s'il en est de même à leur égard. Cependant, il paraît que cela ne doit pas être, car la nature a réalisé de véritables piles à liquides dans les appareils électriques de certaines espèces de poissons, particulièrement de la torpille. Ces appareils, situés près de l'estomac de l'animal, sont composés d'une multitude de tubes rangés à côté les uns des autres et remplis d'un liquide particulier. Il paraît que l'animal peut mettre à volonté cette pile en action ; et alors il communique de vraies secousses électriques aux corps animés avec lesquels il est en contact. Il semble même, si les faits cités sont exacts, qu'il aurait le pouvoir de diriger sa décharge à distance, à travers l'eau.

Si l'on n'a pas réussi à former des appareils voltaïques absolument secs et indécomposables, on est parvenu à en obtenir dont l'action, à la vérité très-faible, est du moins de longue durée. Telle est la pile que M. Hachette a construite avec des couples métalliques séparés par une simple couche de colle de farine, mêlée de sel marin. Lorsque cette couche est séchée, l'humidité qu'elle tire de l'atmosphère la rend assez conductrice pour permettre le rétablissement de l'équilibre électrique entre les élémens métalliques, dans un temps inappréciable ; aussi elle charge le condensateur par un simple contact sensiblement instantané, et elle conserve cette propriété pendant des mois et des années entières, ce qui en fait un véritable électrophore ; mais elle ne donne ni commotion, ni saveur, ni action chimique. M. Zamboni a construit aussi une pile dont l'effet électrique paraît très-durable ; il la compose avec des disques de papier, doré ou argenté sur une de ses faces, et recouvert sur l'autre d'une couche d'oxide de manganèse pulvérisé. Alors, dans la superposition de ces disques, les couples métalliques se trouvent formés d'argent ou d'or, en contact avec l'oxide de manganèse ; et le papier interposé sert de conducteur. De là résulte une transmission

d'électricité très-faible ; aussi obtient-on seulement des signes électriques, de même qu'avec la pile à la colle, mais point d'action chimique, ni de commotion, ni même de saveur. Cette dernière classe de phénomènes exige donc un rétablissement d'équilibre électrique plus rapide. Pour mettre en évidence les effets extrêmes de ce retard, j'ai construit des piles où le corps humide était suppléé par des disques de nitrate de potasse fondus au feu ; alors la conductibilité était si faible que le condensateur mettait un temps sensible à se charger, et se chargeait de plus en plus, avec le temps, jusqu'à une certaine limite, qui était la même qu'avec les piles les plus énergiques, pour un nombre d'étages pareil. D'après la loi de ces charges, j'ai pu conclure que la quantité initiale d'électricité, donnée par une pareille pile au condensateur, dans un temps infiniment petit, était incomparablement moindre qu'avec les piles ordinaires ; et, comme ce sont ces charges initiales qui produisent les décompositions chimiques, quand la communication est établie entre les deux pôles, on voit pourquoi ces piles, où la conductibilité est très-faible, ne produisent point ces phénomènes, et ne donnent ni action chimique, ni saveur, ni commotion.

La même considération explique aussi pourquoi des appareils voltaïques qui exercent d'abord une action chimique puissante, lorsque les couples métalliques qui les composent viennent d'être mis en contact avec des conducteurs liquides, s'affaiblissent rapidement, et bientôt ne produisent plus que des effets très-faibles, quoique le condensateur, en touchant leurs pôles, y prenne toujours des quantités sensiblement égales d'électricité. C'est que ce contact, quelque rapide qu'on le fasse, n'est jamais absolument instantané ; et même, à moins que la conductibilité ne soit excessivement affaiblie, comme dans la pile à disques de nitrate de potasse, il dure toujours assez pour permettre au condensateur d'acquérir le maximum de charge qu'il puisse recevoir. Mais le progrès de cette charge avec le temps, pour nous être insensible, n'en est pas moins réel, et peut avoir été incomparablement plus rapide au commencement de l'action : de sorte que les décharges initiales de l'ap-

pareil pouvaient produire alors des phénomènes qu'elles ne sont plus maintenant en état d'opérer.

En profitant de ces observations, on voit que la disposition de l'appareil voltaïque la plus favorable, pour produire des effets chimiques énergiques, sera celle où les charges électriques développées instantanément et continuellement par le contact des plaques métalliques de chaque couple, pourront s'écouler le plus librement possible à travers les conducteurs liquides qui les séparent. Il faudra donc d'abord choisir pour les liquides ceux qui transmettent le mieux l'électricité ; tels paraissent être les acides nitrique et sulfurique fortement étendus d'eau. Une autre condition favorable, sera de donner de larges surfaces aux plaques métalliques. A la vérité, cette grande étendue n'est pas nécessaire dans les parties où les deux métaux de chaque couple se touchent mutuellement ; car il paraît que l'électricité s'y développe instantanément, et s'y répand avec tant de rapidité que la plus petite surface de contact métallique suffit pour alimenter complètement les masses liquides les plus étendues et les plus conductrices, sous une force répulsive donnée. Mais, par cette raison même, dans le contact des plaques avec le liquide, l'étendue des surfaces aura une très-grande influence sur la quantité absolue d'électricité transmise en temps égal, et ainsi les effets croîtront avec leurs dimensions. Enfin, il faudra que les liquides interposés soient le plus possible entretenus dans leur état primitif de composition ou de conductibilité pendant que l'appareil est mis en usage ; et, comme on ne peut remplir cette condition par le seul accroissement des masses, ce qui rendrait le maniement de l'appareil incommode, et ce qui pourrait même nuire si l'on augmentait les intervalles par lesquels les couples métalliques sont séparés, il faudra faire en sorte que les liquides conducteurs puissent être renouvelés facilement, et mis seulement en contact avec les couples au moment où l'on en veut faire usage. On obtient tous les avantages que nous venons d'indiquer en formant l'appareil d'une suite de couples métalliques pareils à celui que nous avons déjà décrit, *fig. 61*. On fixe tous ces couples parallèlement les uns aux autres

sur une même tringle de bois assez forte pour les soutenir sans plier ; et l'on dispose au-dessous un nombre égal d'auges en bois ou en verre, que l'on remplit avec les liquides conducteurs, *fig.* 65. Veut-on faire usage de l'appareil, on abaisse la tringle de bois, et chaque couple vient se plonger dans l'auge qui lui correspond. Cesse-t-on d'opérer, on relève la tringle, et les auges remplies de liquide restent disposées pour une autre fois ; mais si l'on juge que les liquides ont besoin d'être renouvelés, on vide les auges, et on les remplit de nouveau. L'expérience a montré que, de toutes les dispositions jusqu'à présent en usage, celle-ci est la plus simple, la plus commode, et celle qui produit les plus grands effets.

On a construit des appareils voltaïques composés de fils d'un seul métal courbés en arc, et plongeant dans des vases remplis d'un seul liquide, sous lesquels, de deux en deux, on place des lampes qui les échauffent. La seule inégalité de température ainsi établie entre les deux branches des mêmes fils suffit, à ce que l'on assure, pour y déterminer une inégalité de charge électrique. Je n'ai pas eu occasion de vérifier ce fait ; mais il rentre complètement dans la Théorie générale de Volta, en adoptant l'interprétation que nous avons donnée de ses expériences :

Je terminerai ce chapitre par l'exposition de quelques phénomènes remarquables, qui s'expliquent très-facilement à l'aide des principes que nous venons d'établir relativement à l'influence de la conductibilité dans les effets de l'appareil voltaïque. On prend deux fils A, Z, *fig.* 66, l'un d'argent, l'autre de zinc, et on les plonge tous deux dans l'eau faiblement acidulée avec de l'acide sulfurique ou muriatique. Tant que les deux fils ne se touchent par aucun de leurs points, le zinc se dissout dans l'acide, et dégage de l'hydrogène, tandis qu'on ne voit, sur le fil d'argent, aucune bulle de gaz. Mais si l'on met les deux fils en contact par leur extrémité non plongée, alors il s'échappe des gaz de l'un et de l'autre. Ce phénomène est tout simple : tant que le contact des deux fils n'a pas lieu, il ne s'opère aucun dérangement dans l'équilibre de leurs électricités naturelles ; mais, aussitôt que la

contact est établi, ce dérangement a lieu, et il se produit de l'un à l'autre un courant électrique à travers le liquide conducteur. Jusqu'ici, il n'y a rien que de conforme à tous les autres phénomènes. Mais voici qui semble plus extraordinaire : si l'on recourbe le fil d'argent de manière à ce que son extrémité plongée dans le liquide vienne de nouveau toucher le zinc, ou même se soude avec lui de manière à former un anneau continu, moitié argent, moitié zinc, *fig. 67*, tous les effets ont encore lieu de même. Cependant le fil de zinc se trouve alors en contact avec l'argent par ses deux bouts; et, d'après les idées de Volta, les actions électromotrices exercées à ces deux bouts se contre-balançant l'une l'autre, il devrait rester dans l'état naturel, ce qui est contraire à l'observation. Mais cette contradiction disparaît en donnant, comme nous l'avons fait, aux expériences fondamentales, leur interprétation véritable, indépendamment d'aucune hypothèse. Nous avons vu que ces expériences indiquent seulement une condition d'équilibre électrique qui doit avoir lieu dans le contact des métaux les uns avec les autres, en vertu de laquelle, par exemple, l'argent en contact avec le zinc doit avoir un excès $-e$ d'électricité résineuse, et le zinc, un excès $+e$ d'électricité vitrée. Or, cette condition doit être satisfaite dans l'anneau aux deux points de jonction du fil d'argent avec le fil de zinc; alors, le même état électrique s'étend à chaque fil, à cause de la libre circulation de l'électricité à travers leur substance. Maintenant, si l'on plonge l'anneau dans un liquide conducteur, jusqu'au-dessus des points de jonction des deux fils, de manière qu'une portion de l'un et de l'autre se trouve immergée, les deux électricités contraires que ces portions possèdent se rejoignent à travers le liquide conducteur; et, comme elles se renouvellent sans cesse aux points de contact des deux métaux, il en résulte une circulation continue, qui doit produire tous les phénomènes propres à un couple voltaïque. Ce cas est absolument pareil à celui qu'offrirait une plaque pleine, *fig. 68*, dont la moitié supérieure serait de zinc, l'inférieure d'argent, et qui serait plongée dans un liquide conducteur jusqu'au-dessus

du point de jonction. Seulement, dans une pareille plaque, la condition de l'inégalité de charge électrique subsiste pour tous les points de la ligne de contact A B ; et c'est de là qu'elle se communique, en vertu de la conductibilité, à toute l'étendue de chaque lame ; au lieu que, dans l'anneau, cette condition d'inégalité n'existe primitivement que dans deux pointes, qui sont les pointes de jonction des fils.

Dans les premiers temps que l'on construisit des appareils à auges, deux des parois opposées de chaque auge étaient formées par les plaques métalliques elles-mêmes, et l'on versait le liquide conducteur dans les intervalles, ce qui donnait la disposition représentée *fig. 69*, dans laquelle la lettre Z indique les plaques de zinc, C, celles de cuivre, et L, le liquide interposé. Or, il arrivait souvent qu'après avoir versé le liquide dans les auges, le dégagement des gaz le gonflait jusqu'à le faire passer au-dessus de leurs bords supérieurs, qui se trouvaient ainsi mouillés de manière que chaque plaque de zinc communiquait au cuivre contigu par une couche humide. Cependant les effets du courant général se produisaient encore, quoique avec moins d'intensité que si les bords des plaques eussent été secs. C'est que la communication ainsi établie par chaque couche humide ne suffisait pas, à beaucoup près, pour transmettre toute l'électricité que le contact des surfaces totales des plaques développait. Le reste passait donc à travers le liquide des auges, et, sans cesse renouvelé par leur contact, formait, comme à l'ordinaire, un courant électrique continu.

D'après cela, il est évident que ce courant existerait encore si chaque zinc était mis en contact avec chaque cuivre par un meilleur conducteur qu'une simple couche humide ; seulement ses effets en seraient plus affaiblis, comme étant produits par une moindre quantité d'électricité. Pour réaliser ceci, prenez un simple couple à large surface, *fig. 70*, tel que ceux que nous avons décrits page 660, et, le plongeant dans un mélange acide, assurez-vous qu'il fait rougir le fil de platine qui communique du cuivre au zinc. Cela fait, interposez quelque part, entre les deux plaques de zinc et de

cuivre, un autre petit fil de métal, tel que f' , roulé sur lui-même, de manière qu'il se soutienne entre les deux plaques par son propre ressort. Vous verrez alors que, malgré cette interposition, le fil de platine f rougit encore, quoique, à la vérité, sur une moindre longueur; ou, si l'on veut, on pourra faire rougir entièrement un autre fil d'un diamètre moindre. C'est que la communication établie par le second fil ne suffit pas pour transmettre toute l'électricité développée par le contact de toute la surface des plaques; et le reste s'écoulant à travers le premier fil, suffit encore pour en déterminer l'ignition, de même qu'en traversant le liquide conducteur, ce reste y occasionne un dégagement de gaz; et si l'on pouvait douter du partage qui se fait ainsi du courant électrique entre les deux fils f, f' , on pourrait s'en convaincre par cette circonstance, que le fil f' , dont la seule pression détermine la communication la moins parfaite, s'échauffe lui-même sensiblement pendant que le fil f rougit. Ces curieuses expériences m'avaient été communiquées par M. Gay Lussac, comme indiquant la nécessité d'une modification dans la théorie de Volta, et ce sont elles qui m'ont conduit à les ramener à de simples conditions d'équilibre électrique, comme je l'ai expliqué page 622. Les mêmes principes font également comprendre pourquoi l'action d'une pile à étages, montée avec un liquide d'une grande conductibilité, ne s'éteint pas quand on la plonge tout entière dans l'eau. C'est que l'électricité circule dans l'eau moins vite que dans l'intérieur de la pile; d'où il suit que la communication établie par l'eau ne peut pas la décharger complètement tant que le liquide interposé n'est pas détruit.

CHAPITRE XIX.

Des Piles secondaires.

TANDIS que l'on épuisait toutes les combinaisons pour former un appareil voltaïque uniquement composé de substances sèches, et par conséquent inaltérables, Ritter en dé-

couvrirait un qui, sans pouvoir développer d'électricité par son action propre, est cependant susceptible d'être chargé par la pile voltaïque de manière à en acquérir passagèrement toutes les propriétés. C'est ce que l'on nomme les piles secondaires de Ritter.

Pour s'en former une idée juste et précise, il faut se rappeler une observation de Volta, que nous avons déjà rapportée page 622, et qui met en évidence l'imparfaite conductibilité des substances végétales imbibées d'eau.

Si l'on isole une colonne électrique dont le pôle supérieur soit vitré, et le pôle inférieur résineux, que l'on fasse communiquer ces deux pôles par un conducteur imparfait, comme serait, par exemple, pour ces petites quantités d'électricités, une bande de papier mouillée d'eau pure, chaque moitié de cette bande prendra l'électricité du pôle avec lequel elle communique. La partie supérieure sera vitrée, l'inférieure résineuse. Nous avons remarqué que ce phénomène est une conséquence évidente des lois que suit l'électricité, lorsqu'elle se distribue sur des corps qui la transmettent imparfaitement.

Concevons maintenant que l'on enlève ce conducteur imparfait avec un corps isolant, comme une baguette de verre; l'équilibre ne se rétablira pas instantanément entre ses deux extrémités, et elles resteront pendant quelque temps, l'une vitrée, l'autre résineuse, comme lorsqu'elles communiquaient aux deux pôles de la pile.

Ces différences diminueront peu à peu, à mesure que les électricités contraires se recomposeront, et bientôt leurs actions neutralisées deviendront tout-à-fait insensibles.

C'est à cela précisément que se rapporte l'expérience fondamentale de M. Ritter. Seulement il remplace le ruban humide par une colonne composée de disques de cuivre et de cartons humides entremêlés. Cette colonne est incapable par elle-même de mettre l'électricité en mouvement, du moins si l'on suppose ses élémens de chaque espèce homogènes entre eux; mais elle se charge par la communication avec la pile, comme la bande de papier humide dont nous avons parlé. Voici toutefois une différence essentielle dans les deux résul

tats. Il paraît que l'électricité, lorsqu'elle est faible, éprouve quelque difficulté à passer d'une surface à une autre. Cela semble du moins résulter des expériences de M. Ritter; et peut-être cette résistance est-elle produite par la couche imperceptible d'air non conducteur qui adhère aux surfaces de tous les corps. L'électricité introduite dans la colonne à un seul métal éprouve, donc une difficulté pareille à passer du métal au carton humide; et cet obstacle s'accroît à mesure que les alternatives sont plus nombreuses. Ainsi cette pile, une fois chargée, doit perdre son électricité très-lentement, lorsqu'il n'y a pas de communication directe entre ses deux pôles. Mais, si l'on établit cette communication par un bon conducteur, l'écoulement des deux électricités et leur combinaison s'y faisant avec vitesse, détermineront une décharge qui s'opérera, comme dans la bouteille de Leyde, par une commotion instantanée. A cet effet succédera un nouvel état d'équilibre, dans lequel les forces répulsives des différentes plaques seront diminuées en raison de la quantité d'électricité qui s'est neutralisée instantanément. Les décharges doivent donc se répéter en s'affaiblissant à mesure que l'on réitère les contacts; mais elles cessent bientôt d'être sensibles, par une suite même de l'égalité de charge qu'elles tendent à rétablir entre toutes les parties de l'appareil. En un mot, le jeu de cette colonne tient à ce qu'elle devient successivement plus ou moins bon conducteur, selon que ses deux extrémités communiquent ou ne communiquent pas entre elles.

Quant à la manière dont l'électricité doit s'y disposer, elle doit être telle que sa force répulsive à la surface de chaque plaque, combinée avec la résistance des surfaces contiguës, fasse équilibre aux actions réunies de toutes les autres. Par conséquent, si l'on suppose le nombre des élémens impairs et tout l'appareil isolé, les quantités d'électricité iront en diminuant depuis les deux extrémités où elles seront égales et de signe contraire, comme dans la pile primitive, jusqu'au centre où elles seront nulles; mais, si l'appareil communique avec le sol par sa base, l'électricité ira en croissant dans toute l'étendue de la colonne, depuis cette base où elle sera nulle,

jusqu'au sommet où elle sera égale à celle de la pile primitive.

L'appareil que nous venons de décrire reproduit avec une moindre intensité les commotions, les décompositions de l'eau et les autres effets physiologiques ou chimiques que l'on obtient de la pile ordinaire. En y variant les nombres et l'ordre des disques de cartons et de cuivre, M. Ritter a obtenu plusieurs résultats intéressans. Ainsi il a observé que, de toutes les manières dont on peut disposer un certain nombre de conducteurs hétérogènes, l'arrangement où il y a le moins d'alternatives est le plus favorable à la transmission de l'électricité. Par exemple, si l'on construit une pile avec soixante-quatre disques de cuivre et soixante-quatre disques de cartons mouillés, disposés en trois masses, de sorte que tous les cartons fassent un assemblage continu, terminé de part et d'autre par trente-deux plaques métalliques, cette pile conduira très-bien l'électricité de la colonne de Volta, et se chargera par conséquent très-peu, ou point du tout, d'une manière permanente. Si l'on interrompt les conducteurs humides par une plaque de cuivre, la faculté conductrice diminue déjà. Des interruptions plus fréquentes l'affaiblissent encore davantage ; et, en multipliant ainsi les interruptions, l'on parvient à des systèmes dans lesquels la conductibilité est à peine sensible. Ce sont ces phénomènes qui ont fait connaître à M. Ritter la résistance qu'éprouve une faible électricité pour passer d'une surface à une autre ; résistance qui n'a d'effet que dans cet état de faiblesse ; car, par une propriété singulière, une électricité assez forte pour la vaincre s'ouvre tout-à-fait un libre passage et s'écoule entièrement.

On vient de voir qu'en changeant la distribution des élémens dans une pile secondaire, on peut changer à volonté sa faculté conductrice. Il était naturel de penser que ces modifications influeraient diversement sur les effets chimiques et physiologiques. Pour en suivre l'effet progressif, M. Ritter a varié l'arrangement d'un nombre donné de conducteurs humides et solides, depuis la séparation en deux groupes jusqu'aux alternatives les plus nombreuses. Voici les résultats qu'il a obtenus.

Un très-petit nombre d'alternatives se laisse facilement traverser par le courant électrique de la pile primitive, supposée suffisamment forte. L'appareil ne se charge donc point d'une manière permanente ; les effets chimiques et physiologiques sont nuls. En multipliant davantage les alternatives, la pile primitive restant la même, la pile secondaire commence à se charger. Elle communique de l'électricité à l'électroscope ; elle dégage de l'eau quelques bulles de gaz, mais elle ne donne point de commotions dans les organes. Le nombre des alternatives s'accroissant encore, la charge électrique augmente ; on obtient la décomposition de l'eau, la saveur, la commotion. Mais, à une certaine limite d'alternatives, les effets chimiques et physiologiques cessent de croître, quoique la charge électrique totale reste constante, ou même continue d'augmenter. Passé ce terme, cette charge se soutient toujours, mais les autres effets s'affaiblissent. Le dégagement des bulles cesse d'abord, ensuite la commotion. On se retrouve donc alors arrivé à l'autre extrême d'une conductibilité trop imparfaite ; et la progression avec laquelle ces phénomènes s'éteignent, la charge électrique restant constante, achève de mettre dans une entière évidence ce que nous avons dit plus haut sur la manière dont ils dépendent de la vitesse de transmission.

On voit, d'après les mêmes principes, pourquoi l'appareil de M. Ritter est plus propre qu'aucun autre à mettre séparément en évidence ces deux genres d'action. Dans la pile ordinaire, la quantité d'électricité libre croît avec le nombre des étages, et balance la résistance qui résulte des alternatives ; au lieu que, dans la pile secondaire, la force répulsive de l'électricité aux deux pôles ne peut jamais surpasser celle de la pile primitive ; et la résistance que les alternatives fournissent est employée tout entière à modifier l'écoulement d'une même quantité d'électricité.

Enfin, si la colonne de Volta peut charger ainsi la pile secondaire de Ritter, elle doit cette faculté à ce que la force répulsive de l'électricité à ses pôles est extrêmement faible, et pour ainsi dire imperceptible. Une électricité plus forte,

telle, par exemple, que celle des machines électriques ordinaires, traverserait entièrement le système des corps conducteurs qui forment la pile secondaire, et par conséquent ne pourrait produire aucun des effets qui résultent de son accumulation.

Les différences qui existent dans les actions chimiques des piles ordinaires, à raison de la grandeur de leurs plaques, se retrouvent aussi dans les piles secondaires. La nature des cartons, leur épaisseur, la nature de la dissolution dont ils sont humectés, enfin l'ordre dans lequel on les entremêle, et une foule d'autres petites circonstances, modifient ces effets de mille manières, qu'il serait aussi utile que curieux d'examiner.

La pile secondaire étant, comme nous l'avons dit plus haut, formée avec un seul métal et une substance humide, il semble, au premier coup d'œil, qu'elle ne doit pas avoir d'électricité par elle-même; et en effet, son action propre, avant qu'on l'ait chargée, est à peine appréciable. Mais on peut cependant la rendre sensible en mettant les muscles et les nerfs d'une grenouille en communication avec ses deux extrémités. Cela tient probablement à une petite inégalité de constitution qui doit toujours exister inévitablement entre un nombre de pièces un peu considérable, quoique formées d'un même métal.

CHAPITRE XX.

Sur la résistance inégale que les deux électricités éprouvent en traversant différens corps, quand elles sont fort affaiblies.

En étudiant la manière dont l'électricité se décharge à travers des corps de différente nature, nous avons reconnu que ceux même qui semblent le mieux la conduire, opposent cependant à son passage une résistance appréciable. En rapprochant ces résultats de ceux que nous avaient présentés les sup-

ports imparfaitement isolans, nous avons dû en conclure que l'imperfection de la conductibilité deviendrait de plus en plus sensible, à mesure que l'on diminuerait la force répulsive de l'électricité transmise ; de sorte qu'à un certain degré d'affaiblissement, déterminé pour chaque corps, tous les corps, et les métaux mêmes, produiraient un isolement parfait. L'appareil voltaïque fournissant une source d'électricité inépuisable, avec une force répulsive très-faible, réunissait les conditions les plus propres à ce genre d'épreuve ; aussi a-t-il fait découvrir, dans les propriétés conductrices des liquides, des différences et des imperfections que nos machines électriques ordinaires ne nous auraient pas fait apercevoir.

En s'appliquant à des recherches de ce genre, M. Ermann a fait cette observation curieuse, que la faculté conductrice de certains corps pour les deux électricités est inégale ; de sorte qu'en atténuant de plus en plus la force répulsive, on trouve un terme où le corps devient isolant pour l'une, tandis qu'il est encore conducteur pour l'autre ; c'est ce que prouvent les expériences que nous allons rapporter.

M. Ermann isole un appareil voltaïque, monté avec un liquide bon conducteur, tel, par exemple, que la dissolution de muriate de soude. Il fait communiquer chacun de ses pôles à un électroscope à feuilles d'or très-sensible, pareillement isolé. Bientôt chaque électroscope a acquis le degré de divergence déterminé par le nombre des plaques, et le zéro électrique se trouve au milieu de l'appareil.

Cela fait, il prend un prisme de savon alcalin bien sec, et il insère, dans un de ses bouts, un fil métallique qui communique au sol. S'il touche par l'autre bout l'un quelconque des pôles de la pile, ce pôle est aussitôt déchargé, la divergence de l'électroscope y devient nulle ; et, au contraire, l'électroscope de l'autre pôle diverge davantage. Tout se passe comme si le pôle touché par le prisme eût communiqué avec le sol, et le savon semble faire alors l'office de conducteur pour l'une ou l'autre électricité indifféremment.

Maintenant, la pile restant toujours isolée, et les forces répulsives de ses pôles étant rétablies, faites communiquer ces

pôles ensemble par l'intermédiaire du même savon, en insérant dans les deux bouts du prisme des fils métalliques qui se rendent à chaque pôle. Malgré cette communication, les deux électroscopes continueront à diverger comme auparavant, de sorte que le savon semble alors faire l'office d'un corps non conducteur.

Mais, lorsque cet isolement est bien reconnu, touchez un instant le savon avec un fil de métal qui communique au sol; aussitôt le pôle résineux sera neutralisé, et la force repulsive du pôle vitré atteindra son maximum. Ainsi le savon reprend de nouveau sa faculté conductrice, mais seulement pour laisser écouler l'électricité résineuse; et c'est toujours celle-ci qu'il transmet de préférence, même quand on le touche tout auprès du fil qui se rend au pôle vitré de la pile. Ce pôle n'en reste pas moins isolé.

La flamme de l'alcool présenta à M. Ermann des effets pareils; mais la disposition conductrice était en faveur de l'électricité vitrée. Tout ceci doit s'entendre seulement des degrés d'électricité très-faibles, tels que les donne l'appareil électromoteur; car la flamme de l'alcool et le savon conduiraient imparfaitement à la vérité, mais d'une manière sensiblement égale, des électricités plus énergiques.

En répétant ces expériences, l'éther sulfurique m'a présenté une propriété qui complète celles qu'a découvertes M. Ermann. Ce liquide, interposé entre les deux pôles de la pile, semble les isoler comme le savon et l'alcool. Si l'on place dans le cercle un appareil pour la décomposition de l'eau, il ne se dégage point de bulles; enfin tous les signes de l'isolement des deux pôles sont complets. Mais si l'on touche un seul instant l'éther avec un fil métallique, pour le faire communiquer avec le sol, en appliquant en même temps un condensateur à l'un quelconque des pôles de la pile, ce condensateur se charge complètement, comme si l'éther était devenu tout-à-coup conducteur de l'espèce d'électricité qui appartient au pôle où le condensateur est appliqué.

En rendant compte de ces expériences, j'ai dit que les deux pôles de la pile *semblaient* isolés par l'interposition d'un

prisme de savon alcalin. C'est qu'en effet l'isolement n'est que partiel. Le mouvement de l'électricité, dans le prisme de savon, n'est pas absolument nul; il est seulement beaucoup plus lent que dans la pile même, ce qui permet à celle-ci de se recharger sensiblement, et d'acquérir une tension à ses pôles pendant que le savon la décharge. La preuve en est que le même prisme de savon conduit *toute* l'électricité d'une pile moins conductrice, telle que la pile à la colle; car il ôte *absolument* toute tension à ses pôles, de sorte que le condensateur ne se charge plus du tout en les touchant. La flamme d'alcool interposée entre les pôles de cette même pile, ne la décharge pas si complètement. Elle laisse subsister une tension, et l'on peut y répéter les expériences de M. Ermann. Cette flamme conduit donc l'électricité moins bien que le savon alcalin. J'ai donné le détail de ces expériences dans le Bulletin des Sciences, pour 1816, page 103.

FIN DU TOME PREMIER.

TABLE

DES CHAPITRES

CONTENUS DANS CE VOLUME.

LIVRE PREMIER.

Considérations générales sur la Matérialité, l'Équilibre et le Mouvement.

CHAPITRE PREMIER. Examen des propriétés par lesquelles les corps nous deviennent sensibles.	Page 1
CHAP. II. Notions fondamentales : espace, repos, mouvement, force.	26
CHAP. III. De l'équilibre produit par la composition de plusieurs forces appliquées à un même point matériel.	31
CHAP. IV. De l'équilibre produit par la composition de plusieurs forces appliquées à divers points matériels liés entre eux invariablement.	35
CHAP. V. De l'équilibre dans les machines simples.	47
Du Levier.	48
De la Poulie.	50
Du Plan incliné.	52
CHAP. VI. De l'équilibre des liquides incompressibles.	54
CHAP. VII. De l'équilibre des fluides aériformes.	64
CHAP. VIII. Conditions de l'équilibre des corps solides plongés dans des fluides pesans.	68
CHAP. IX. Notions générales sur les diverses espèces de mouvemens, sur le temps, la vitesse et la masse.	69
CHAP. X. Du mouvement curviligne : forces centrales : force centrifuge.	87
CHAP. XI. Oscillations du pendule.	99
CHAP. XII. Du choc des corps.	105
CHAP. XIII. Des mouvemens des liquides incompressibles.	111
CHAP. XIV. Des mouvemens des corps solides dans les milieux résistans.	126
CHAP. XV. Des mouvemens des fluides aériformes.	129

LIVRE II.

Exposé des phénomènes généraux et des moyens d'observation communs à toutes les sciences d'expérience.]

CHAPITRE PREMIER. Des procédés qui servent à mesurer l'étendue.	Page 131
CHAP. II. De la Balance et de la manière de s'en servir.	140
CHAP. III. De la construction du Thermomètre, et de la manière de s'en servir.	145
CHAP. IV. Sur les destructions et les reproductions de chaleur qui s'observent pendant le changement d'état des corps.	177
CHAP. V. De la pression atmosphérique et du Baromètre.	181
CHAP. VI. Rapports du Baromètre et du Thermomètre.	204
CHAP. VII. Lois de la condensation et de la dilatation de l'Air et des Gaz, sous les pressions diverses, à une même température.	207
CHAP. VIII. Des Pompes à liquides et à gaz.	216
CHAP. IX. Mesure de la dilatation des corps solides.	233
CHAP. X. Mesure de la dilatation des Gaz par la chaleur.	246
CHAP. XI. Mesure de la dilatation des Liquides par la chaleur.	253
CHAP. XII. Des Vapeurs en général, et d'abord de leur formation et de leur force élastique dans le vide.	260
CHAP. XIII. Mesure du poids des Vapeurs sous un volume donné à une pression et une température déterminées.	278
CHAP. XIV. Du Mélange des Vapeurs avec les Gaz.	283
CHAP. XV. De l'Évaporation.	290
CHAP. XVI. De l'Hygrométrie.	294
CHAP. XVII. De la Pesanteur spécifique des Corps.	303
CHAP. XVIII. Sur la manière d'obtenir la pesanteur spécifique des Gaz.	305
CHAP. XIX. Mesure de la pesanteur spécifique des Liquides.	318
De l'Aréométrie.	321
CHAP. XX. Mesure de la pesanteur spécifique des Corps solides.	323
CHAP. XXI. Des Phénomènes capillaires.	328
CHAP. XXII. De l'Élasticité.	337
CHAP. XXIII. Du Frottement.	348

LIVRE III.

De l'Acoustique.

CHAPITRE PREMIER. De la production et de la propagation du son.	350
CHAP. II. De la perception et de la comparaison des sons continués.	362

CHAP. III. Vibrations des Cordes élastiques.	Page 367
CHAP. IV. Approximations usitées en musique pour exprimer les intervalles des sons. Nécessité d'altérer la justesse de ces intervalles dans les instrumens à sons fixes; règles de ce tempérament.	382
CHAP. V. Exposition des divers procédés que l'on peut employer pour mettre les corps solides dans l'état de vibration sonore, et pour constater la nature des mouvemens qu'ils exécutent lorsqu'ils se trouvent dans cet état.	393
CHAP. VI. Vibrations des verges solides, droites ou courbes.	398
CHAP. VII. Vibrations des corps rigides ou flexibles, agités dans toutes leurs dimensions.	406
CHAP. VIII. Des Instrumens à vent en général; et des tuyaux cylindriques en particulier.	410
Des tuyaux à diamètre inégal.	433
Des Flûtes et Instrumens à vent percés de trous latéraux.	435
De la manière d'accorder les tuyaux à bouche. Procédés pour les mettre en ton.	436
Des Instrumens à Anches.	437
CHAP. IX. Sur la communication des mouvemens vibratoires.	443
CHAP. IX. Organes de l'Ouïe et de la Voix.	454
DE L'OUÏE.	455
DE LA VOIX.	461

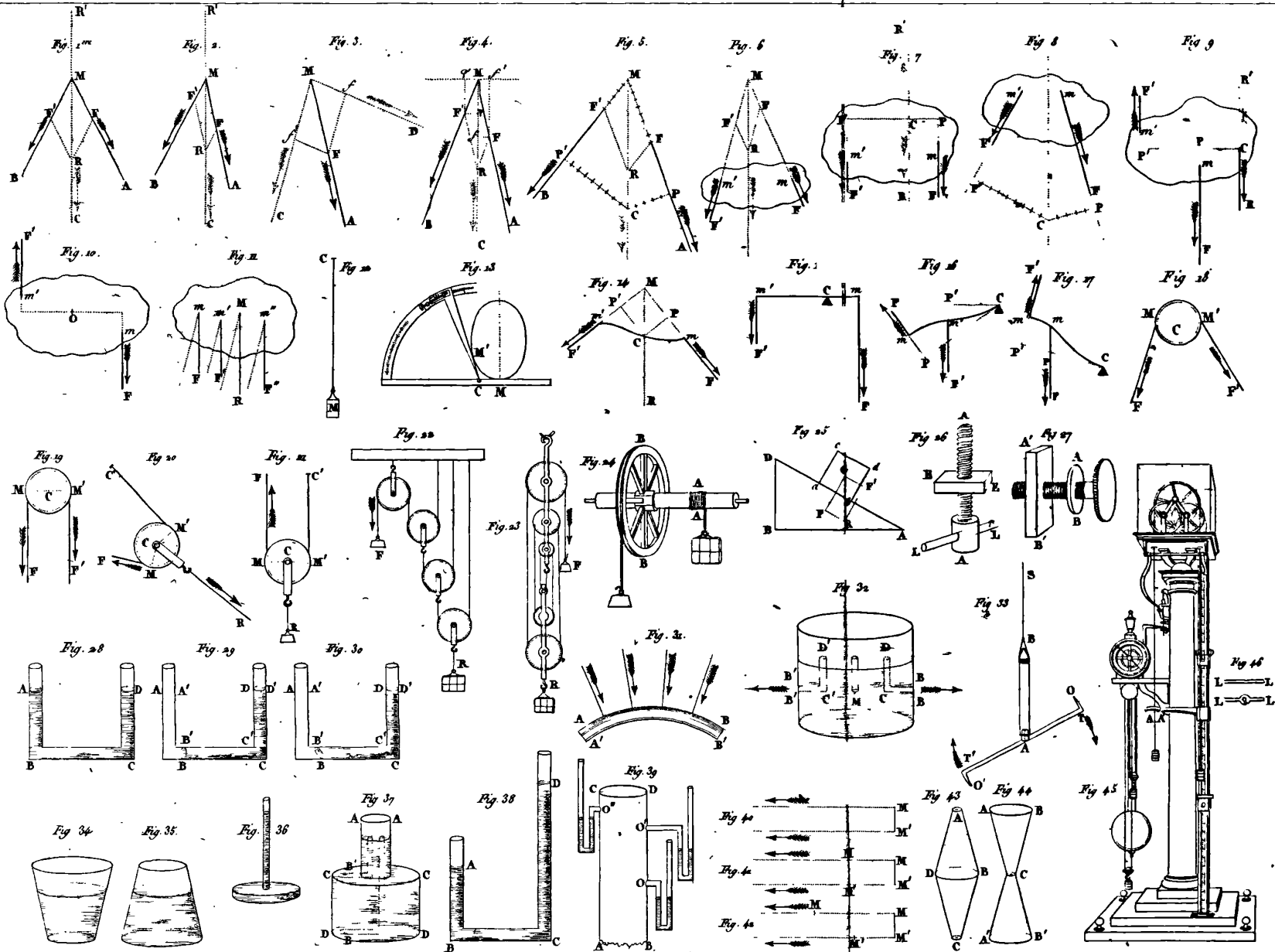
LIVRE IV.

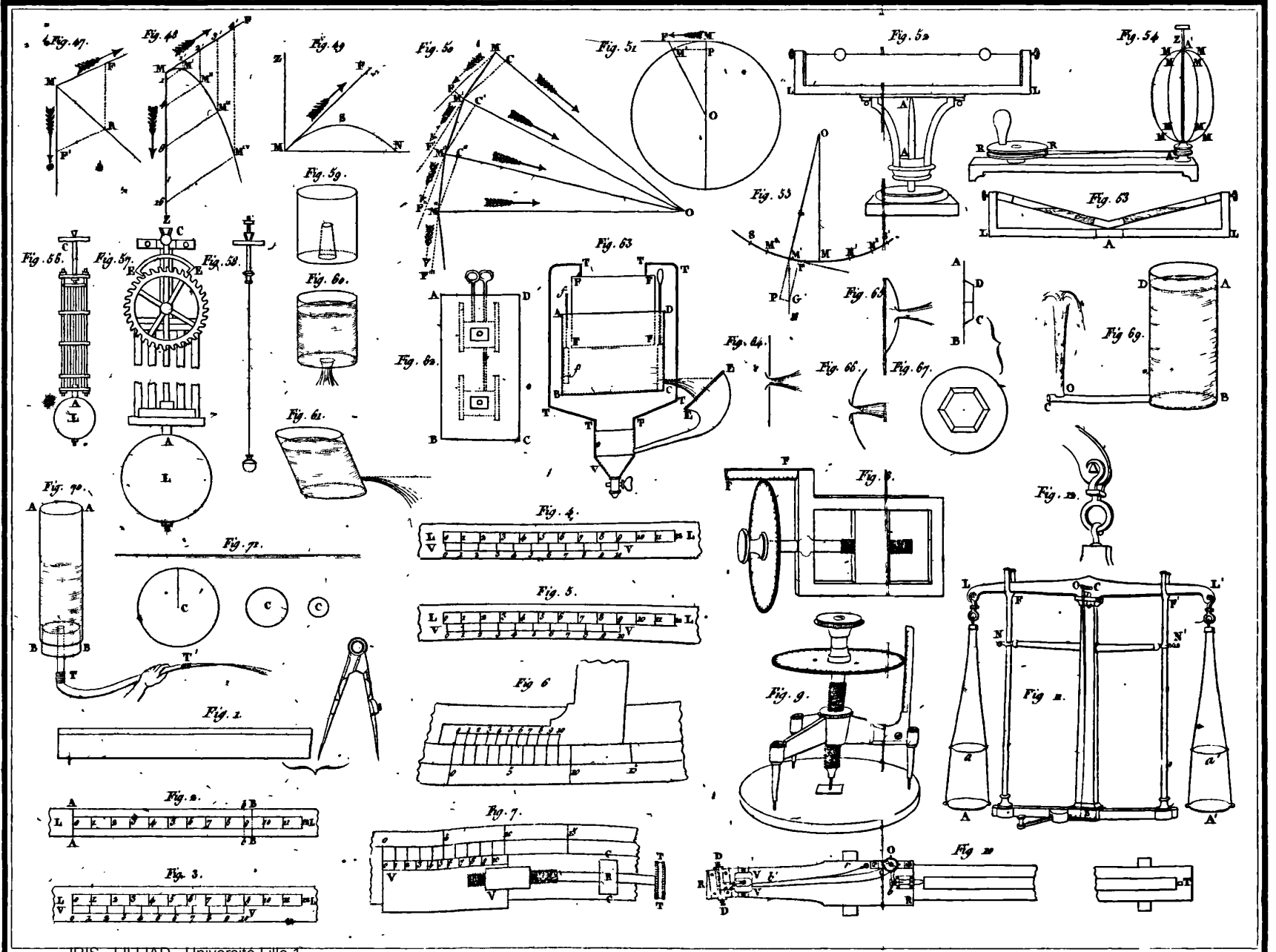
De l'Électricité.

CHAPITRE PREMIER. Phénomènes généraux des Attractions et Répulsions électriques; distinctions de deux sortes d'électricité.	469
CHAP. II. Des lois que suivent les Attractions et les Répulsions apparentes des corps électrisés.	483
CHAP. III. Des lois suivant lesquelles l'Électricité se dissipe par le contact de l'air et par les supports qui la retiennent imparfaitement.	494
CHAP. IV. Disposition de l'Électricité en équilibre dans les corps conducteurs isolés.	503
CHAP. V. Des Électricités combinées, et de leur séparation par les actions à distance.	515
CHAP. VI. Théorie des mouvemens excités dans les corps par les attractions et les répulsions électriques.	536
CHAP. VII. De la meilleure disposition à donner aux Machines électriques, et aux Conducteurs qui en font partie.	546
CHAP. VIII. Des Électroscopes.	554

CHAP. IX. Des Électricités dissimulées.	<i>Page</i> 568
LE CONDENSATEUR.	561
L'ÉLECTROPHORE. .	571
LA BOUTEILLE DE LEYDE.	576
LES BATTERIES ÉLECTRIQUES.	579
CHAP. X. Des piles électriques, et des Phénomènes que présentent les cristaux électrisés par la chaleur.	582
CHAP. XI. Effets mécaniques produits par la force répulsive des Électricités accumulées.	586
CHAP. XII. De l'Electricité atmosphérique et des Paratonnerres.	589
CHAP. XIII. De la Lumière électrique.	603
CHAP. XIV. Des diverses manières par lesquelles on peut développer l'électricité.	606
CHAP. XV. Du développement de l'électricité par le simple contact.	612
CHAP. XVI. Théorie de l'appareil voltaïque, en y supposant la conductibilité parfaite.	627
CHAP. XVII. Effets chimiques de l'Appareil voltaïque.	637
CHAP. XVIII. Examen des altérations qui s'opèrent dans l'Appareil voltaïque par sa réaction sur lui-même. Modifications qui en résultent dans son état électrique.	662
CHAP. XIX. Des Piles secondaires.	676
CHAP. XX. Sur la résistance inégale que les deux électricités éprouvent en traversant différens corps, quand elles sont fort affaiblies.	681

FIN DE LA TABLE DU PREMIER VOLUME.





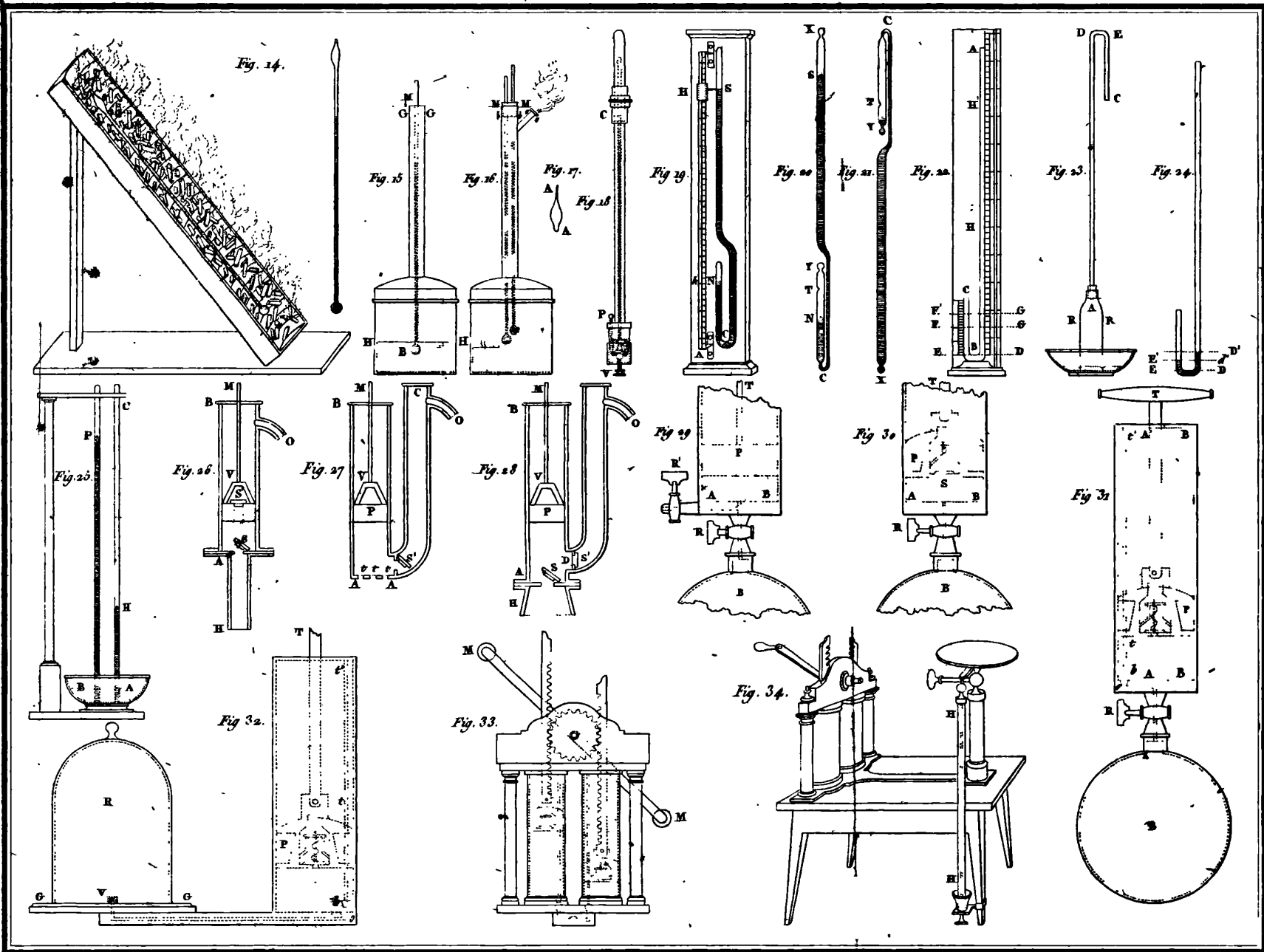


Fig. 35.

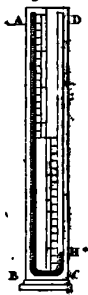


Fig. 36.

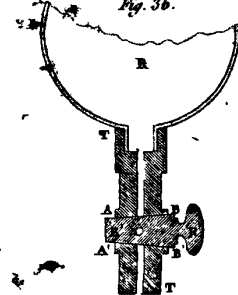


Fig. 37.

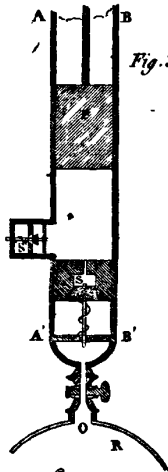


Fig. 38.

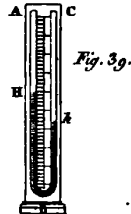
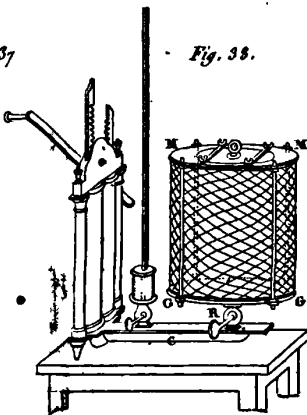


Fig. 39.

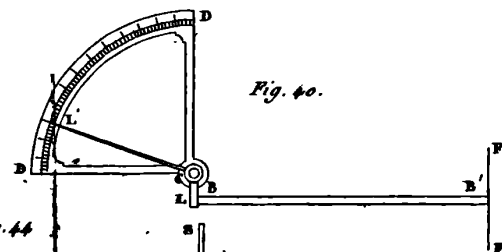


Fig. 40.

Fig. 41.

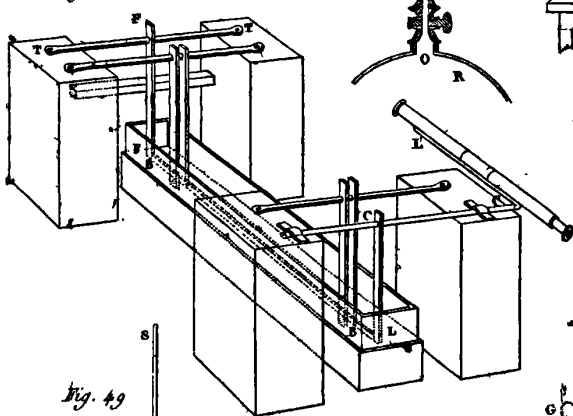


Fig. 44.



Fig. 47.



Fig. 48.

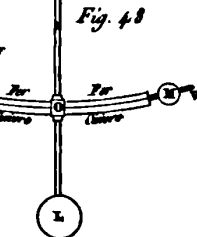


Fig. 45.

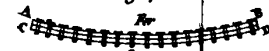


Fig. 46.

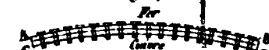


Fig. 42.



Fig. 43.

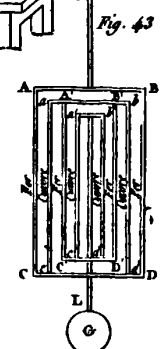


Fig. 52.

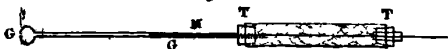


Fig. 54.

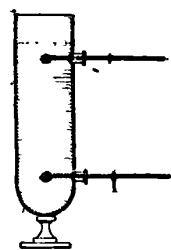


Fig. 55.



Fig. 56.



Fig. 57.

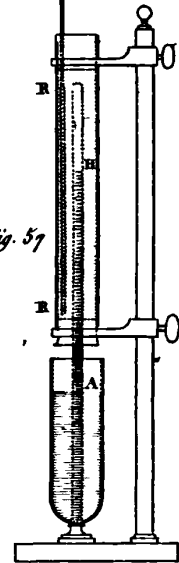


Fig. 49.

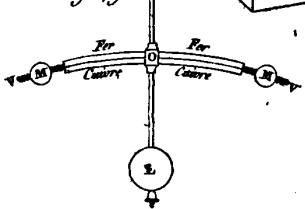


Fig. 51.

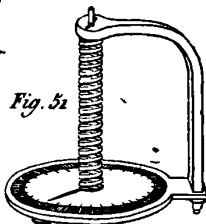


Fig. 53.

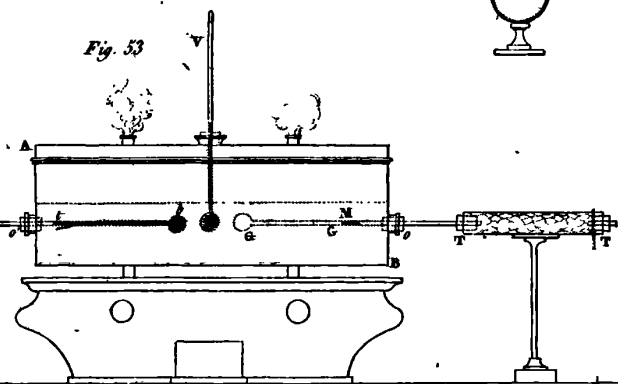


Fig. 50.

