

# TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE;

PAR M. L'ABBÉ HAÜY,

Chanoine honoraire de l'Église métropolitaine de Paris, Membre de la Légion-d'Honneur, Chevalier de l'Ordre de Saint-Michel de Bavière, de l'Académie royale des Sciences, Professeur de Minéralogie au Jardin du Roi et à la Faculté des Sciences de l'Université royale, de la Société royale de Londres, de l'Académie impériale des Sciences de Saint-Petersbourg, des Académies royales des Sciences de Berlin, de Lisbonne et de Munich; de la Société Géologique de Londres, de l'Université impériale de Wilna, de la Société Helvétique des Scrutateurs de la Nature, et de celle de Berlin; des Sociétés Minéralogiques de Dresde et d'Iéna, de la Société Batave des Sciences de Harlem, de la Société Italienne des Sciences, de la Société Philomatique de Paris, etc.

TROISIÈME ÉDITION,

Revue et considérablement augmentée.

OUVRAGE ADOPTÉ PAR LE CONSEIL ROYAL D'INSTRUCTION PUBLIQUE;  
POUR L'ENSEIGNEMENT DANS LES COLLÈGES.

TOME PREMIER.

PARIS,

M<sup>MS</sup> V<sup>R</sup> COURCIER, LIBRAIRE POUR LES SCIENCES,

RUE DU JARDINET-SAINT-ANDRÉ-DES-ARCS.

1821.

---

DE L'IMPRIMERIE DE HUZARD-COURCIER,  
RUE DU JARDINET-SAINT-ANDRÉ-DES-ARCS, N° 12.

---

## INTRODUCTION.

---

LES différens points de vue sous lesquels les corps naturels et les phénomènes qu'ils présentent peuvent être envisagés, ont donné naissance à divers genres d'étude, qui se sont multipliés à mesure que le progrès des lumières ajoutait de nouvelles branches à des sciences déjà formées. L'ensemble de toutes les connaissances qui en résultent a fourni les trois grandes divisions auxquelles on a donné les noms de *Physique*, de *Chimie* et d'*Histoire naturelle*.

Si nous considérons dans les corps des propriétés générales et permanentes, ou si les changemens que subissent ces corps sont passagers, en sorte que la cause qui les a produits n'ait besoin que de disparaître pour que les corps retournent à leur premier état; si, de plus, les lois qui déterminent les actions réciproques des mêmes corps se propagent à des distances plus ou moins considérables, les résultats de nos observations restent dans le domaine de la Physique. Mais lorsque les phénomènes dépendent d'une action intime que les molécules des corps exercent les unes sur les autres à des distances presque infiniment petites, et en vertu de laquelle ces molécules se séparent pour se réunir ensuite dans un ordre différent, et amener de nouvelles combinaisons ou de nouvelles propriétés, l'étude des

α

phénomènes appartient à la Chimie. Enfin, si notre attention se tourne vers les êtres particuliers dont les uns jouissent de la vie et du mouvement spontané, les autres vivent sans se mouvoir par eux-mêmes, et d'autres n'ont qu'une structure sans organisation ; et si notre but est de classer et de décrire ces êtres, le point de vue qui s'offre à nous embrasse toute l'Histoire naturelle, qui comprend seule trois sciences distinguées sous les noms de *Zoologie*, *Botanique*, et *Minéralogie*.

Dans la réalité, toutes les sciences qui se rapportent à la nature ne composent qu'une seule et même science, que nous avons sous-divisée de manière que les différens esprits pussent partager entre eux l'étude de ses diverses branches, et parcourir chacun toute l'étendue de celle qui a fixé son choix. On ne doit donc pas être étonné s'il arrive souvent que plusieurs sciences se rencontrent auprès d'une même vérité, en sorte qu'il n'y en ait aucune qui ne tienne aux autres par des points de contact plus ou moins nombreux. Et pour tirer un exemple de celle qui est le sujet de ce Traité, les découvertes modernes sur les propriétés des gaz et du calorique ne permettent plus à la Physique de s'isoler de la Chimie, lorsqu'il s'agit des phénomènes dont l'explication appartient à la théorie de l'air ou de la chaleur ; et ici le vrai physicien est celui qui parle le langage du chimiste. Il en est de même de toutes les parties de nos connaissances : tour à tour elles divergent, se rapprochent, et finissent souvent par se confondre, comme pour nous rappeler qu'elles remontent toutes à une même unité, et que la distinction que

nous avons mise entre elles provient uniquement des bornes de notre esprit et de celles du temps qui nous est accordé pour les cultiver. Nous exposerons bientôt le plan que nous nous sommes tracé, pour circonscrire la Physique dans les limites indiquées par le but de notre Ouvrage.

Les objets qui concernent l'étude de cette science offrent cet avantage, que nous n'avons besoin que de nous rendre attentifs pour les trouver réunis autour de nous; que les phénomènes qu'ils produisent sont d'une observation familière, et que la scène sur laquelle se développent ces phénomènes nous est sans cesse présente. Les expériences auxquelles sont employés les instrumens qui meublent nos cabinets de physique, ne sont autre chose que des imitations de ces phénomènes, destinées à nous en dévoiler les causes. Le jeu de la machine pneumatique nous instruit sur les propriétés du fluide que nous respirons. Les effets si piquans pour la curiosité qu'offre l'appareil électrique nous aident à déterminer les lois qui régissent le fluide accumulé dans un nuage orageux. L'aimant, qui semble commander aux mouvemens d'une aiguille de boussole que l'on présente à son action, ne fait que remplacer, pour un instant, le globe terrestre, qui exerce continuellement sur l'aiguille une action du même genre. L'image colorée du soleil, offerte par la lumière qui a traversé un prisme, nous donne une idée de la décomposition que subit le même fluide dans le nuage, qui au moment où il se résout en pluie, déploie le magnifique spectacle de l'arc-en-ciel. Tous ces instrumens si diversifiés sont autant d'interprètes

du langage visible que nous parle sans cesse la nature.

Ce mot de *Nature*, que nous employons si souvent, ne peut être regardé que comme une manière abrégée d'exprimer, tantôt les résultats des lois auxquelles l'Être suprême a soumis le mécanisme de l'univers, tantôt la collection des êtres qui sont sortis de ses mains. La nature, envisagée ainsi sous son véritable aspect, n'est plus un sujet de spéculations froides et stériles pour la morale. L'étude de ses productions ou de ses phénomènes ne se borne plus à éclairer l'esprit; elle remue le cœur, en y faisant naître des sentimens de respect et d'admiration à la vue de tant de merveilles qu'il portent des caractères si visibles d'une puissance et d'une sagesse infinies. Telle était la disposition où se trouvait le grand Newton, lorsqu'après avoir considéré les rapports qui lient partout les effets à leurs causes, et font concourir tous les détails à l'harmonie de l'ensemble, il s'élevait jusqu'à l'idée d'un Créateur et d'un premier Moteur de la matière, en se demandant à lui-même pourquoi la nature ne fait rien en vain; d'où vient que le soleil et les corps planétaires gravitent les uns vers les autres sans aucune matière dense intermédiaire; comment il serait possible que l'œil eût été construit sans la science de l'Optique, et l'organe de l'ouïe sans l'intelligence des sons (1)?

La véritable méthode pour parvenir à l'explication des phénomènes est celle qui a été adoptée par le même Newton, et à laquelle les sciences sont redevables des progrès rapides qu'elles ont faits et qu'elles font,

---

(1) *Optics Lucis*, lib. III, quæst. 28.

## INTRODUCTION.

v

encore tous les jours entre les mains de tant de savans célèbres. Pour mieux faire concevoir en quoi consiste cette méthode, il ne sera pas inutile de fixer ici, d'une manière nette et précise, l'idée que l'on doit se former de ce qu'on appelle une *Théorie*, d'en faire sentir le but et les avantages, de tracer les limites qui la séparent du système, et qui doivent empêcher de confondre les productions du génie, qui voit la nature telle qu'elle est, avec celle de l'imagination, qui la fait agir à son gré.

Le but d'une théorie est de lier à un fait général, ou au moindre nombre de faits généraux possible, tous les faits particuliers qui en dépendent. Nos premiers pas dans les sciences ont été dirigés vers la recherche des faits. On s'est attaché à les décrire exactement, à les bien vérifier, à les multiplier. Les uns étaient donnés par la simple observation et s'offraient comme d'eux-mêmes à une attention éclairée; d'autres étaient des résultats d'expériences faites avec ces soins, cette adresse et cette sagacité qu'exige ce genre de recherches. Tous ces faits, découverts à différentes époques et par différens observateurs, restaient d'abord comme isolés; quelques-uns même se présentaient sous l'air du paradoxe, et semblaient être en contradiction avec d'autres faits du même genre. Ainsi l'ascension de l'eau dans les corps de pompe, bornée à une hauteur de trente-deux pieds, mettait en défaut la Physique obscure et inintelligible du temps, qui attribuait cette ascension à une prétendue horreur de la nature pour le vide. Mais enfin paraissait le génie auquel avait été réservé l'avantage de rassembler tous ces anneaux

épars, et d'en former une chaîne continue qui en montrât la filiation et la dépendance mutuelle.

Ainsi la théorie de la gravitation universelle ramène les mouvemens célestes, l'aplatissement de la terre et les plus grands phénomènes de la nature, à ce seul fait constaté d'avance par l'observation, que la force de la pesanteur agit en raison inverse du carré de la distance. A l'aide d'une semblable loi, démontrée par l'expérience, relativement aux actions électriques et magnétiques, on voit les différens effets que présentent les corps sollicités par ces actions, naître, pour ainsi dire, les uns des autres, en partant d'une origine commune.

Les mots d'*attraction* et de *répulsion*, dont on se sert pour indiquer le fait fondamental sur lequel repose la théorie, n'expriment proprement que les vitesses avec lesquelles les corps tendent à s'approcher ou à s'éloigner les uns des autres. L'essentiel est que, connaissant la loi à laquelle est soumise cette tendance, et y appliquant le calcul, on puisse déterminer tous les autres faits, qui sont comme des corollaires du premier; et même la théorie a cet avantage, que l'on peut, par son secours, lire avec certitude dans l'avenir, parce que la filiation des faits une fois établie, ce qui a été devient un sûr garant de ce qui sera; en sorte qu'il dépend du calcul, en faisant un pas de plus, d'appeler un phénomène qui ne se serait présenté qu'après une suite d'années, et de lui donner une existence anticipée.

Ainsi, l'observation et la théorie concourent également à la certitude et au développement de nos con-

naissances; chacune a son flambeau à la main : l'observation dirige les rayons qui émanent du sien sur chaque fait en particulier, de manière qu'il soit mis dans tout son jour, qu'il soit nettement terminé, et qu'il se présente sous sa véritable forme; la théorie éclaire l'ensemble des faits; et, à la lumière de son flambeau, tous ces faits, d'abord épars, et qui semblaient n'avoir rien de commun entre eux, se rapprochent; ils prennent tous un air de famille, et semblent n'être plus que les différentes faces d'un fait unique.

Il est facile à présent de juger combien il y a loin du système à la théorie. Mais commençons par observer que le mot de *système* peut être pris dans une acception favorable, lorsqu'on l'emploie pour désigner une disposition d'objets relatifs aux sciences. Les géomètres s'en servent pour exprimer un ensemble de corps dont les actions mutuelles se combinent. Dans le langage de la saine Physique, il désigne l'arrangement des corps célestes autour d'un centre commun. Les naturalistes ont aussi leurs systèmes, qui consistent dans une distribution méthodique des êtres, propre à en faciliter l'étude.

Le système, tel que nous l'envisageons ici, pour le bannir de la Physique, consiste dans une supposition purement gratuite, à laquelle on s'efforce de ramener la marche de la nature. C'est un tourbillon, c'est une effluve de matière subtile, c'est tout ce qu'on veut (car tout est possible à l'imagination). A l'aide de cette supposition, qui va toujours au-delà des faits donnés par l'observation, on explique tout d'une manière vague et lâche, satisfaisante cependant, en ce qu'il

n'en coûte pas plus pour la concevoir que pour l'imaginer. Le système marche ainsi comme au hasard ; toujours errant dans les à peu près, incapable de déterminer aucun fait avec cette précision, cette rigueur qui fait le caractère de la théorie ; en un mot, le système est le roman de la nature, et la théorie en est l'histoire, et une histoire qui, sans jamais cesser d'être fidèle à la vérité, embrasse à la fois le passé, le présent et l'avenir.

Donnons maintenant une idée de l'ordre que nous avons suivi dans la distribution des matières qui sont l'objet de ce Traité, en nous bornant à l'énoncé de ce qu'elles offrent de plus remarquable.

Nous commencerons par l'exposé des propriétés les plus générales des corps, ou de celles qui tiennent de plus près à la nature de ces êtres, considérés comme de simples assemblages de particules matérielles. Telle est, par exemple, la mobilité, à l'occasion de laquelle nous donnerons la notion de la vitesse et celle de l'inertie. Telle est encore la divisibilité, ou la faculté qu'ont les corps de pouvoir être divisés en parties toujours plus petites.

L'universalité des phénomènes qui dépendent de la force à laquelle on a donné le nom d'*attraction*, assigne à ce sujet le premier rang après les propriétés dont nous venons de parler. Nous traiterons d'abord de l'attraction dans les grandes distances, ou de la pesanteur, et nous développerons les lois auxquelles est soumise la chute des corps. Nous ferons connaître le moyen ingénieux à l'aide duquel le célèbre Cavendish est parvenu à mesurer les effets de l'attraction mutuelle

que deux de ces corps exercent l'un sur l'autre, et qui ne nous paraît nulle que parce que nous en jugeons d'après le rapport de nos sens. En parlant de la pesanteur spécifique, nous exposerons la méthode qui a été suivie dans la détermination de l'unité de poids relative au nouveau système métrique, et nous joindrons à cet exposé un tableau abrégé du système pris dans son ensemble.

A l'égard de l'attraction dans les petites distances ou de l'affinité, nous ne l'envisagerons que sous les rapports par lesquels elle tient de plus près à la Physique.

Après avoir cité divers effets dans lesquels son existence se manifeste, nous exposerons la manière dont s'établit son équilibre entre les principes qui forment les combinaisons neutres; et en admettant l'hypothèse très vraisemblable que la loi qu'elle suit, à raison de la distance, est la même pour tous les corps, nous prouverons que quand deux sels neutres que l'on mêle ensemble font échange de leurs bases, les nouveaux sels qui en résultent doivent se trouver encore dans l'état neutre, conformément à l'observation. Nous comparerons ensuite l'affinité avec la pesanteur, et nous ferons connaître une idée du célèbre Laplace, d'après laquelle on pourrait les ramener toutes les deux à un même principe. Nous terminerons cet article par un abrégé de la théorie relative à l'un des résultats les plus remarquables de l'affinité, savoir, l'arrangement symétrique des molécules d'une multitude de corps naturels, sous des formes semblables à celles des polyèdres de la Géométrie.

De là nous passerons à la considération d'une autre force, savoir, celle du calorique, qui balance plus ou moins l'effet de l'affinité, et quelquefois finit par le détruire. Nous donnerons d'abord une idée des différentes modifications du calorique, soit qu'abandonné à lui-même, il agisse par le rayonnement, soit que s'engageant dans les corps, il passe en partie à l'état de calorique sensible, et en partie à celui de calorique latent. Nous expliquerons la manière dont son équilibre s'établit et se maintient, relativement à différens corps placés dans un même lieu, et comment la capacité de calorique et la faculté conductrice influent sur le passage à l'état d'équilibre. Nous ferons ensuite l'application de la théorie à divers effets, parmi lesquels on distinguera surtout ceux qui se manifestent dans les belles expériences de MM. de Rumford et Leslie. Des observations récentes ont fait reconnaître à M. le docteur Wells, célèbre physicien anglais, une action analogue du même fluide dans la production d'un des phénomènes les plus ordinaires de la météorologie. Nous voulons parler de la rosée, que l'on avait assimilée à la pluie, et dont le même savant nous fournira la véritable explication, fondée sur le rayonnement du calorique qui s'échappe des plantes, pendant les nuits calmes et sereines. Nous reviendrons ensuite sur le calorique spécifique dont nous avons déjà donné la notion, et nous indiquerons la manière de le comparer dans les différens corps, d'après les résultats offerts par le calorimètre.

Les effets du calorique pour produire dans les corps un changement d'état, seront l'objet d'un article auquel

nous donnerons le développement convenable. Nous ferons voir, en prenant l'eau pour terme de comparaison, comment les variations dans le rapport entre la force du calorique et celle de l'affinité, déterminent la conversion des solides en liquides, des liquides en fluides élastiques, et le retour de ceux-ci à leur état primitif. La théorie relative à ce sujet sera confirmée par des applications à divers phénomènes, dont un des plus remarquables est celui que présente une expérience imaginée par M. Leslie, dans laquelle l'eau se congèle en un instant par l'effet d'une évaporation accélérée.

Après quelques détails sur la différence entre l'action de la compression et celle du refroidissement, nous nous occuperons d'une loi importante par les applications dont elle est susceptible, savoir, celle que suivent les fluides élastiques dans la variation de leur volume, par l'effet de la pression. Nous décrirons d'abord les expériences de Boyle et de Mariotte sur l'air employé comme agent des phénomènes, desquelles ils ont déduit la conséquence que ce fluide se comprime en raison inverse des poids dont il est chargé. Ce résultat nous conduira à exposer une vue de Newton sur la quantité de calorique qui se dégage d'un fluide élastique, ou que ce fluide absorbe par une variation déterminée de température.

Viendront ensuite divers phénomènes, qui ne font autre chose que présenter sous une nouvelle forme la loi de Mariotte, par l'intervention du calorique. Nous indiquerons les moyens qu'a employés Amontons, pour mesurer l'accroissement de ressort que reçoit l'air entre deux limites connues de chaleur. Nous verrons

ensuite ce sujet prendre un nouveau développement, à l'aide des applications que Dalton et Gay-Lussac en ont faites, l'un à Londres, l'autre à Paris, en opérant sur les vapeurs et sur les gaz solubles, et en prenant le degré de la glace fondante et celui de l'eau bouillante pour limites de la température. Enfin le même sujet s'offrira sous le point de vue de sa plus grande généralité dans les résultats des nouvelles recherches entreprises par Gay-Lussac, Dulong et Petit, d'après lesquelles les dilatations de tous les gaz et de toutes les vapeurs s'assimilent entre elles sous tous les rapports. Une autre recherche qui est liée aux précédentes, et dont nous donnerons une idée, est celle qui a pour but de déterminer les pesanteurs spécifiques des fluides élastiques, en prenant celle de l'air pour unité.

Nous reviendrons ici sur l'action du calorique, dépendante des variations de la température, pour avoir occasion de citer plusieurs exemples de dilatations et de contractions relatives à divers corps solides; et la considération des effets produits par la même cause à l'égard des liquides nous donnera lieu d'exposer les principes sur lesquels est fondée la construction du thermomètre, les conditions requises pour la perfection de cet instrument, et les expériences à l'aide desquelles on s'est assuré que le thermomètre à mercure remplit ces conditions. Nous exposerons aussi le résultat de la méthode particulière à l'aide de laquelle Gay-Lussac et Dulong ont déterminé, avec une précision jusqu'alors inconnue, la dilatation absolue du mercure entre 0 et 100<sup>d</sup> pour chaque degré centésimal. Nous compléterons le tableau de tout ce qui

concerne ce sujet si intéressant par la description du thermomètre métallique, dont l'invention est due à MM. Breguet, et qui est doublement remarquable par son ingénieuse construction et par son extrême sensibilité.

La théorie de l'évaporation est devenue une branche de celle du calorique, d'après les nouvelles vues suggérées par une étude plus approfondie de ce phénomène. Nous ferons connaître d'abord un résultat constant qu'offre la formation de la vapeur de l'eau, et qui consiste en ce que la quantité de cette vapeur est toujours la même dans un espace donné, et par une température déterminée, soit que cette vapeur occupe seule l'espace dont il s'agit, soit qu'elle s'y trouve à l'état de mélange avec l'air ou avec tout autre gaz. Nous développerons la loi que suit, sous une pression donnée, la dilatation du gaz uni à la vapeur, à mesure que celle-ci se forme. En suivant la marche des phénomènes, nous arriverons par degrés au nœud de la difficulté, dont la solution a pour objet de déterminer l'influence réciproque de l'air et de la vapeur lorsque ces deux fluides sont mêlés ensemble. Après avoir exposé les théories de Leroi, de Dalton et de Deluc, relativement à ce sujet délicat, nous développerons la manière heureuse dont le célèbre Laplace l'a conçu, en ramenant tout à l'action du calorique, qui détermine les molécules de l'air et celles de la vapeur à se repousser mutuellement, et l'on jugera que cette vue satisfait pleinement à l'observation des phénomènes.

De toutes ces différentes connaissances qui appar-

tiennent proprement à la Physique générale, nous passerons à celles qu'embrasse la Physique particulière, et qui ont rapport à certains liquides ou à certains fluides remarquables par l'influence qu'ils exercent dans une multitude de phénomènes naturels.

Le premier est l'eau, que nous considérerons d'abord dans son état le plus ordinaire, qui est celui de liquidité, ce qui nous conduira à donner les principes de l'Hygrométrie, et à expliquer, d'après la belle théorie du célèbre Laplace, les phénomènes des tubes capillaires, et les attractions ou répulsions apparentes des petits corps qui flottent sur l'eau à une petite distance les uns des autres. Nous nous occuperons ensuite de l'eau à l'état de glace; et à cette occasion, nous ferons l'histoire de la congélation du mercure, et nous exposerons les résultats à l'aide desquels on a déterminé le véritable degré de froid auquel elle correspond. Enfin, nous traiterons de l'eau à l'état de vapeur, et nous ferons connaître le parti avantageux que l'industrie humaine a tiré de la grande force élastique que l'eau exerce dans cet état, pour l'appliquer, comme force motrice, au mouvement des machines à vapeur.

Les propriétés de l'air fixeront ensuite notre attention. Nous considérerons la pesanteur de ce fluide, son ressort, les effets de sa pression pour faire monter et descendre le mercure dans le tube du baromètre, pour élever l'eau dans les corps de pompe, et pour déterminer le jeu du syphon. La loi selon laquelle décroissent les densités de l'air, à mesure que les couches de ce fluide s'éloignent de la surface de la terre, nous fournira la théorie de la méthode de mesurer les hau-

teurs à l'aide du baromètre. De là nous viendrons aux différentes modifications dont l'air est susceptible, et qui produisent les vents et les météores aqueux. Mais les bornes de nos connaissances actuelles sur les premiers ne nous permettront que d'en donner des idées générales, à l'exception du vent d'est dont nous trouverons la cause dans la dilatation de l'air raréfié par l'action du soleil. Nous reviendrons ensuite sur quelques détails relatifs à l'atmosphère envisagée comme siège des vapeurs. Nous ferons voir que si elle n'existait pas, la quantité de vapeurs, toutes choses égales d'ailleurs, serait beaucoup moindre dans un espace pris depuis la surface de la terre jusqu'à une hauteur donnée. De là nous passerons à la formation des brouillards, des nuages, de la neige et de la pluie, et nous exposerons les résultats des belles observations que le célèbre Saussure a faites sur la vapeur vésiculaire, et dont il a tiré l'explication des divers météores qui viennent d'être cités. Nous compléterons tout ce qui regarde le même sujet, en déduisant de l'évaporation l'origine des fontaines. Après avoir parcouru les résultats les plus généraux des propriétés de l'air, nous donnerons l'histoire de la découverte qui a procuré à l'homme l'art jusqu'alors inconnu de s'élever dans ce fluide, et d'y voyager par le secours des ballons aérostatiques.

L'air sera enfin considéré comme véhicule du son, et comme recevant, de la part des corps sonores, un mouvement de vibration qui donne naissance aux sons comparés. Nous établirons la série des rapports d'après lesquels est formée notre échelle musicale, et nous

ferons connaître l'expérience des sons harmoniques attribuée à Sauveur. Nous comparerons la gamme du cor de chasse avec celle qui est en usage et qui a sa source dans l'accord parfait, et nous indiquerons les raisons qui paraissent décider de la préférence en faveur de cette dernière; puis nous entrerons dans quelques détails sur le tempérament. La manière dont le son se forme dans les instrumens à vent nous servira à expliquer comment il se propage au milieu d'un air libre, et comment différens sons traversent ce fluide sans se troubler mutuellement, et apportent à l'oreille des impressions simultanées et en même temps distinctes.

Après avoir considéré les effets du mouvement vibratoire dans les instrumens dont l'usage est réservé à l'art musical, nous passerons aux phénomènes produits en vertu du même mouvement, par les corps qui, entre les mains du célèbre Chladni, ont donné naissance à cette multitude d'expériences si remarquables sous le rapport de la Physique. Parmi ces corps, les uns sont des verges métalliques ou de quelqu'autre matière susceptible de rigidité, et les autres des lames de verre ou de métal. Nous nous bornerons à indiquer la manière d'opérer avec les premières, et nous nous étendrons sur les résultats que présentent les lames, lorsqu'en les pressant entre deux doigts, et faisant passer un archet avec frottement sur un point déterminé de leurs bords, on voit une poussière, que l'on avait répandue sur leur surface, s'arranger subitement sous l'aspect d'un dessin plus ou moins composé. Les figures des lames que nous avons choisies comme exemples se réduisent à deux, savoir, le carré et le cercle. Nous

avons disposé les expériences dans un ordre méthodique, d'après lequel on peut les comparer entre elles et en apercevoir les rapports et les différences, et en décrivant ces expériences, nous sommes entrés dans tous les détails convenables, pour les rendre faciles à ceux qui désireraient les vérifier. Dans un dernier article, nous verrons ces mêmes expériences se rattacher à l'art de la musique, au moyen du parti ingénieux que M. le docteur Savart en a tiré, pour perfectionner la construction des instrumens à cordes, et ajouter à leurs effets un surcroît d'agrément.

Arrivés à l'exposition des phénomènes électriques, nous donnerons au développement de cette branche de Physique une étendue proportionnée à son importance. Nous traiterons d'abord de l'électricité produite soit par le frottement, soit par la communication, et après avoir établi la distinction qui existe entre les différens corps relativement aux deux modes d'électrisation, nous proposerons l'hypothèse de deux fluides dont les actions se combinent dans la production des phénomènes, comme étant celle qui fournit la manière la plus heureuse et la plus simple de les concevoir.

Après quelques détails sur les diversités que présentent les corps électrisés par le frottement, nous ferons connaître le résultat d'une expérience imaginée par M. Libes, dans laquelle un disque métallique isolé, appliqué sur un taffetas gommé, se trouve électrisé résineusement, après qu'on l'en a séparé, tandis que le taffetas est à l'état d'électricité vitrée. Nous exposerons ensuite une propriété toute différente qu'ont plusieurs minéraux, d'acquérir la vertu électrique,

par une simple pression entre deux doigts, et que le spath d'Islande possède à un si haut degré, qu'il n'a besoin que d'être touché, pour la manifester d'une manière sensible et durable. Ce résultat nous conduira à expliquer la différence qui existe entre la pression et le frottement, relativement à la production de l'électricité.

C'est au célèbre Coulomb qu'est due la découverte de la loi à laquelle sont soumises les actions électriques. Nous décrirons l'instrument appelé *balance de torsion*, qui a servi à faire cette découverte, et nous donnerons les détails de la belle expérience, dont le résultat a été que les attractions et répulsions que les corps électrisés exercent les uns sur les autres, suivent la raison inverse du carré de la distance.

Ici se présentera une nouvelle expérience qui est un corollaire de la précédente, et de laquelle il résulte que le fluide libre, qui tient un corps conducteur à l'état électrique, est répandu autour de sa surface, sans qu'il en existe aucune portion à l'intérieur. Suivront d'autres expériences, qui prouvent que le fluide électrique n'a aucune affinité pour un corps, de quelque nature qu'il soit.

La manière dont le même fluide se distribue, soit sur la surface d'un seul corps, soit entre différens corps en contact les uns avec les autres, n'avait été déterminée par Coulomb que d'après des observations particulières. Nous la présenterons sous le double rapport de l'expérience et de la théorie, en profitant de la méthode savante à l'aide de laquelle M. Poisson l'a généralisée. Nous considérerons d'abord ce qui a lieu à

L'égard d'un seul corps électrisé, dans l'hypothèse où ce corps ayant d'abord une forme sphérique, arrive par degrés à celle d'un cylindre. De là nous passerons au cas où deux sphères de différens diamètres sont soumises à l'influence l'une de l'autre, et en supposant qu'on les laisse d'abord en contact, et qu'ensuite on les sépare, nous indiquerons les divers changemens que subit la distribution des fluides répandus sur leurs surfaces.

La résistance que les corps isolans opposent, en vertu de leur force coercitive, à la perte de leur électricité, sera ensuite envisagée sous deux points de vue différens. L'un se rapporte aux expériences que Coulomb a faites pour évaluer les effets de deux causes qui contribuent à cette perte, savoir : le contact de l'air environnant et l'intervention des supports. Le second point de vue offre une sous-division des corps naturels, déduite des divers degrés de leur force coercitive, dont tels sont les effets, que les durées de la vertu électrique, comparées entre elles dans ces mêmes corps, varient depuis quelques minutes jusqu'à plusieurs jours.

Les articles suivans présentent les résultats d'une nombreuse série d'expériences, dans lesquelles les électricités de deux corps combinent leurs actions; sujet vaste et d'autant plus digne d'attention, qu'on y trouve la réunion de toutes les différentes manières d'être des attractions et des répulsions électriques, dont les explications donnent la clef de presque toute la théorie de l'électricité. Nous partirons de l'équilibre qui existe entre deux corps lorsqu'ils sont dans l'état naturel. Supposant ensuite qu'ils aient passé à l'état électrique,

b..

nous déterminerons les divers effets qui ont lieu, suivant que leurs électricités sont homogènes ou hétérogènes, suivant que tous les deux sont conducteurs ou isolans, suivant enfin que l'un est doué de la faculté isolante, et l'autre de la faculté conductrice. Nous viendrons à l'hypothèse où l'un est électrisé et l'autre dans l'état naturel. Nous ferons voir comment, dans le cas de deux électricités homogènes, il peut arriver que la répulsion se change en attraction, et nous terminerons par la considération des attractions et des répulsions mutuelles de deux corps isolans dont les deux parties exercent des actions contraires par une suite de la décomposition qu'a subie le fluide naturel des mêmes corps, et de sa distribution dans leur intérieur.

Les principes exposés précédemment nous serviront à expliquer la faculté qu'ont les corps conducteurs terminés en pointe, de soutirer ou de lancer puissamment le fluide électrique. D'après les mêmes principes, nous donnerons d'abord une idée générale de la commotion qui accompagne l'expérience de Leyde, puis, dans une explication plus détaillée, nous suivrons l'accroissement progressif des deux électricités sur les deux surfaces de la bouteille, depuis l'instant où elle commence à s'électriser, jusqu'à celui de sa décharge. Nous décrirons la manière de répéter la même expérience, à l'aide du carreau fulminant, ou de la multiplier à l'aide de la charge par cascade, ou enfin de la disposer à se terminer par une violente explosion, en substituant à la bouteille une batterie électrique. Viendront ensuite les descriptions de plusieurs instrumens particuliers, sa-

voir : l'électrophore, le condensateur, l'électromètre de Cavallo et l'électromètre condensateur.

De là nous passerons à l'électricité naturelle, et nous exposerons les observations qui ont servi à constater l'identité du fluide électrique et de la matière de la foudre, la théorie des paratonnerres, avec des réflexions sur les avantages de ces instrumens, et la théorie de cet effet singulier que l'on a nommé *choc en retour*, et qui consiste en ce qu'un homme peut être foudroyé loin de l'endroit où l'explosion s'est faite.

La formation de la grêle, qui présentait des difficultés insolubles dans l'hypothèse où ses grains se seraient accrus pendant leur chute sur la terre, n'a plus rien qui embarrasse depuis que le célèbre Volta l'a rangée parmi les effets de l'électricité naturelle. Nous expliquerons, d'après sa théorie, la manière dont ces mêmes grains parviennent à un accroissement quelquefois considérable, en restant dans l'espace même où ils ont pris naissance, et où ils sont maintenus par les attractions et les répulsions de deux nuages électrisés en sens contraire, qui se les renvoient l'un à l'autre.

Un autre mode d'électrisation qui a lieu par l'intermède de la chaleur, relativement à diverses espèces de minéraux cristallisés, nous fournira des détails qui nous paraissent dignes d'attention, sur les actions électriques de ces corps, sur la vertu polaire qui naît de la distribution des deux fluides dans leur intérieur, et sur la corrélation que l'on a observée entre les formes de leurs sommets et les positions des pôles dans lesquels résident les deux électricités opposées. A la

suite de ces détails, nous exposerons la manière dont nous avons été conduits à reconnaître qu'à un degré de température plus bas que celui auquel commencent les actions dont nous venons de parler, la vertu polaire renaît dans les mêmes corps, avec la différence que leurs pôles ont subi un renversement. Nous indiquerons des circonstances dans lesquelles on peut observer le passage d'un état à l'autre, en soumettant successivement un des corps dont il s'agit, à la chaleur du feu et à la température de l'air environnant.

Ici s'offrira la nouvelle branche de Physique, connue sous le nom d'*électricité galvanique*, et dont le véritable principe se déduit du phénomène découvert par Volta, d'une électricité excitée par le simple contact de deux métaux différens. Nous exposerons d'abord les expériences faites par Galvani, sur les animaux à sang froid, et les conséquences que l'on en avait tirées : puis nous développerons la théorie à laquelle le célèbre physicien de Pavie a été conduit par ce principe également simple et fécond, que deux métaux isolés, mis en contact, se constituent dans deux états différens d'électricité. Nous ferons l'application de ce principe à la formation de la pile de Volta, et aux différens effets qu'elle produit, soit lorsqu'elle est isolée, soit lorsqu'elle communique avec le réservoir commun. Nous suivrons ces mêmes effets dans les piles secondaires inventées par Ritter; puis nous exposerons, d'après les découvertes du célèbre Erman, les phénomènes très remarquables qu'offrent certaines substances, telles que la flamme de l'alcool et le savon alkalin, qui ont, par rapport à l'électricité galvanique,

une faculté conductrice particulière. De là nous passerons aux observations faites sur les poissons électriques, tels que la torpille, dont les propriétés connues depuis long-temps paraissent dériver d'une structure analogue à la disposition des élémens de la pile. Nous ferons voir ensuite comment l'électricité galvanique, liée d'une part avec l'économie animale, a été amenée dans le domaine de la Chimie par le phénomène de la décomposition de l'eau. La nature de ce Traité ne nous permettra que d'indiquer tous les autres résultats d'expérience dont celui-ci n'a été que l'avant-coureur, et qui se sont montrés dans l'action de la pile dirigée par le célèbre Davy. Après quelques détails relatifs à l'influence avantageuse qu'exercent en général sur les effets de l'appareil galvanique les acides mêlés à l'eau interposée entre les métaux dont il est l'assemblage, nous terminerons en réunissant dans une même vue l'ensemble de tous les rapprochemens qui tendent à ne nous montrer, dans l'électricité galvanique, qu'une modification de l'électricité ordinaire.

La ressemblance qui existe entre les lois auxquelles sont soumises les actions des aimans et celles des corps idio-électriques, place naturellement la théorie du magnétisme à côté de celle de l'électricité. Nous adopterons de même, relativement à l'explication des phénomènes magnétiques, l'existence et les actions simultanées de deux fluides différens. Mais ici la nécessité de faire intervenir, à chaque instant, dans le développement de la théorie, la considération de l'action magnétique qu'exerce le globe, exigera qu'avant tout nous donnions une idée de cette action et de certains faits

généraux qui en dépendent. Nous ferons connaître ensuite la méthode qui a servi à prouver que la loi qui préside aux phénomènes du magnétisme, suit la raison inverse du carré de la distance, comme celle d'où dépendent les phénomènes électriques. De là nous viendrons à l'explication des effets que produisent les aimans que nous avons à notre disposition. Nous décrirons les expériences qui offrent la preuve que deux de ces corps s'attirent en raison inverse du carré de la distance, par les pôles de différens noms, et se repoussent suivant la même loi, par les pôles de même nom, et après avoir rappelé l'analogie qui en résulte entre ces actions et celles qu'exercent les deux fluides électriques, séparés l'un de l'autre dans les tourmalines, nous ferons connaître une autre expérience dont le but est de réunir les deux espèces d'action dans un même corps, en disposant l'appareil destiné à cette expérience, de manière que le corps ait à la fois deux pôles magnétiques et deux pôles électriques, provenant de la décomposition des deux fluides engagés primitivement entre ses molécules propres. Nous éclaircirons les paradoxes apparens que présentent plusieurs de ces effets, en particulier celui qui résulte de ce qu'une portion détachée d'un aimant devient tout à coup elle-même un aimant pourvu de ses deux pôles. Suivront les applications des principes de la théorie aux différentes méthodes d'aimanter, surtout à celle du double contact, dont nous analyserons les effets, en même temps que nous indiquerons la manière la plus avantageuse de l'employer. Il peut arriver que l'action du magnétisme naturel, pour maintenir une aiguille aimantée dans sa

direction, l'emporte sur l'attraction d'une très petite quantité de fer renfermée dans un corps que l'on présente à cette aiguille, auquel cas elle restera immobile. Nous indiquerons un moyen simple de mettre celle-ci en équilibre, et de la rendre sensible à l'attraction dont nous venons de parler.

Dans l'article suivant, nous reprendrons avec plus de détail ce que l'observation et la théorie nous ont appris, relativement à la déclinaison et à l'inclinaison de l'aiguille aimantée, aux variations que l'une et l'autre subissent, à mesure que l'on change de lieu, ou par succession de temps, dans un même lieu, et à celles qui ont été observées dans l'intensité des forces qui sollicitent cette aiguille. Nous ferons connaître une observation récente du capitaine Parry, qui est en faveur de l'opinion que les deux centres d'action magnétique du globe sont situés à de grandes distances du centre de la sphéricité; et après avoir expliqué plusieurs résultats d'observations relatives, les unes à la force directrice des aiguilles, les autres à l'égalité des forces qui la tirent en sens contraire, nous développerons les phénomènes singuliers que produit le magnétisme du globe en agissant sur les instrumens de fer non aimanté qui sont entre nos mains ou autour de nous. Cependant nous indiquerons des circonstances où le magnétisme acquis par le fer paraît dépendre d'une action purement mécanique, telle que la pression ou la percussion. Nous citerons aussi les observations qui prouvent que l'action de la foudre est capable de développer la vertu magnétique dans le fer, et nous donnerons la manière d'obtenir le même effet, à l'aide

d'une décharge électrique. Nous ajouterons quelques détails sur l'état de magnétisme habituel auquel l'action du globe a donné naissance dans les différentes mines de fer que renferme le sein de la terre. Nous exposerons ensuite les résultats des expériences qui ont fait reconnaître les effets du magnétisme dans le Cobalt et le Nickel, et des moyens très précis employés par notre célèbre confrère M. Laugier, pour obtenir ce dernier métal dans un plus grand état de pureté que celui auquel l'avaient amené les expériences faites précédemment par d'autres chimistes. Nous terminerons tout ce qui concerne ce sujet par des considérations générales qui auront deux buts différens : les unes présenteront un résumé des différentes hypothèses que les physiciens ont imaginées sur la cause de cette force magnétique qui réside dans le globe terrestre ; les autres renfermeront une comparaison succincte des fluides électrique et magnétique envisagés relativement à leur manière d'agir et aux fonctions qu'ils exercent.

L'action de la pile galvanique, dont les effets attribués d'abord à un fluide particulier avaient semblé depuis être fixés sans retour parmi ceux de l'électricité, reparaitra ici sous une nouvelle forme, à la suite du magnétisme. Après avoir décrit avec le détail convenable, les découvertes importantes du célèbre Ørsted, auquel la Physique est redevable de cet accroissement, nous ferons connaître celles auxquelles ont été conduits MM. Ampère et Arago, en suivant la route ouverte par le savant danois, et nous exposerons les résultats des recherches faites par le premier, pour représenter

d'une manière géométrique les effets des attractions et répulsions qu'on observe dans les nouvelles expériences, en attendant que le progrès de la science les ait fait rentrer sous les lois connues de l'électricité et du magnétisme.

Nous avons réservé pour la fin de l'Ouvrage la plus délicate de toutes les théories, savoir, celle qui concerne la Lumière. Nous discuterons d'abord les deux opinions, dont l'une fait consister ce fluide dans une émanation des corps lumineux, et l'autre le suppose répandu dans toute la sphère de l'univers, et animé d'un mouvement de vibration que lui communiquent les mêmes corps; nous donnerons les raisons qui assument la préférence à la première opinion. Nous ferons connaître comment on est parvenu à mesurer la vitesse de la lumière, et nous placerons, à la suite de ces premières notions, la description de l'aurore boréale, considérée comme un simple phénomène de lumière, dont la cause n'a pas encore été bien déterminée. Nous exposerons ensuite les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière, et les changemens qui en résultent dans les directions respectives des rayons réfléchis par des surfaces courbes, ou réfractés dans des milieux terminés par des surfaces du même genre. Nous indiquerons les positions des foyers soit réels, soit imaginaires, qui ont lieu dans les cas dont il s'agit. Un examen plus approfondi du même sujet nous donnera lieu de considérer les relations que la réflexion et la réfraction ont entre elles, et de ramener l'explication physique de l'une et l'autre à une action du genre de celles qui s'exercent à des distances infiniment petites. Cette ac-

tion dépend d'une force que Newton appelle *puissance réfractive* ; nous donnerons, d'après lui, la manière de l'évaluer, et nous ferons connaître les résultats à l'aide desquels il avait lu, en quelque sorte, dans les lois de la réfraction, combinées avec la densité des corps, que le diamant était combustible, et que l'eau renfermait un principe inflammable. Nous continuerons de nous occuper du premier de ces résultats, et nous citerons les expériences directes qui l'ont confirmé. De là nous passerons à l'exposé des connaissances acquises sur la nature du diamant, que plusieurs chimistes avaient regardé, d'après les analyses qu'ils en avaient faites, comme étant composé de carbone pur, tandis que la Physique opposait à ces analyses les inductions déduites d'une théorie qui, considérée en elle-même, était d'un grand intérêt, et qui indiquait dans le diamant la présence d'un tiers d'hydrogène. Nous exposerons les résultats des nouvelles recherches entreprises par M. Guyton Morveau et par le célèbre Davy, dans la vue de vérifier l'opinion dont il s'agit, et qui ont conduit, comme les premières, à la conséquence que le carbone est l'élément unique du diamant.

Viendront ensuite les découvertes de Newton sur la nature de la lumière, considérée comme un mélange d'une infinité de rayons différemment réfrangibles, et offrant, dans leurs couleurs, une gradation imperceptible de nuances qui se rapportent à sept espèces principales. Ce résultat des expériences faites avec le prisme, amènera l'explication donnée par le célèbre géomètre Anglais, de la manière dont se forme l'arc-en-ciel, le développement du phénomène des anneaux colorés,

et les conséquences que le même savant en a déduites par rapport aux couleurs naturelles des divers corps, et à la différence entre ceux qui sont transparents et ceux qui sont opaques. Ce sera encore en employant une construction ingénieuse imaginée par Newton, que nous ferons voir à quoi tiennent les couleurs que l'on a nommées *accidentelles*, et comment, dans certaines circonstances, la sensation d'une couleur mélangée se change en celle de la couleur que produiraient seuls certains rayons, pris parmi ceux qui composent le mélange.

De là nous passerons aux phénomènes qui concernent la vision ; et après avoir décrit la structure de l'œil, nous considérerons d'abord cet organe dans les circonstances où, guidé par le tact, il acquiert un exercice qui devient comme le fondement des règles d'après lesquelles nous jugeons de la forme, de la grandeur et de la distance des objets. Nous expliquerons ensuite comment le défaut de quelque'une des conditions que supposent les mêmes règles entraîne l'œil dans ces erreurs que l'on a nommées *illusions d'optique*, et parmi lesquelles deux des plus remarquables sont, celle qui nous fait juger la lune beaucoup plus grande à l'horizon qu'au méridien, et celle qui naît de ce dérangement apparent des étoiles, connu sous le nom d'*aberration*. Nous terminerons par une illusion d'un autre genre, et qui n'est pas moins remarquable, savoir, celle à laquelle les marins ont donné le nom de *mirage*; et nous en développerons la théorie, telle que nous l'avons puisée dans le beau mémoire qu'a publié sur ce sujet le célèbre Monge, qui, pendant son séjour

en Egypte, avait souvent observé le phénomène qui la produit.

Aux effets de la vision naturelle succéderont ceux de la vision aidée par l'art. Les lois de la réflexion nous feront concevoir comment se produisent les images des objets, telles que nous les offrent les miroirs, soit ceux qui, ayant une surface plane, rendent fidèlement ces images, soit ceux qui, étant concaves ou convexes, en font varier les formes, les grandeurs et les distances. Nous envisagerons ensuite les effets de la lumière réfractée, par rapport à la vision; et supposant d'abord un milieu réfringent, à surface plane, et un point radieux placé dans son intérieur, nous traiterons la question relative à la détermination du point de concours imaginaire des rayons qui, après être partis du point radieux, se dispersent, par l'effet de la réfraction, en passant dans un milieu différent. Après avoir appliqué la même théorie à la vision des objets situés dans l'eau, nous exposerons un phénomène très remarquable, qui dépend de la propriété à laquelle on a donné le nom de *double réfraction*, et dont jouissent les substances à travers lesquelles on aperçoit, sous certaines conditions, deux images de chacun des objets placés entre elles et la lumière. Nous considérerons surtout ce phénomène dans les rhomboïdes de *chaux carbonatée* dits *spaths d'Islande*, et nous décrirons les diverses circonstances qui le modifient, suivant qu'on regarde les images à travers un seul rhomboïde, ou à travers deux rhomboïdes superposés. Nous indiquerons la cause du retard qu'a éprouvé, pendant près d'un siècle, la connaissance de la découverte faite par le célèbre

Huygens de la véritable manière de représenter géométriquement la loi à laquelle est soumise le phénomène dont il s'agit. Nous exposerons un résultat d'expérience important pour les applications de la théorie fondée sur cette loi aux diverses substances douées de la même vertu, et dont on est redevable à M. Biot, savoir, celui qui a conduit cet habile physicien à distinguer deux espèces de *double réfraction*, dont il nomme l'une *attractive* et l'autre *répulsive*. Nous donnerons la manière de déterminer, à l'égard de chaque substance, la ligne que l'on appelle *axe de double réfraction*, et nous terminerons par une sous-division des corps naturels déduite des différens degrés de force de la propriété dont il s'agit.

De là nous passerons à un exposé succinct des résultats du beau travail à l'aide duquel M. Fresnel a expliqué un autre phénomène connu sous le nom de *diffraction de la lumière*, et nous essayerons de prouver que l'application heureuse qu'il a faite du système des ondulations à la manière dont ce phénomène est produit, n'est pas une raison d'abandonner le système de l'émission établi par Newton, et que nous avons adopté dans notre ouvrage.

Nous exposerons ensuite les résultats des recherches importantes à l'aide desquelles deux physiciens d'un mérite très distingué, MM. Malus et Arago, ont ouvert un nouveau champ à la physique de la lumière, dans un sujet que l'illustre géomètre anglais semblait avoir épuisé. Nous ferons voir en quoi consiste la propriété qui a été le sujet de ces recherches, et à laquelle on a donné le nom de *polarisation de la lumière*. Nous ex-

poserons les effets jusqu'alors inconnus qu'elle a offerts aux deux savans français, les rapports qui les lient entre eux et la différence remarquable qui les distingue, et qui dépend de ce que, dans les expériences de M. Malus, la lumière conserve sa blancheur, au lieu que dans celles de M. Arago, elle varie par des successions de teintes complémentaires l'une de l'autre. Nous décrirons ensuite les différentes modifications que subit la lumière polarisée, suivant la diversité des positions que l'on donne aux pièces de l'appareil employé dans les expériences, ou des mouvemens qu'on leur imprime. Nous terminerons par une notion de la théorie qu'a proposée M. Biot, pour expliquer les phénomènes de la polarisation, en admettant dans les molécules lumineuses un mouvement oscillatoire, analogue à celui du pendule, et dans certaines circonstances, un mouvement de rotation autour de leurs centres.

Nous développerons ensuite les effets des verres simples qui, au moyen de leur courbure, aident notre vue, ou remédient à ses imperfections. La théorie de ces effets nous conduira à expliquer ceux des instrumens qui résultent de la combinaison de plusieurs verres, tels que les télescopes et les microscopes, et à faire connaître les ressources que l'art a tirées de la réfraction, soit en l'employant seule, soit en la combinant avec la réflexion, pour grossir les objets, les rapprocher, et nous en montrer qui existaient à notre insu. Nous nous attacherons surtout à présenter avec clarté le principe sur lequel est fondée la construction des *lunettes achromatiques*, long-temps retardée par l'obstacle que lui opposait l'autorité de Newton, an-

noncée pour la première fois comme possible par Euler, et entreprise avec tant de succès par Dollond. Enfin, pour ne rien omettre de ce qu'il y a d'intéressant dans un sujet si varié, nous donnerons une description succincte des instrumens qui produisent leurs effets sur un plan, qui se présente, comme un fond, au pinceau de la lumière. Tels sont la chambre obscure, le microscope solaire, la lanterne magique ordinaire, et celle dont le jeu caché pour les spectateurs produit les illusions de la fantasmagorie.

Notre but, en composant cet ouvrage, a été d'offrir un traité de Physique raisonné. Nous n'avons cité qu'un petit nombre d'expériences, choisies parmi les plus décisives, et nous avons donné aux conséquences qui s'en déduisent tout le développement convenable. Une explication devient vague, lorsqu'elle est réduite à ce qu'elle a de plus général. Les détails sont, pour ainsi dire, la pierre de touche des théories; ils en garantissent la justesse, ou en décèlent la fausseté. Il nous mettent à portée de suivre pas à pas la marche de la nature; ils nous font apercevoir tous les rapports qui établissent la dépendance mutuelle des faits, soit entre eux, soit avec le fait qui sert de base à la théorie. Ils amènent ces idées fines qui donnent, en quelque sorte, la dernière touche au tableau d'un phénomène. Les développemens ont de plus cet avantage, qu'ils remplissent des vides susceptibles d'être sentis par ceux qui veulent approfondir, et vont au devant des questions qui laisseraient des nuages dans l'esprit.

En adoptant cette manière de traiter un sujet qui

a des ramifications si nombreuses et souvent si délicates, et qui devait s'étendre à des connaissances modernes et encore peu répandues, nous avons senti la nécessité de consulter, et c'est pour nous un double devoir de renouveler ici à M. le marquis de Laplace l'hommage de notre reconnaissance, et de rappeler tout ce que doit notre ouvrage aux lumières que nous avons puisées dans les entretiens qu'il a bien voulu nous permettre d'avoir avec lui. On sait qu'au milieu de ses sublimes recherches sur l'Astronomie physique, il a trouvé le secret d'acquérir, dans les différentes branches de connaissances, une supériorité à laquelle parviennent rarement ceux qui n'en ont cultivé qu'une seule. C'est à cette supériorité, et en même temps à l'avantage qu'il a de posséder au plus haut degré l'art de manier l'analyse mathématique, que l'on est redevable de cette belle théorie des phénomènes que présentent les tubes capillaires, et dont nous donnons une exposition détaillée dans cette troisième édition. Ce sujet n'avait encore été traité que d'une manière vague ou insuffisante, et les nombreux ouvrages qu'il a produits l'ont laissé neuf à M. de Laplace qui l'a épuisé.

En revoyant, avec toute l'attention dont nous sommes capables, notre seconde édition, avant de nous occuper de celle-ci, nous avons cru nous apercevoir que, si nous n'y avions pas atteint le terme où notre travail n'aurait rien laissé à désirer, nous en avons approché d'aussi près que le permettaient les bornes de nos facultés. Ainsi nous avons laissé subsister tout ce qui n'était pas susceptible d'être changé ou modifié,

par une suite des progrès qu'a faits la Physique dans ces derniers temps. C'est après un intervalle de quinze ans que nous publions de nouveau les parties qui sont restées intactes avec les nombreuses augmentations qui sont le résultat d'un travail récent. Nous avons employé tous nos efforts et tout notre zèle pour ne laisser apercevoir que le moins possible que celles-ci venaient se rattacher à notre premier travail, à une époque où le déclin de l'âge et les infirmités qui en ont été la suite semblaient nous avertir que nous n'étions plus le même.

Nous osons cependant nous flatter que les fruits de nos dernières recherches donneront à cette édition un avantage qui manquait aux précédentes, et que ceux qui cultivent la Physique par goût, nous sauront gré d'y avoir indiqué un certain nombre de petits appareils très simples, qui par la modicité de leur prix, se prêtassent au désir qu'ils auraient conçu d'en faire l'acquisition. Ils leur serviront à s'initier dans l'art du physicien ; ils leur procureront les moyens d'amener à leur gré les faits dont ils auront lu les descriptions, d'en suivre la marche, de les faire succéder l'un à l'autre, pour les comparer, et tirer de leur rapprochement des lumières propres à en faire apercevoir les rapports avec les actions des causes dont ils dépendent ; et ces expériences nées entre leurs mains et dirigées par eux-mêmes en deviendront à la fois plus instructives et plus agréables.

L'usage de ces appareils s'applique surtout aux trois branches de Physique, où il semblait être d'une plus grande utilité, savoir, l'électricité, le magnétisme et la

α.

lumière. Les deux qui font la fonction d'électroscopes se distinguent par des qualités qui leur sont propres, et à l'aide desquelles leur vertu échappe, pendant un temps considérable, à l'influence de l'air environnant. une disposition particulière de l'appareil magnétique soustrait l'aiguille à la force qui la dirige, et la rend docile à l'attraction de quelques molécules de fer. Un appareil très portatif destiné aux expériences sur la lumière polarisée, permet au possesseur de satisfaire sa curiosité, par l'observation de ces phénomènes si intéressans, qu'on ne peut qu'énoncer et décrire dans un cours.

Nous avons d'autant plus lieu d'espérer que ces moyens d'observation seront accueillis, qu'en les proposant, nous nous conformons aux vues de M. Gay-Lussac, dont les importantes recherches ont tant contribué aux progrès de la Physique, et qui la sert encore si utilement par ses leçons publiques, où il explique les phénomènes qui en sont le sujet, avec autant de méthode que de justesse et de clarté. Il y recommande l'usage des petits appareils dont il s'agit, et désirerait que chacun eût assez d'industrie pour les exécuter lui-même, persuadé qu'en se faisant à la fois artiste et physicien, il aurait un secours de plus pour s'instruire (1). Un autre avantage des mêmes appareils,

---

(1) Les descriptions que nous avons données de nos appareils et les figures qui en ont été tracées dans les planches de gravure suffisent pour en diriger la construction. Les personnes qui préféreraient de les acquérir peuvent s'adresser à M. Tavernier, horloger d'une habileté bien connue, qui les exécute avec une grande per-

c'est de donner lieu à des réunions, où les expériences sont répétées en commun, où les observateurs éclairés l'un par l'autre, à l'aide des réflexions qu'ils se communiquent, conçoivent une idée plus nette et plus développée des vérités qui leur ont été enseignées.

Pendant que nous nous occupions de préparer cette édition, nous avons eu tout lieu de nous féliciter d'avoir auprès de nous M. Delafosse, employé au jardin du Roi, en qualité d'aide-naturaliste pour la Minéralogie. Ce jeune savant, non moins distingué par ses connaissances en Physique, que par celles qui se rapportent à ses fonctions, nous a puissamment secondés dans les expériences destinées à vérifier les nouveaux faits que nous nous proposons de publier. Il a coopéré à la rédaction de plusieurs articles relatifs à l'électricité, aux gaz et à la lumière. Partout il nous a offert la réunion du zèle qui permet de compter sur la promptitude des services, et du talent qui en garantit d'avance l'utilité (1).

Nous avons soigné notre style, et nous nous sommes permis quelquefois de l'embellir, lorsque le sujet semblait nous y inviter, mais avec l'attention de n'y mettre que la juste mesure d'ornemens que comportait

---

fection Il faut excepter l'appareil destiné aux expériences sur la polarisation de la lumière, qui sera fourni par M. Belœuf, employé au jardin du Roi, et qui possède à un haut degré l'art d'exécuter des copies en bois de toutes les formes cristallines que nous avons déterminées.

(1) On jugera par le Traité de Cristallographie qui doit bientôt paraître, du succès avec lequel M. Delafosse a cultivé cette branche importante de la Minéralogie.

de caractère de notre ouvrage. En renonçant au mérite d'être profonds, nous avons ambitionné celui d'être clairs et méthodiques. Mais si la nature d'un traité élémentaire nous prescrivait de nous y renfermer dans les bornes du raisonnement, ou ne nous permettait que d'y admettre des calculs simples qui ne supposassent pour être compris, que des connaissances ordinaires (1), nous nous sommes du moins efforcés d'y répandre l'esprit des grandes méthodes créées par des hommes de génie, dont l'étude exige beaucoup plus de temps et de travail, mais qui offrent des résultats beaucoup plus satisfaisans et mieux assortis au but de la science, par l'avantage qu'elles ont de réunir une multitude de faits dans une même conception, en les généralisant; semblables à ces points de vue très élevés, qui nous font saisir d'un regard l'ensemble de tous les divers objets qu'embrasse une vaste étendue de pays.

---

(1) Une grande partie de ces calculs se rapportent à l'électricité, et avaient été faits par M. Biot, tandis que nous rédigeons notre première édition. En les remplaçant dans celle-ci, nous n'avons pas oublié combien nous avons été sensibles à la manière obligeante dont il s'était empressé de nous les communiquer, en nous cédant l'avantage d'en faire jouir ceux qui liraient notre ouvrage, à une époque où le mérite de la nouveauté se joignait à celui qu'ils ont par eux-mêmes.

# TABLE ALPHABÉTIQUE

## DES MATIÈRES

CONTENUES DANS CE TRAITÉ.

*Les chiffres romains désignent les pages de l'Introduction, et les chiffres arabes les Paragraphes de l'Ouvrage.*

### A

- A**BERRATION de réfrangibilité, occasionnée par la diffusion du foyer qui provient de la différente réfrangibilité des rayons, 1463. Opinion de Newton sur l'impossibilité de la détruire, 1464. *Voyez* Lunette achromatique.
- Aberration des étoiles; illusion qui a sa cause dans le mouvement progressif de la lumière, combiné avec celui de la terre dans son orbite, 1245 — 1248.
- Aberration de sphéricité, occasionnée par la diffusion du foyer, qui provient de la figure sphérique des verres, 1460. Moyen le plus simple d'y remédier, 1461.
- Accélération du mouvement produit par la pesanteur, 36 et suiv.
- Accès ou retours de facile réflexion, ou dispositions d'un même rayon à être réfléchi par différentes épaisseurs d'une lame mince d'une substance quelconque, qui sont entre elles comme les termes de la série des nombres impairs, 1151.
- Accès ou retours de facile transmission, ou dispositions d'un même rayon à être réfracté par différentes épaisseurs d'une lame, qui correspondent aux termes de la série des nombres pairs, 1151.
- Acier. Reçoit difficilement le magnétisme, et conserve long-temps celui qu'il a une fois acquis, 907. Exemple remarquable de la longue durée de ce magnétisme, *ibid.*
- Aérostats. Moyens impraticables proposés par d'anciens physiciens pour s'élever dans l'air, 494. Premiers aérostats remplis d'air dilaté, 495. Nouveaux aérostats remplis de gaz hydrogène, 496. Avantages que l'on a déjà retirés de ces machines pour le progrès de la Physique, 498.
- AEUTE ou pierre d'aigle. Moyen de la rendre susceptible d'agir sur l'aiguille aimantée, 952.
- Affinité, 31. Observations qui ont suggéré l'idée de cette force, 71 et 72. Preuves qu'elle n'agit qu'à de très petites distances, 74 — 78. Equilibre entre les affinités des principes qui forment les combinaisons neutres, 79 — 82. Comparaison de l'affinité avec la pesanteur, 83 — 86. Propriétés des corps solides, qui ont du rapport avec l'affinité, 87 — 102.

- N**  
**Newton** est le premier qui ait ramené à l'affinité l'explication d'un grand nombre d'effets physiques, 344.  
**Affollemens de l'aiguille aimantée.** *Voyez* Aiguille magnétique.  
**Aigrette électrique.** 690 et 691.  
**Aiguille aimantée.** *Voyez* Aiguille magnétique.  
**Aiguille magnétique.** Action que le globe exerce sur elle, 868, 921 et suiv. Sa déclinaison, 922. Son inclinaison, 923. Variations dans la déclinaison, 924 — 929. Affollemens de l'aiguille, 930. Variations dans l'inclinaison, 931. Variations dans l'intensité des forces qui sollicitent l'aiguille, 932 et 933. Egalité des forces qui la tirent en sens contraire, 938 et 939. Force directrice de l'aiguille, 940 et 941. La résultante de toutes les forces qui sollicitent ses différentes parties est une constante qui passe toujours par le même point, 942 — 944. Différence entre l'action du globe et celle d'un aimant ordinaire sur une aiguille magnétique, 945 et 946. Expérience du double magnétisme, 950 — 952.  
**Aiguilles flottantes sur un liquide;** phénomènes qu'elles présentent, et leur explication, 374.  
**Aimant.** Idée qu'en avaient les anciens, 858. Découverte de sa polarité, 859. Ses effets comparés en général à ceux des corps électriques, 875. Il offre la preuve que les objets qui ne semblent conduire qu'à des spéculations curieuses peuvent avoir un but d'utilité cachée, 978. *Voyez* Magnétisme.  
**Aimans artificiels.** Manière de les construire, 916. Leurs puissans effets, *ibid.*  
**Air.** Considéré pendant long-temps comme un des quatre élémens, 420. Preuve de son impénétrabilité, 21. Services qu'il nous rend, 419. Sa composition, 420. Elle est la même, à toutes les hauteurs, 498. Expériences qui prouvent sa pesanteur, 421 — 423. Détermination de sa pesanteur spécifique, *ibid.* Comment on a découvert que sa pression est la cause de l'ascension de l'eau dans les corps de pompe, 424 et suiv.  
 Pression exercée par l'air sur le corps d'un homme de moyenne taille, 425. Inconvéniens qui résultent d'une diminution subite de cette pression, *ib.*  
 Elasticité de l'air. Diverses expériences qui servent à la prouver, 431. L'air comprimé se resserre à peu près dans le rapport des poids dont il est chargé, 239. Différens effets qui dépendent de la compression de l'air, 432 et suiv. Manière dont la pression de l'air se combine avec le ressort de ce fluide dans le jeu des pompes, 436 et suiv. Divers effets qui dépendent des mêmes actions, 441 et 442. Détermination de la loi suivant laquelle décroissent les densités de l'air, à mesure que ses couches sont plus élevées, 444 et 445. Action du calorique pour le dilater et augmenter son ressort, 244 et suiv. Elle est la cause du double courant d'air qui s'établit dans les appartemens à cheminée, 466. Explication du vent d'est, par une semblable cause, 464. Cause du nuage qui se forme dans un air que l'on raréfie, 482.  
**Air** considéré comme véhicule du son. *Voyez* Son.  
**Airs de vents,** 462.  
**Alicés ( vents )**; leurs retours périodiques, 463.  
**Alkohol.** L'augmentation de densité qu'acquiert son mélange avec l'eau n'est pas due à l'impénétrabilité, 22. Inconvéniens de son usage dans la construction du thermomètre, 263. S'élève moins que l'eau dans les tubes capillaires, 341. Effets particuliers de sa flamme relativement à la transmission de l'électricité galvanique, 693 et 694.  
**Alliage.** Modère la ductilité des métaux précieux, 101. Accroît leur dureté, *ibid.*  
**Angle d'incidence de la lumière** dans le cas de la réflexion, 1015; dans le cas de la réfraction, 1026.  
**Angle de réflexion de la lumière,** 1015.  
**Angle de réfraction de la lumière,** 1026.  
**Angle réfringent du prisme destiné** aux expériences sur la lumière, 1063.  
**Angle visuel,** formé par les deux rayons, qui, en partant des deux extrémités d'un objet, viennent se croiser dans la prunelle, 1224.

- Anguille de Surinam ou gymnote engourdisant. Sa vertu électrique, 844. Expérience à l'aide de laquelle Walsh a vu paraître une étincelle, au moment de la décharge de ce poisson, 847.
- Anneaux colorés. Séries de cercles de différentes couleurs que présente une lame d'air très mince, renfermée entre la courbure d'un objectif légèrement convexe, et la surface plane d'un second qui est plan convexe, 1136. Rapports entre les diamètres des anneaux, 1136. Rapports entre ceux des cercles intermédiaires, pris aux endroits où les couleurs s'obscurcissent, 1137. Augmentation ou diminution des diamètres des anneaux, suivant les différentes inclinaisons du rayon visuel, 1138. Autres anneaux colorés vus par réflexion aux endroits de ces cercles intermédiaires, 1139. Effets produits par l'eau substituée à l'air, 1140 et 1141. Expérience qui offre comme l'analyse du phénomène des anneaux colorés, 1142 — 1148. Conséquences déduites des observations précédentes, relativement à la coloration des corps, 1152 et suiv. Difficultés qui paraissent infirmer ces conséquences, et réponses que l'on peut y faire, 1021 et suiv.
- Appareils d'un petit volume, et dont les effets sont très marqués, destinés pour les expériences électriques, 612 et suiv.
- Arc animal. *Voyez* Electricité galvanique.
- Arc-en-ciel. Sa description, 1111. Assez souvent on aperçoit deux arcs, l'un intérieur, l'autre extérieur, *ibid.* Explication de l'arc intérieur, produit par les rayons efficaces de chaque couleur, ou ceux qui sont tellement situés que l'angle formé par les émergents avec les incidens est un *maximum*, 1113, 1120, 1121. Explication de l'arc extérieur, où l'angle formé par les rayons efficaces émergents avec les incidens est un *minimum*, 1116 — 1118, 1122. Largeurs des deux arcs, et cause de leur augmentation, 1123 — 1125. Circonstances qui font varier la grandeur de l'arc-en-ciel, 1126. Troisième arc-en-ciel que l'on aperçoit quelquefois, 1128. La théorie indique la possibilité d'une infinité d'autres arcs, qui ne peuvent être sensibles, *ibid.* Arcs produits par des rayons dispersés, 1129. Expérience à l'aide de laquelle Antoine de Dominis avait représenté le phénomène de l'arc-en-ciel, 1130. Manière de l'imiter par une pluie artificielle, 1131. Divers effets qui en offrent comme la copie, *ibid.* Solution d'une difficulté tirée des accès de facile réflexion et de facile transmission, relativement à la possibilité de l'arc extérieur, 1177.
- Arc excitateur. *Voyez* Electricité galvanique.
- Arc. Unité des mesures superficielles, 66.
- Aréomètre. Ses différentes espèces, 53 et suiv.
- Argent allié au cuivre. Dilatation du mélange, 22. Rang qu'occupe l'argent dans l'ordre des élasticités, duretés et ductilités des métaux les plus usuels, 99.
- Art de voler, refusé à l'homme, 493.
- Atmosphère. Poids auquel équivaut sa pression sur le corps d'un homme de moyenne grandeur, 425. Loi suivant laquelle décroissent les densités de ses différentes couches prises de bas en haut, 445 et 446. Différentes modifications dont elle est susceptible, 460 et suiv. Atmosphère considérée relativement à l'évaporation, 471 et suiv. Son influence pour augmenter la quantité de vapeur répandue depuis la surface de la terre jusqu'à une hauteur donnée, 475. *Voyez* Air. Quelle serait sa hauteur, si sa densité était uniforme, 400. Comment on a essayé de la déterminer, à l'aide de la réflexion occasionnée par le crépuscule, 1063 et 1064.
- Attraction. Phénomènes qui ont suggéré l'idée de ce mot, 29. Sa division en deux espèces, 31. Loi à laquelle est soumise celle qui agit à des distances appréciables, 40. application de cette loi à l'attraction d'un corps sphérique, 41; et à celle d'un corps d'une forme quelconque, 42. Moyen de rendre sensibles les attractions mutuelles des corps qui sont près de nous, 45.

- Attraction dans les petites distances. *Voyez* Affinité.
- Attraction moléculaire. *Voyez* Affinité.
- Attractions et répulsions apparentes des petits corps qui flottent sur l'eau à une petite distance les uns des autres ; leur véritable explication, 372 et 373.
- Attractions et répulsions dans les petites distances. Combien leur domaine est étendu dans la nature, 344 et 1062. En quoi elles diffèrent des qualités occultes des anciens, 1052.
- Attractions et répulsions électriques, 662 et suiv.
- Attractions et répulsions magnétiques, 875 et suiv.
- Aurore boréale. Sa description, 1010. Diverses opinions sur la cause de ce phénomène, 1011 et 1012. Influence qu'elle paraît avoir sur les affoiblens de l'aiguille aimantée, 930.
- Axe de double réfraction, 1373 et suiv.
- Axes optiques, 1216. Leur usage dans l'explication des phénomènes de la vision, 1226.
- Azote (Gaz) ; un des principes composans de l'air ; modère l'activité du gaz oxigène, 419.

## B

- BALANCE. Moyen de peser exactement avec une fausse balance, pourvu qu'elle soit mobile, 63.
- Balance électrique. Sa description et son usage, 608 et suiv.
- Balance hydrostatique. Son usage, 48—50.
- Bandes sans déclinaison, 925.
- Baromètre. Son origine, 424. Sa construction, 426 et 427. Son échelle comparée avec celle du thermomètre, 428. Son usage pour la mesure des hauteurs, 443 et suiv. Principe fondamental de l'opération, 444. Méthode de Deluc, 446—448. Méthode de Laplace, 449 et suiv. Détermination du coefficient constant, 450 et 451. Corrections relatives à la température, 452 et 453. Application à un cas particulier, 454. Corrections relatives à la pesanteur, 455—457. Circonstances les plus favorables au succès de l'opération, 458. Avantages que l'on pourrait tirer des opérations faites avec le baromètre, pour la topographie des divers pays, 459. Ses variations ne sont exactement en rapport qu'avec les pressions de l'air, et n'indiquent pas d'une manière certaine les changemens de temps, 489.
- Barreau magnétique. *Voyez* Magnétisme.
- Batterie électrique. Ses effets et leur explication, 712 et 713.
- Bismuth. Sa cristallisation, lorsqu'il passe de l'état de fusion à celui de solidité, 408.
- Boussole (Aiguille de). *Voyez* Aiguille magnétique.
- Bouteille de Leyde, 696 et suiv.
- Brouillards. Leur formation, 478—481. Leur disparition, 482.

## C

- CALORIMÈTRE. Sa description et ses usages, 198—201.
- Calorique, 137. Deux opinions sur sa nature, 138. Ses principales propriétés, 139. Son équilibre, 152 et suiv. Loi à laquelle est soumise sa propagation par l'intermède des corps solides, 175—179. Ses effets pour produire dans les corps un changement d'état, 202 et suiv. Considération sur ces effets, 216—219. Manière dont la compression et la dilatation agissent sur le calorique renfermé dans les corps, 228 230. Résultat de Newton ; qui s'applique à la quantité de calorique dégagee ou absorbée dans les mêmes circonstances, 240—242. Explication de divers phénomènes relatifs au même sujet, 220—226. Limites des phénomènes dont il s'agit, par rapport aux liquides et aux solides,

- 235 et 236. Différence entre l'effet de la compression et celui du refroidissement, 237 et 239. Loi à laquelle sont soumis les fluides élastiques dans la variation de leur volume et de leur ressort, par l'action du calorique, 240 et suiv.
- Calorique latent, 148 et 149. *Id.*, 206. Diversité d'opinions sur sa manière d'agir, 213.
- Calorique rayonnant. Ses principales propriétés, 144 et suiv. Effets de la réflexion sur la surface des miroirs concaves, 165 et 166. Influence du poli et de l'éclat des surfaces sur sa réflexion, 167 — 169. Influence des différentes natures des substances sur le même effet, 170 — 172. Exposé succinct des théories admises par MM. de Rumfort et Leslie, pour expliquer ces effets, 182 — 183.
- Calorique sensible 148, et. 149. Distinction entre sa manière d'agir et celle du calorique latent, 150 et 151.
- Calorique spécifique 194 et suiv. Manière de le déterminer, à l'aide du calorimètre, 198 et 199.
- Capacité de calorique, 157 — 159.
- Carillon électrique. Explication de ses effets, 676.
- Carreau magique ou fulminant, 710.
- Catoptrique. Science des rayons réfléchis, 841.
- Caves. Pourquoi nous les trouvons froides pendant l'été, et chaudes pendant l'hiver, 162.
- Caustiques par réflexion, 1278 et suiv.
- Caustiques par réfraction, 1175.
- Centre d'action. Ce que c'est, 41. Position des centres d'action dans une tourmaline, 619. Dans un aimant, 870 et 894.
- Centres d'action magnétique du globe terrestre. Observation du capitaine Parry, qui indique qu'ils sont situés à une grande distance l'un de l'autre, comme cela a lieu, proportion gardée, dans un barreau magnétique, 937.
- Chaleur. Ce qu'on entend par ce mot, 137.
- Chaleur (Capacité de). *Voyez* Capacité de calorique.
- Chaleur latente. *Voyez* Calorique latent.
- Chaleur sensible. *Voyez* Calorique sensible.
- Chaleurs spécifiques des corps. *Voyez* Calorique spécifique.
- Chaleur. Ses rapports avec la lumière, 1198 et suiv.
- Chambre obscure, ou Chambre noire. Son origine, 1482. Explication de ses effets, 1483 et 1484. Description d'une chambre obscure portative, 1485.
- Champ d'une lunette, 1465.
- Charge par cascade, ou manière dont plusieurs bouteilles de Leyde se chargent les unes les autres, par une suite de la communication qu'elles ont entre elles, 711.
- Chimie. Objet de cette science, j. Ses points de contact avec la Physique, ij.
- Choc en retour, ou commotion que l'on ressent quelquefois à une distance plus ou moins sensible de l'endroit où se fait une décharge électrique, 735. Circonstances dans lesquelles cet effet a lieu par l'action de la foudre, 736.
- Cobalt. Il paraît doué par lui-même des propriétés magnétiques, 969.
- Combustion. Manière dont les anciens physiciens l'expliquaient, 316. Ce que sa théorie laisse encore à désirer, 317.
- Commotion électrique par la bouteille de Leyde, 696 — Par la pile de Volta, 807 — 810; en quoi l'une diffère de l'autre, 816. *Voyez* Électricité.
- Compression. Ses effets sur le calorique renfermé dans les corps, 228 et suiv. Différence entre les mêmes effets et ceux du refroidissement, 237 et 239.
- Condensateur électrique. Ses effets, 722.
- Conducteur d'une machine électrique, 593.
- Conducteurs (Corps) de l'électricité, 587. Distribution méthodique de ces corps, 837.
- Conducteurs humides employés dans la pile de Volta, 787.
- Congélation de l'eau. Augmentation de volume que subit l'eau lorsqu'elle approche du terme de la congélation, 385. Détermination du degré auquel répond le *maximum* de densité, 395. Opinion sur la cause de la dilatation de l'eau congelée,

- 371 et 372. Effets de la force expansive de l'eau congelée, 402 et suiv. Congélation de l'eau produite par une évaporation accélérée, 227. Congélation du mercure. *Voyez* Mercure.
- Contact immédiat. N'existe pas entre les molécules des corps, 8.
- Contraction des corps, produite par la compression, 228 et suiv. Contraction due aux variations de la température, 258 et suiv.
- Cor de chasse. Echelle musicale de cet instrument, 534.
- Corde sonore. *Voyez* Sons comparés.
- Corps conducteurs, et corps isolans. *Voyez* Electricité.
- Couleurs accidentelles. En quoi elles consistent, 1186. Expériences à l'aide desquelles on les fait paraître, 1187 — 1189. Principe sur lequel est fondée leur détermination, d'après la connaissance de la couleur qui résulte d'un mélange donné de couleurs homogènes, 1190 et 1191. Application de ce principe à un cas quelconque, 1193 et 1194. Explication physique de la sensation produite par les couleurs accidentelles, 1195 et 1196.
- Couleurs considérées dans la lumière, 1081 et suiv. Expériences qui prouvent la différente réfrangibilité des rayons réfléchis par les corps, 1086 et suiv. Autres expériences qui prouvent que la lumière est composée d'une infinité de rayons différemment réfrangibles, relatifs à une gradation de nuances de couleurs que l'on peut rapporter à sept espèces, 1089 — 1097. Nouvelle expérience confirmative des précédentes à l'aide de la lumière en partie réfléchie, et en partie réfractée, au point d'incidence sur la base intérieure du prisme, 1098 et 1099. Dans quel sens on doit entendre les expressions de *rayons rouges, bleus, violets*, etc., 1100. Couleurs du spectre solaire ramenées à leur plus grande simplicité, 1101. Détermination du rapport entre les sinus d'incidence et de réfraction des rayons qui donnent les limites des sept couleurs principales, 1103 — 1105. Analogie entre la suite des sinus de réfraction relatifs à ces limites, et celle des nombres qui représentent notre échelle musicale dans le mode mineur, 1104. L'assemblage de toutes les couleurs produit le blanc, 1106. Expérience remarquable de Newton relativement à cet objet, 1107. Combien est peu fondée l'opinion de ceux qui n'ont admis que trois couleurs dans la lumière, 1108. Explication des effets que présentent les couleurs des objets vus à travers un prisme, 1109 et 1110.
- Couleurs considérées dans les corps; elles dépendent en général de la disposition qu'ont ces corps à réfléchir telle espèce de rayons plus abondamment que les autres, en absorbant tout le reste, 1132. Cette disposition dépend, toutes choses égales d'ailleurs, du degré de ténuité des particules dont les corps sont composés, 1152 et suiv. Les couleurs sont d'autant plus vives, que les particules sont plus minces, 1159. Causes des reflets irisés qu'on observe dans certains minéraux, 1160. Cause de la différence entre les corps dont les couleurs vues sous différents degrés d'obliquité, sont permanentes, et ceux qui, dans le même cas, offrent des couleurs changeantes, 1161 et 1162. Couleurs produites dans certaines liqueurs qui n'en avaient aucune sensible, par le mélange de l'une avec l'autre, ou changement d'une couleur préexistante, qui a lieu dans le même cas, 1164. Couleurs des corps transparents, 1165. *Voyez* Anneaux colorés.
- Couleurs de l'arc-en-ciel. *Voyez* Arc-en-ciel.
- Courbes magnétiques, produites par l'arrangement que prennent des parcelles de limaille de fer disséminées sur un plan au-dessous duquel on a placé verticalement deux barreaux aimantés, 885. Explication de ce phénomène, 886 et 887.
- Couronne d'or (Problème de la), proposé à Archimède, 47 et 51.
- Cristal de roche. Cause des couleurs d'iris qu'il présente aux endroits où il est fendillé, 1160.
- Cristallin. Espèce de lentille enchâssée dans l'œil, derrière le trou de la prunelle, 1215.

- Cristallisation.** En quoi elle consiste, 103.  
**Cristallisation des métaux**, à l'aide du refroidissement qui suit leur fusion, 408.  
**Cristaux.** Ce qu'on entend par ce nom, 4.  
**Cristaux** (Formes primitives des), 106. Formes secondaires, *ibid.*  
 Manière de déterminer les formes primitives, 107 et suiv. Formes des molécules intégrantes des cristaux, 112 et suiv. Exposé des lois auxquelles est soumise la structure des cristaux de formes secondaires, 120 et suiv. Généralité de la théorie relative à ces lois, 133 — 136.  
**Crown-glass.** Espèce de verre de la nature du verre ordinaire, 1478.  
**Cuivre.** Rang qu'il occupe dans l'ordre des propriétés des métaux les plus usuels, 99.

## D

- DÉCHARGE** d'une bouteille de Leyde, 700 et 707. Son action pour développer le magnétisme dans le fer, 960.  
**Déclinaison** de l'aiguille aimantée, 922. Ses variations, 924 et suiv.  
**Décroissemens** (Lois de) auxquelles est soumise la structure des cristaux; leur détermination, 120 et suiv. Leur fécondité, 132.  
**Densité.** Ce qu'on entend par ce mot, 7.  
**Diamant.** Sa dureté, 88. Comment Newton avait en quelque sorte deviné que cette substance était combustible, d'après sa grande puissance réfractive, 1066 et 1067. Expériences de la combustion du diamant, 1071. Autres expériences qui ont prouvé que ce minéral n'est composé que de carbone pur, 1072 et suiv.  
**Diffraktion** de la lumière. Idée de ce phénomène, 1385. Opinion de Newton et des autres physiciens qui le faisaient dépendre d'une force répulsive que les corps minces exerçaient sur la lumière, *ibid.* Son explication déduite par M. Fresnel, du système des ondulations, 1386 et suiv. Preuves que ce n'est pas une raison suffisante pour abandonner le système de l'émission, 1392 et suiv.  
**Dilatation** des corps, dépend d'une portion de calorique qui devient latente, 149. Développement de ce sujet, 228 et suiv. Dilatations de divers corps solides par les variations de la température, 258 — 263.  
**Dilatation** des gaz, et des vapeurs, depuis le degré de la glace fondante jusqu'à celui de l'eau bouillante; Suivant quel rapport elle a lieu, 250 et suiv. Raison de l'uniformité de la loi qu'elle suit relativement aux différens fluides, 252. Dilatation des gaz par leur mélange avec les vapeurs; manière de la déterminer, 294 — 299.  
**Dioptrique**, ou science de la lumière réfractée, 996. Progrès de la Dioptrique, 1310 et suiv.  
**Dispersion** de la lumière, ou quantité dont se dilate un rayon de lumière, par l'effet de la réfraction, 1472. Elle ne suit pas le rapport de la réfraction moyenne dans les différens milieux, *ibid.*  
**Distance radiale**, ou distance entre les deux rayons provenus de la double réfraction, prise sur la seconde surface du milieu réfringent, 1324.  
**Disthène**, ou Cyanite. Anomalies que présente cette pierre, relativement à l'électricité qu'elle acquiert à l'aide du frottement, 600.  
**Divisibilité.** En quoi elle consiste, 23.  
**Division mécanique** d'un minéral, 107.  
**Division** des corps. Diverses expériences qui prouvent jusqu'à quel point elle peut s'étendre, 24 et suiv. Belle idée de Newton sur les bornes qui lui sont prescrites, dans l'état actuel des choses, 28.  
**Double réfraction.** Voyez Réfraction.  
**Dureté.** En quoi elle consiste, 87. Ses rapports avec l'élasticité, 94.  
**Ductilité.** En quoi elle consiste, 98. Ses différentes manières d'être, 100. Est une qualité précieuse relativement à l'usage des métaux dans les arts, 101.  
**Durs** (Corps), 89.

## E

- EAU.** Ses principales propriétés physiques, à l'état de liquidité, 318. Ses services, *ibid.* Elle a été regardée pendant long temps comme un élément, 319. Sa composition, *ibid.* Ses différens degrés de pureté, 320. Elle est sensiblement incompressible, 321. Newton, en comparant sa puissance réfractive avec celle des autres substances, avait entrevu que ce liquide renfermait un principe inflammable, 1066. Sa décomposition par l'électricité galvanique, 851 et suiv.; par l'électricité ordinaire, 855.
- Eau à l'état de glace.** Phénomènes qui accompagnent le passage à cet état, 385 et suiv. Circonstances où l'eau reste liquide au-dessous du terme de la congélation, 389 et suiv. Origine de l'opinion que l'eau qui a bouilli se gèle plus facilement que celle qui n'a point été exposée au feu, 391. *Maximum* de densité de l'eau, 395 et suiv. Cause de l'augmentation de volume que subit l'eau en se congelant, 400 et 401. Force expansive de la glace, 402 — 404. Congélation de l'eau, produite par une évaporation accélérée, 227.
- Eau à l'état de vapeur.** Circonstances qui accompagnent le passage à cet état, 207 et suiv. Cause de la chaleur que le contact de l'eau vaporisée excite dans les corps, 410. Dans quel rapport l'eau se dilate en se vaporisant, 412. Effets de l'eau vaporisée dans l'éolipyle, 413. Action du même fluide pour produire les mouvemens des machines à vapeur, 415 et suiv.
- Ebullition.** Comment elle se produit, 209. Elle est le signe de la vaporisation naissante, *ibid.* Elle a lieu à différentes températures, suivant que la pression varie, 220 et 409.
- Echelle diatonique.** Sa formation 524.
- Echos.** Leur explication, 512.
- Eclairs,** 728 et suiv.
- Elasticité.** En quoi elle consiste, 90. Sa cause encore inconnue, 95. Ses variations dans les différens corps, 97.
- Elastique.** Idée de la corne à laquelle on a donné ce nom, 355.
- Elastiques (Corps),** 90. Comment se fait leur retour à leur premier état, 91—93. Leur utilité dans les arts, 96.
- Elastiques (fluides).** Voyez fluides élastiques.
- Electricité.** Exposé succinct de ses progrès, 583 et suiv. Division des corps relativement à l'électricité, en corps conducteurs et corps isolans, 590 et suiv. Ce que c'est qu'un corps isolé, 589. Principes sur lesquels est fondée la construction de la machine électrique, 593. Hypothèse de deux fluides différens, dont la réunion forme le fluide électrique, 594 et 595. Idée des deux électricités, l'une positive l'autre négative, admises par Franklin, 595. Actions de ces deux électricités remplacées par celles des fluides vitré et résineux, *ibid.* Différence entre l'hypothèse relative à ces deux fluides, et le système des influences et des affluences, 597. Diversité dans les résultats du frottement entre deux corps isolans relativement à l'espèce d'électricité que chacun d'eux acquiert, 598 — 600. Circonstance dans laquelle le taffetas gommé acquiert l'électricité vitrée, 601. Electricité produite par la pression ou même par le simple contact des doigts, 602 et suiv. Ce qu'on entend par tension électrique, 606. Expériences qui prouvent que les actions électriques suivent la raison inverse du carré de la distance, 607 et suiv. Tendance du fluide électrique, pour se répandre à la surface des corps conducteurs, 620 et suiv. Preuve qu'il n'a d'affinité pour aucun corps, 628. Manière dont il se distribue, soit sur la surface d'un seul corps, soit entre différens corps en contact les uns avec les autres, 545 et suiv. Force coercitive. Ce qu'on entend par ce mot, 647. Lois suivant lesquelles les corps isolans perdent peu à peu leur électricité, 647 et suiv. Sous-division des corps naturels de-

dûte des différens degrés de la force coercitive, 652 et suiv. Divers résultats des électricités combinées de deux corps, 660. Equilibre des mêmes corps, considérés d'abord dans l'état naturel, 661. Leur action mutuelle, lorsque les électricités qu'ils ont acquises sont homogènes, 662 et suiv. Et lorsqu'elles sont hétérogènes, 668 et suiv. Action d'un corps électrisé sur un corps dans l'état naturel, 673 et suiv. Carillon électrique, 676 et 677. Actions de l'électricité acquise par chacun des deux corps, sur le fluide naturel de l'autre. 678 et suiv. Actions mutuelles de deux corps dont le fluide naturel a été décomposé, 682. Cas où les attractions et les répulsions ont lieu simultanément, 683. Considérations en faveur de l'hypothèse d'un double fluide électrique, fondées sur la difficulté d'expliquer la répulsion des corps électrisés négativement, lorsqu'on n'admet qu'un seul fluide, 684. Pouvoir des pointes pour lancer ou soustraire avec force le fluide électrique, 685 et suiv. Aigrette électrique, 690 et 691. Etincelle électrique, 692. Pistolet électrique, 693. Effets de l'électricité dans le vide, 694. Odeur électrique, 695. Expérience de Leyde; manière de la faire, 696. Idée générale de la cause d'où dépend la commotion, 698. Explication détaillée du phénomène, 699 et 700. Les quantités de fluide vitré et résineux qui s'échappent des deux surfaces d'une bouteille que l'on décharge par des contacts successifs, suivent une progression géométrique, 701. Propagation sensiblement instantanée de la commotion, 702. Pourquoi la bouteille ne se charge pas quand elle est isolée, 704. La bouteille s'électrise d'autant plus fortement, toutes choses égales d'ailleurs, qu'elle est plus mince, 705. Causes des nouvelles commotions qui ont lieu quelque temps après que la bouteille a été déchargée, 706. Manière de charger la bouteille résineusement, 708. Usage de l'excitateur pour décharger la bouteille sans recevoir la commotion, 707. Appareil portatif pour l'expérience de Leyde, 709. Expérience du

carreau magique ou fulminant, 710. Charge par cascade, ou celle qui a lieu lorsque plusieurs bouteilles suspendues l'une à l'autre se chargent mutuellement, 711. Effets des batteries électriques pour brûler les métaux ou les réduire en poudre, etc., 712. Explication de ces effets, 713. Manière de ramener à la théorie des deux fluides certains phénomènes qui paraissent la contrarier, 714 et suiv. Théorie des effets de l'électrophore, 718 et suiv. — Du condensateur, 722. — De l'électromètre, 723 et 724. Instrument dans lequel les effets de l'électromètre se combinent avec ceux du condensateur, 725. Décomposition de l'eau par l'électricité, 714.

Electricité galvanique, 765 et suiv. Son origine, 767. Expériences de Galvani sur les grenouilles, 769 et suiv. Autres expériences du même genre, faites par divers physiiciens, 772 et suiv. Arc animal et arc excitateur; ce qu'on entend par ces mots, *ibid.* De quelle manière on a d'abord expliqué les expériences sur les grenouilles, 779 et suiv. Théorie de Volta, 783 et suiv. Véritable principe de l'électricité galvanique, découvert par ce physicien, 785. Manière de représenter par des nombres les états de deux disques qui sont devenus électriques par leur contact mutuel, 786. Effets des conducteurs humides, 787 et 788. Manière dont Volta conçoit l'effet du contact, 790. Construction de la pile de Volta, et développement de la loi suivant laquelle varient les quantités de fluide de ses différens disques, 791 — 793. Différence entre une pile isolée et celle qui ne l'est pas, 794 — 802. En quoi consiste le véritable élément de la pile. 803. Analogie entre une tourmaline devenue électrique par la chaleur et la pile, 804. Aperçu de Newton sur une action électrique, analogue à celle qui a lieu dans l'électricité galvanique, 805. Commotion produite par la pile, 807. On en augmente l'énergie, en employant des corps humides imbibés d'une dissolution saline, 810. Manière de charger une bouteille de Leyde avec

- la pile, 811. Attractions produites par la pile, 812. Fincelles excitées par le contact d'un fil métallique avec la pile, 813. Combustion d'un fil de fer, dans le même cas, *ibid.* Comparaison entre les effets de deux piles formées d'un nombre égal de disques, mais dont les diamètres diffèrent sensiblement, 814 — 817. Effets de la pile comparés avec ceux d'une forte batterie électrique, 818. Différentes substances qui peuvent être employées pour former la pile, 820 et suiv. Gradation remarquable que présentent plusieurs métaux superposés relativement à leurs différences d'état, 821. Appareil à cuivre double, 824. Pile de Zamboni, 825. Effets des piles secondaires, 826 et suiv. Substances qui ont, par rapport à l'électricité galvanique, une acuité conductrice particulière, 831 et suiv. Manière d'envisager les phénomènes produits par ces corps, 839. Poissons électriques, 840. et suiv. Voyez Torpille. Décomposition de l'eau par l'électricité galvanique, 851 et 852. Explication la plus naturelle qu'on ait donnée jusqu'ici de ce phénomène, 853 et 854. Divers effets chimiques obtenus par l'action de la pile, 856. Parallèle entre l'électricité de la pile et l'électricité ordinaire, où tout indique que les effets de l'une et de l'autre dépendent d'un même fluide, 857. Influence de l'électricité galvanique sur le magnétisme, 979 et suiv. Phénomènes découverts par M. Ersted, 981 et suiv. Attractions et répulsions galvaniques observées par M. Ampère, 985 — 987. Observations de M. Arago, relatives à l'aimantation par le courant galvanique, 988. Réflexions sur les phénomènes électro-magnétiques, 990 et suiv.
- Electricité naturelle, 726 et suiv. Expériences qui ont servi à constater l'identité de la matière de la foudre et du fluide électrique, 726 et 727. Effets des paratonnerres, et manière de construire ces instruments, 732 et 733. Preuves de leurs avantages, 734. Effets du choc en retour ou de la commotion que l'on ressent à une distance plus ou moins grande de l'endroit où se fait la décharge électrique, 735. Cet effet a lieu quelquefois par l'action de la foudre, 736.
- Electricité produite par la chaleur, 615 et suiv. Pôles électriques des corps susceptibles de ce mode d'électrisation, 743. Appareil imaginé pour les distinguer, 750. Explication des phénomènes que présente la tourmaline, 751 et suiv. Retour de l'action polaire en sens inverse, par l'abaissement de la température, 757 et suiv. Corrélation entre les positions des pôles dans les mêmes corps, et les formes des parties dans lesquelles résident ces pôles, 762. Effets des cristaux de magnésie boratée qui ont huit pôles électriques, 764.
- Electro-magnétiques (expériences), 979 et suiv.
- Electromètre. Sa description, 723 et 724. Combiné avec le condensateur, 725.
- Electrophore. Sa description et ses effets, 718 et 719. Manière de le convertir en un tableau qui présente des dessins formés de deux poussières, l'une de *minium* et l'autre de soufre, 720 et 721.
- Electroscopes. Description de deux petits instruments très propres à en faire la fonction, 613 et suiv.
- Elémens. Raisons spécieuses des anciens philosophes pour n'en admettre que quatre, 319.
- Eolipyle. Explication de ses effets, 413.
- Equateur magnétique, 790.
- Etain. Rang qu'il occupe dans l'ordre des propriétés des métaux les plus usuels, 99.
- Etendue. Sa notion ramenée à ce que nous apprend l'observation, 3.
- Etincelle électrique, 692. Son action pour enflammer l'alcool ou l'éther, *ibid.*
- Euclase. Espèce de pierre remarquable par la fragilité qui accompagne sa dureté, 89.
- Evaporation. Circonstances qui la déterminent, 207. Théorie de Le Roy sur ce sujet, 305 — 307. La même théorie modifiée depuis, d'après de nouvelles observations, 309 et 310. Théories de Deluc et de Dalton, 311 et 312. Théorie de Laplace, seule admissible, 313 — 315. Cir-

- constances d'où dépend la quantité de l'évaporation, 471 et 472. Évaporation de la glace, 474. L'évaporation diminue la pesanteur spécifique de l'air, 300. Elle est la cause de l'origine des fontaines, 491 et suiv.
- Excitateur. Son usage pour décharger une bouteille de Leyde, 707.
- Expérience de Leyde, 696 et suiv. Voyez Électricité.
- Expiration des phénomènes; doit descendre dans les détails pour être satisfaisante, xxxiiij.
- Extinction du feu par l'injection de l'eau; quelle en est la cause, 411.

## F

- FACULTÉ conductrice des corps, relativement au calorique, 160 — 162.
- Faculté conservatrice de l'électricité, 653.
- Fantasmagorie. En quoi consiste l'espèce d'illusion ainsi appelée, 1487. Son explication, 1488 et suiv.
- Fer. Rang qu'il occupe dans l'ordre des principales propriétés des métaux les plus usuels, 99. Il se prête d'autant moins au mouvement du fluide magnétique dans son intérieur, qu'il est plus dur, 907. Voyez Magnétisme et Mines de fer.
- Feu. Ce que l'on entend communément par ce mot, 316.
- Figures des corps, 4.
- Flint-Glass. Espèce de verre composé en partie de *minium*, 1478.
- Fluide électrique. Voyez Électricité.
- Fluide magnétique. Voyez Magnétisme.
- Fluides aëriiformes; leur notion, 215.
- Fluides élastiques; leur division en plusieurs classes, 215. Loi à laquelle est soumise la variation de leur volume et de leur ressort, par l'action du calorique, 239 et suiv. Évaluation de leur pesanteur spécifique, 258. Circonstances qui les déterminent à s'unir par voie de simple mélange ou par celle de combinaison intime, 315. Voyez Évaporation et Vapeurs.
- Fluidité élastique; passage des corps à cet état, 207 — 209. Explication de divers phénomènes relatifs au passage dont il s'agit, 220 — 226.
- Flûtes. Principe auquel se rapporte la construction de ces instrumens, 537.
- Fontaine de compression. Ses effets, 431.
- Fontaine intermittente. Ses effets, 435.
- Fontaines. Diverses opinions sur la manière dont elles se produisent, 499. Leur véritable origine est due à l'évaporation, 491 et suiv.
- Force ou puissance; ce qu'on entend par ce mot, 13.
- Force coercitive; son existence dans les corps isolans 647. Sous division des mêmes corps, déduite de ses différens degrés, 652. Existence de la même force dans les corps magnétiques, 869.
- Force de torsion. En quoi elle consiste 607.
- Force directrice d'une aiguille aimantée, 804.
- Foudre; ses explosions, 730. Circonstances où l'action des nuages qui la renferment l'empêche de se porter vers la terre, 731. Son action pour développer le magnétisme dans le fer, 960.
- Foyer des rayons parallèles, lorsque la lumière se réfléchit sur la concavité d'une surface sphérique, 1020.
- Foyer des rayons divergens dans le même cas, 1022. Foyer des rayons divergens, après leur refraction dans un milieu terminé par une seule surface courbe, 1030 et suiv. Cas où le milieu est terminé par deux surfaces courbes opposées, 1039 et suiv.
- Foyer des rayons parallèles dans le même cas, 1040. Les mouvemens des foyers produits par les rayons réfractés, ont toujours lieu suivant la même direction que ceux du point radiex, 1035, 1038 et 1042.
- Foyer imaginaire, 1034.
- Foyer virtuel, *ibid.*
- Fragiles (corps), 89.
- Franc. Unité monétaire du nouveau système métrique, 70.
- Froid. Consiste dans la privation de la chaleur, 102. Expérience qui

d

- présente une fausse apparence d'un froid réfléchi, 166.  
 Frottement, employé pour estimer la dureté des corps, 87 et 89. Cause de la chaleur qu'il dégage, 236.

## G

- GALVANISME.** Voyez Electricité galvanique.  
**Gamme.** Voyez Sons comparés.  
**Gaz.** Leur notion, 215. Méthode pour déterminer le rapport suivant lequel l'élasticité ou la dilatation d'un gaz s'accroît, à une température donnée, par son union avec une vapeur dont on connaît l'élasticité, à la même température, 294 et suiv.  
**Gaz hydrogène.** Son usage dans la construction des aérostats, 406.  
**Gaz insolubles.** Rapport suivant lequel ils se dilatent, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante, 249.  
**Gaz solubles.** Rapport de leur dilatation entre les mêmes limites, 251. Raison de l'uniformité à laquelle est soumise la dilatation des gaz, 252.  
**Gelée.** Combien elle est nuisible à la végétation, 404.  
**Glace.** Voyez Eau à l'état de glace.  
**Globe terrestre.** Fait la fonction d'un véritable aimant, 865, 866, 921 et suiv. Son action sur une aiguille, que l'on porte successivement à différens points de sa surface; déclinaison de l'aiguille, 922. Elle varie d'un lieu à l'autre, 924. Elle est nulle à plusieurs endroits, 924 et 925. Elle varie avec le temps dans un même lieu, 926. Ses variations comparées entre elles à divers points du globe, suivent des rapports différens, 928. Variation diurne, 929. Inclinaison de l'aiguille, 923. Ses variations d'un lieu à l'autre, 931; et par succession de temps dans un même lieu, *ibid.* Affoiblens de l'aiguille aimantée, 930. Variations dans l'intensité des forces qui sollicitent l'aiguille, 932 et 933. Détermination des centres d'action magnétique du globe, 934 et suiv. Observation qui indique qu'ils sont à une grande distance l'un de l'autre, 937. Action du globe terrestre pour communiquer le magnétisme aux verges de fer et autres corps semblables, dont la force coercitive n'est pas assez grande pour s'opposer à cette action, 953, 958 et 959. Expérience remarquable qui prouve la facilité avec laquelle le fer doux se prête à cette même action, 954 et 955. Solution du problème qui consiste à aimanter des barreaux d'acier jusqu'à saturation, sans avoir eu préalablement aucun aimant entre les mains, 957. Diverses hypothèses à l'aide desquelles on a essayé d'expliquer les variations de l'aiguille aimantée, 970 et suiv. Ce qui reste à faire pour perfectionner la théorie du magnétisme, 977.  
**Globe terrestre.** Magnétisme des mines de fer qu'il renferme. Voyez Mines de fer.  
**Gnomonique.** Principe sur lequel cette science est fondée, 1008.  
**Gramme.** Unité de poids dans le nouveau système métrique, 61 et 69.  
**Grandeur apparente d'un objet,** 1066.  
**Grandeur réelle d'un objet,** 1066.  
**Gravitation,** 31.  
**Gravité.** Voyez Pesanteur.  
**Grêle;** en quoi elle diffère de la neige, 736. Sa formation entre deux nuages électrisés en sens contraires, 737 et suiv.  
**Grenouilles** (Expériences sur les), ont fait naître les premières connaissances sur l'électricité galvanique, 769 et suiv.  
**Gymnote engourdissant,** espèce de poisson électrique, 846 et 847.

## H

- HALEINE des animaux.** Pourquoi elle est visible dans les temps froids, 486.  
**Harmoniques** (Sons). Voyez Sons comparés.

- Hauteurs.** Méthodes pour les mesurer à l'aide du baromètre, 443 et suiv.
- Herbriération** que présentent certaines pierres. Comment elles sont produites, 384.
- Histoire naturelle.** Objet de cette science, 11. Sa division en trois branches principales, *ibid.*
- Horloges.** Changemens occasionnés dans la longueur de leur pendule, par les variations de la température; moyen d'y obvier, 261.
- Humidité.** En quoi elle consiste, 322.
- Hydrogène,** un des principes de l'eau, 319. Usage du gaz hydrogène, dans la construction des aérostats, 496.
- Hydrophane.** Preuve de la porosité, tirée d'une expérience faite avec cette pierre, 9. Cause de la transparence qu'il acquiert lorsqu'il est plongé dans l'eau, 1172.
- Hygromètre.** Sa définition, 322. Ses variations, 327 — 332. Différentes causes qui compliquent la marche, 333 — 336.
- Hygromètre de Saussure,** 325.
- Hygromètre de Deluc,** 326.
- Hygrométrie.** Son objet, 322.

## I, K

- ILLUSIONS d'optique,** ou erreurs de la vue; combien elles sont multipliées, 1232. Convergence apparente des deux rangées d'arbres qui forment une avenue, 1233. Du plafond et du parquet d'une longue galerie, *ibid.* Autres illusions, 1234 — 1236. Pourquoi la lune nous paraît plus grande à l'horizon qu'au méridien, 1238 et 1239. Illusions qui ont leur source dans le mouvement, 1240 et suiv. Explication de celle qui est relative à l'aberration des étoiles, 1245 — 1248.
- Images des objets.** Voyez Vision.
- Impénétrabilité.** En quoi elle consiste, 20.
- Inclinaison de l'aiguille aimantée,** 923.
- Inertie.** Sa véritable notion, 17 — 19.
- Inflexion de la lumière.** Voyez diffraction de la lumière.
- Instrumens à vent.** Théorie de la propagation du son déduite de la manière dont il est produit dans ces instrumens, 530 et suiv.
- Instrumens d'optique.** Description de ceux qui sont les plus remarquables, 1454.
- Intervalle de facile réflexion,** ou distances de la première surface d'un milieu, qui s'accordent avec les dispositions d'un rayon à être réfléchi plutôt que réfracté, 1165.
- Intervalle de facile transmission,** ou distances de la première surface d'un milieu, qui répondent aux dispositions d'un rayon à être transmis plutôt que réfléchi, 1165.
- Iris.** Voyez Arc-en-ciel.
- Isolés (Corps).** Voyez Electricité.
- KILOGRAMME.** Poids qui équivaut à 2 livres, 5 gros, 35 grains de l'ancien poids de marc, 69.

## L

- LAIYON.** Sa densité surpasse la somme des densités du cuivre et du zinc dont il est composé, 22.
- Lances,** lampes, torches ardentes. Voyez Aurore boréale.
- Lanterne magique.** Sa description, 1486.
- Lentille.** Voyez Verre lenticulaire.
- Liquides.** Etat des corps que l'on appelle ainsi, 207. Leur conversion en fluide élastique, 207 — 209.
- Liquéfié.** Voyez Liquides.
- Liquidité.** Passage des corps à cet état, 204 — 206.
- Litre.** Unité des mesures de capacité, dans le nouveau système métrique, 68.
- Lumière.** Avantages que présente sa théorie, en ce que la marche de ce fluide est géométrique, 995. Diverges opinions sur la nature et la propagation de la lumière, 997. Raisons qui établissent la préférence en faveur du système de l'émission, 999 et 1000. L'intensité de la lumière sur un espace donné est en raison inverse du carré de la distance au corps lumineux, 1001. La privation de la

d..

- lumière produit l'ombre, 1002. Effets de l'ombre projetée par un corps globuleux opaque situé en présence d'un corps lumineux de la même forme, 1003 et suiv. Pénombre ou passage gradué de la lumière à l'ombre pure, 1007. Principe sur lequel est fondée la Gnomonique, *ibid.* Vitresse de la lumière, regardée d'abord comme instantanée, 1009. Observations qui ont servi à la déterminer, *ibid.* Rapports et différences entre la lumière et la chaleur, 1198 et suiv.
- Lumière décomposée. *Voyez* Couleurs.
- Lumière infléchie. *Voyez* diffraction de la lumière.
- Lumière polarisée. *Voyez* polarisation de la lumière.
- Lumière réfléchie. *Voyez* Réflexion de la lumière. Effets de la lumière réfléchie relativement à la vision qui a lieu par l'intermédiaire des miroirs. *Voyez* Miroirs.
- Lumière réfractée. Ses effets relativement à la vision dans les milieux terminés par des faces planes, 1313. Détermination du point qui est comme le centre d'action des rayons qui, en partant d'un point radieux situé dans l'intérieur d'un milieu réfringent, se sont réfractés en passant dans un autre milieu, 1314. Phénomènes produits par la réfraction, relativement à la vision des objets plongés dans l'eau, 1315—1318.
- Lumière zodiacale, 1013.
- Lune. Explication de l'illusion qui nous la fait juger plus grande à l'horizon qu'au méridien, 1238 et 1239.
- Lunette à quatre verres. Sa description, 1466 et suiv. Pourquoi on est obligé de la raccourcir ou de l'allonger, suivant que les objets sont plus ou moins éloignés, 1467. Pourquoi les objets que l'on regarde à travers les lunettes ne paraissent pas sensiblement plus grands que quand on les voit, sans intermédiaire, à une distance ordinaire, 1468.
- Lunette achromatique. Son effet en général, 1471. Histoire de sa découverte, 1467 et suiv. Théorie de ses effets, 1472 et suiv. Manière dont est composé son objectif, 1473. Elle ne corrige l'aberration de réfrangibilité que par rapport à cet objectif, 1479.
- Lunette astronomique. Sa description, 1454.
- Lunette batavique, ou lunette de Galilée. Sa description, 1455 et 1456.
- Lunettes à lire. Leur découverte, 1309. Leurs effets, 1442.

## M

- MACHINE électrique. Principes sur lesquels est fondée sa construction, 593.
- Machine pneumatique. Sa description, 422.
- Machines à vapeur. Explication de leurs effets, 415 et suiv.
- Magnésie boratée; ses cristaux acquièrent huit pôles électriques, à l'aide de la chaleur, 764. Corrélation remarquable entre les positions des mêmes pôles et les formes des parties dans lesquelles ils résident, *ibid.*
- Magnétisme, 858 et suiv. A quoi se réduisaient les connaissances des anciens sur cet objet, 859. Premières théories pour expliquer les effets des aimans, 860. Rapports aperçus par Apépius, entre la théorie du magnétisme et celle de l'électricité, 861. Différence entre les deux fluides électrique et magnétique, 862. Hypothèse de deux fluides considérés comme principes composans du fluide magnétique, 863. Analogie entre les aimans et les corps idio-électriques, 864 et 868. Quel est celui des deux pôles d'une aiguille aimantée que l'on doit appeler *pôle austral*, et celui qui doit porter le nom de *pôle boreal*, 867. Conséquence qui en résulte relativement aux dénominations des deux fluides, *ibid.* Expériences qui prouvent que les actions magnétiques suivent la raison inverse du carré de la distance, 870—874. Attractions et répulsions magnétiques, 875 et suiv. Equilibre de deux

- morceaux de fer dans l'état naturel, 876. Attraction mutuelle de deux aimans par leurs pôles de différens noms, et répulsion par ceux de même nom, 877. Effets des actions électriques et magnétiques, exercées par un même corps, 878. Action d'un aimant sur un barreau qui était primitivement à l'état naturel, 879. Accroissement de force qui a lieu dans un aimant dont on se sert pour communiquer le magnétisme à un barreau de fer, 880. Explication de plusieurs phénomènes qui dépendent des attractions et répulsions magnétiques, et dont plusieurs ont un air de paradoxe, 881 — 893. Distribution des fluides magnétiques dans l'intérieur d'un aimant, 894 — 898. Explication d'un phénomène singulier, qui consiste en ce qu'une partie détachée d'un aimant se trouve elle-même être un aimant complet qui a ses deux moitiés sollicitées par des forces égales et contraires, 899 et 900. Expérience facile à faire, qui confirme l'explication précédente, 901. Communication du magnétisme, 902 et suiv. Points conséquens ; en quoi ils consistent, 903 et 904. Renversement des pôles d'une aiguille, 905. Différences entre l'acier et le fer doux, relativement à la communication du magnétisme, 907. Méthode d'aimanter par un seul contact, 908. Description de la méthode du double contact, 909 et 910. Condition pour que son effet parvienne au *maximum*, 911 et 912. Procédé d'Æpinus pour l'employer d'une manière plus avantageuse, 913. Autre manière, adoptée par Coulomb, qui pare à l'inconvénient des points conséquens, 914. Manière de se procurer des barreaux fortement aimantés, 915. Manière d'aimanter une aiguille de boussole, *ibid.* Aimans artificiels, leur construction, 916. Leurs puissances effets, *ibid.* Armures des aimans naturels, en quoi elles consistent, 917 — 919. Conditions requises, relativement à leur épaisseur, pour qu'elles produisent le plus grand effet possible, 920. Magnétisme développé par différens moyens mécaniques, 960 ; par l'action de la foudre, *ibid.* ; par les décharges électriques, *ibid.* Expériences qui ont paru prouver que tous les corps sont susceptibles d'obéir à l'action du magnétisme, 976. Comparaison des fluides électrique et magnétique, considérés relativement à leur manière d'agir, 978.
- Magnétisme du globe terrestre. *Voyez* Globe terrestre et Aiguille aimantée.
- Magnétisme des mines de fer. *Voyez* Mines de fer.
- Magnétisme (double). *Voyez* Aiguille aimantée.
- Manomètre. Idée de cet instrument, 289, note 3.
- Marmite de Papin. Ses effets, 223. Masse. Ce qu'on entend par ce mot, 7.
- Mercur. Premières expériences sur sa congélation, 405. Détermination du véritable degré auquel elle répond, 406. Avantages de son emploi dans la construction du thermomètre, 269 et 270. Expériences qui prouvent qu'il ne fait point exception à la loi des tubes capillaires, 360 et 361. Sa dilatation absolue, 274.
- Méridien magnétique. Ce qu'on entend par ce nom, 922.
- Mesures (nouvelles). Exposé de leur système, 64.
- Métaux. Comparaison de ceux qui sont le plus en usage, relativement à leur élasticité, leur ductilité et leur dureté, 99. Bons conducteurs de la chaleur, 161. Réfléchissent le calorique rayonnant lorsqu'ils sont polis, 146. Leur cristallisation à l'aide du refroidissement qui suit la fusion, 408. Sont de bons conducteurs de l'électricité, 587.
- Météores, 470. Météores aqueux ; leur description, 476 et suiv.
- Mètre. Unité des mesures linéaires dans le nouveau système métrique, 60.
- Mica. Moyen employé pour déterminer l'épaisseur extrêmement petite d'une lame de cette substance, qui réfléchissait le bleu pur, 1156 et 1157.
- Microscope à deux verres. Sa description, 1480. Avantages de ces sortes d'instrumens, 1481.
- Microscope simple. Ses effets, 1449 et suiv.

- Microscope solaire. Sa description, 1492 et 1493.
- Milieu. Quels sont les corps que l'on appelle ainsi, 1026.
- Minéraux. Comment se fait leur accroissement, 104. Différence remarquable qui les distingue des êtres organiques, *ibid.*
- Mines de fer, leur magnétisme, 961 et suiv. Explication de l'espèce de renversement que présentent quelquefois les pôles des morceaux détachés de ces mines, *ibid.* Expériences à l'aide desquelles on a reconnu que la plupart des cristaux de fer que produit la nature, sont de véritables aimans, 963 et suiv.
- Minium ou oxyde rouge de plomb. Son usage pour la fabrication du flint-glass, 1478
- Mirage. Notion de ce phénomène, 1249 et suiv. Son explication, 1253 et suiv.
- Miroir. Ses propriétés, 1260.
- Miroir concave. Ses effets en général, 1276. Caustiques produites en vertu des intersections des rayons réfléchis sur la surface d'un miroir concave, lorsque les rayons incidens partent d'un même point radieux, 1277 et suiv. Mouvements des caustiques, tandis que le point radieux s'approche ou s'éloigne de la surface réfléchissante, 1279—1282. Application aux différens cas où les images sont vues en dedans ou au-delà de la surface du miroir, 1283 et suiv. Usage du miroir concave dans la construction des télescopes, 1298. Effets du même miroir pour enflammer, fondre ou vitrifier les corps exposés à son foyer, 1299. Expérience dans laquelle on réunit les effets de deux miroirs concaves, 1300. Substitution de plusieurs miroirs plans à un miroir concave, 1301 et 1302. Comment il paraît que l'on doit entendre ce qu'ont dit les anciens du moyen employé par Archimède pour brûler la flotte des Romains, 1303.
- Miroir conique. Ses effets, 1308.
- Miroir convexe. Formation des caustiques produites derrière la surface d'un miroir convexe, aux endroits où s'entrecroisent les prolongemens des rayons qui, en partant d'un point radieux, se sont réfléchis sur la même surface, 1304. Effets du miroir convexe, 1305—1307.
- Miroir cylindrique. Ses effets, 1308.
- Miroir plan, représente les images à la même distance, derrière sa surface, que celle où l'objet se trouve en dedans, 1261. Il les représente aussi de la même grandeur et dans la même position, 1262. Nous ne pouvons voir dans un miroir plan, qu'une partie de nous-mêmes, dont la hauteur soit double de celle du miroir, *ibid.* Connaissant la distance de l'œil au miroir, et les hauteurs du miroir et de l'objet, on peut déterminer la distance à laquelle l'objet sera vu tout entier dans une position parallèle à celle du miroir, 1263. Mouvements de l'image, doubles de ceux du miroir, 1264 et 1265. Explication de l'effet qui a lieu, lorsqu'en inclinant le rayon visuel, on aperçoit, à l'aide d'un miroir, plusieurs images d'un même objet, 1267 et suiv.
- Mobilité. En quoi elle consiste, 13.
- Molécules élémentaires des minéraux, 113.
- Molécules intégrantes des cristaux, 113 et suiv.
- Molécules qui réfléchissent ou réfractent la lumière; de quel ordre elles sont, 1155.
- Molécules soustractives des cristaux, 136.
- Mollesse. En quoi elle diffère de la ductilité, 102.
- Moulin à vent. Manière dont le vent agit pour faire tourner les ailes de cette machine, 469, note 1.
- Mous (corps), 89.
- Moussons; vents périodiques, 463.
- Mouvement. Ses différentes espèces, 14.
- Myopes. En quoi consiste le défaut de la vue, chez ceux à qui on a donné ce nom, 1447. Comment en pare à ce défaut, *ibid.* Diverses habitudes des myopes, 1448.

## N

- NATURE.** Dans quelle acception ce mot doit être pris, iv; sentiment que nous inspire, envers l'Être-Suprême, la véritable manière d'envisager la nature, *ibid.*
- Neige.** Sa formation, 483 et 484.
- Nickel.** Il paraît posséder par lui-même les propriétés magnétiques, 966 et 967. Sa vertu magnétique comparée à celle de l'acier, *ibid.* Résultat des expériences faites par M. Laugier, pour l'épurer, 968.
- Noirs (corps),** sont ceux qui absorbent presque toute la lumière qui arrive à eux, 1134.
- Nuages.** Leur formation, 478.

## O

- OBJECTIF.** Celui des verres d'un instrument d'optique, qui est tourné vers l'objet, 1454.
- Oculaire.** Celui des verres d'un instrument d'optique, qui est tourné vers l'œil, 1454. Il est quelquefois double ou triple, 1457.
- Odeur électrique,** 695.
- Odeurs,** prouvent à quel point la matière est divisible, 25.
- Œil.** Combien cet organe est admirable, 1214. Description de sa structure, 1215.
- Ombre,** 1002. Conditions qui en déterminent la figure, 1003 et suiv. Son usage pour mesurer à peu près la hauteur d'une tour, 1008. note 1.
- Opacité.** Quelles en sont les causes, 1171.
- Opale.** Cause des beaux reflets colorés qu'elle lance de son intérieur, 1160.
- Optique.** Science de la lumière directe, 996.
- Or.** Combien il est divisible et susceptible d'extension, par les procédés des arts, 26. Rang qu'il occupe dans l'ordre des principales propriétés des métaux les plus usuels, 99. Comment on remédie à l'inconvénient qu'auraient les ouvrages faits avec l'or, de perdre aisément leur fini, si on l'employait pur, 101.
- Oreille.** Finesse de tact de cet organe, 546. Comment divers sons simultanés arrivent, sans se confondre, à l'oreille, qui en discerne les différentes impressions, 544 et 545.
- Oscillations (petites)** des différents points d'une corde qui rend un son, 499. Des diverses parties d'un timbre qui résonne, 500. Petites oscillations de l'air produites par celles des corps sonores, 499. Leur considération appliquée à la théorie de la propagation du son, 530 et suiv. Petites oscillations qui produisent des cercles qui s'entrecoupent sur la surface de l'eau où l'on a jeté plusieurs pierres, 545.
- Ouverture d'un télescope.** 1208.
- Oxigène et hydrogène.** Diversité des actions qu'exercent sur eux les deux pôles de la pile galvanique, 851.
- Oxigène,** un des principes de l'eau, 319.
- Oxigène (gaz),** un des principes de l'air, 519.

## P, Q

- PAPOT.** Cause des changemens que subissent les couleurs qui embellissent son plumage, suivant les différentes positions de l'œil, 1162.
- Paratonnerres.** Leur construction et leurs effets avantageux, 732 et suiv.
- Particules des corps,** sont transparentes, même celles des corps opaques, 1152. De quel ordre sont celles qui réfléchissent les couleurs propres aux différents corps, 1155.
- Pendule compensateur,** 261.
- Pénétration apparente** dans le mélange de certains corps, 22.
- Pénombre.** Passage gradué de la lumière à l'ombre pure, 1007.
- Perspective.** En quoi elle consiste, et qu'elle est la cause de l'illusion

- qu'elle produit en nous, et dont l'effet est le même, jusqu'à un certain point, que si nous avions devant les yeux l'objet qu'elle représente, 1237.
- Pesanteur.** En quoi elle consiste, 32. Opinion de Descartes sur sa cause, 33. Sa différence avec le poids, 34. Egalité des temps que tous les corps emploient à tomber de la même hauteur dans le vide, 36. Loi du mouvement accéléré que la pesanteur produit dans les corps, 35 et suiv. Idée des découvertes auxquelles Newton a été conduit par le principe de la pesanteur, 39. Diminution de la pesanteur, insensible à toutes les hauteurs, auxquels l'homme peut atteindre, 43. Pesanteur des corps les uns vers les autres devient insensible, par l'action que le globe exerce sur eux, 44. moyen de la rendre sensible, 45.
- Pesanteur spécifique.** En quoi elle consiste, 46. Principe sur lequel est fondée sa détermination, 47. Utilité des connaissances qu'elle procure, 52. Expériences relatives à la manière de la déterminer, 50 et suiv.
- Photomètre,** sa description et son usage, 1202.
- Physique.** Son objet, 1. Points de contact entre cette science et la Chimie, 11. Manière de la traiter, qui a été adoptée dans cet ouvrage, xxxij. Ordre qui a été suivi dans la distribution des connaissances que présente le même ouvrage, viij et suiv.
- Pile de Volta,** 791 et suiv.
- Piles secondaires,** 826 et suiv.
- Pistolet électrique.** Explication de son effet, 693.
- Plateau collecteur d'un condensateur,** 725.
- Platine.** Le plus dense des métaux connus, 52. L'avantage que donne aux miroirs faits de ce métal, sur les autres, la résistance de leur poli aux impressions de l'air, est balancée par l'infériorité de leur pouvoir réfléchissant, 1298.
- Plomb.** Rang qu'il occupe dans l'ordre des principales propriétés des métaux les plus usuels, 99. Usage de son oxide rouge, dans la fabrication du flint-glass, employé pour les lunettes achromatiques, 1478.
- Pluie.** Circonstances qui la déterminent, 485.
- Poids.** En quoi il diffère de la pesanteur, 34.
- Poids (unité de)** relative au nouveau système métrique. Méthode qui a été suivie dans sa détermination, 60 et suiv.
- Point d'émergence,** ou celui par lequel un rayon de lumière sort d'un milieu, 1026.
- Point d'immersion,** ou celui par lequel un rayon de lumière entre dans un milieu, 1026.
- Pointes.** Leur pouvoir pour lancer ou soustraire le fluide électrique, 885 et suiv.
- Points cardinaux,** 462.
- Points conséquens d'un aimant,** 903 et 904; — de certains corps électriques par la chaleur, 906.
- Poissons électriques.** Voyez *Torpille, Anguille de Surinam* et *Silure trembleur*.
- Polarisation de la lumière.** Principe d'où part la théorie des phénomènes qui s'y rapportent, 1397. Expériences dans lesquelles la lumière polarisée conserve sa blancheur, 1318. En quoi consiste le caractère distinctif de la polarisation, 1399. Détermination approximative de son *maximum*, relativement à une substance donnée, 1402. Nouvelles expériences dans lesquelles la lumière reste blanche, 1403. Description et usage d'un appareil simple destiné pour ce genre d'expériences, 1405 et suiv.
- Polarisation** dans laquelle la lumière se sous-divise en deux rayons teints de couleurs complémentaires l'une de l'autre, 1411 et suiv. Autres expériences dans lesquelles la lumière polarisée subit différentes modifications, 1419 et suiv. Théorie des phénomènes relatifs au sujet présent, proposée par M. Biot, 1426 et suiv.
- Pôles électriques,** 744.
- Pôles magnétiques,** 867.
- Pompes,** 436 et suiv. — foulantes, 437 et 438; — aspirantes, 439. Moyen de remédier à un vice de construction auquel elles sont sujettes, *ibid*; — aspirantes et foulantes, 440.
- Porosité,** 7. Expériences qui servent à la prouver, 8 et 9.
- Poteries.** Inconvénient qui résultent de

- ce qu'elles conduisent difficilement la chaleur, on ne peut les diminuer qu'aux dépens de la solidité, 263.
- Pouvoir absorbant et pouvoir émissif des corps, relativement au calorique, 153.
- Presbites. En quoi consiste le défaut de la vue chez ceux à qui on a donné ce nom, 1442. Moyen d'y remédier, *ibid.*
- Prisme destiné aux expériences sur la lumière, 1083 et 1084. Position sous laquelle l'image du spectre solaire produite par le prisme devient stationnaire, 1085. Explication des apparences que présentent les objets vus à travers un prisme, 1109.
- Propagation de la chaleur par l'intermède des corps solides; loi à laquelle elle est soumise, 175 et 176.
- Propagation de la lumière. *Voyez* Lumière.
- Propagation du son. *Voyez* Son.
- Propriétés les plus générales des corps. 2 — 28.
- Puissance ou force. Ce que l'on entend par ce mot, 13.
- Puissance réfractive d'un corps; méthode employée par Newton pour la déterminer, 1065. Celle des corps combustibles est plus grande, à densité égale, que celle des corps non combustibles, 1066. Conséquences que Newton a déduites de cette différence par rapport à la nature du diamant et à celle de l'eau, 1067.
- QUALITÉS occultes des anciens. On a accusé sans fondement les modernes de les avoir renouvelées, 1062.
- Quantité de mouvement. En quoi elle consiste, 16.

## R

- RAYON EXTRAORDINAIRE, relatif à la double réfraction, 1324.
- Rayon de lumière. En quoi il consiste dans chacune des deux hypothèses relatives à la propagation de la lumière, 997.
- Rayon ordinaire, relatif à la double réfraction, 1324.
- Rayon sonore, 502.
- Rayons calorifiques. Expériences qui indiquent que les rayons colorés du spectre solaire sont mêlés de rayons simplement calorifiques, 1200 et suiv.
- Rayons obscurs situés au-delà du violet, susceptibles d'exercer une action chimique, 1210.
- Rayons efficaces, ou rayons d'une couleur déterminée, qui, après s'être réfractés et réfléchis dans les gouttes de pluie, où se peint l'arc-en-ciel, sont plus condensés à leur point d'émergence que ceux des autres couleurs, 1113 et 1117. Valeurs des angles qui déterminent leurs effets, 1119.
- Réflexion de la lumière; se fait sous un angle égal à celui d'incidence, 1015. Ses effets lorsqu'elle rencontre une surface plane, 1016 et 1017. Lorsque la surface réfléchissante est concave et sphérique, 1018 et suiv.
- Lorsque la surface est convexe et sphérique, 1023 et suiv. Rapports entre la réflexion et la réfraction, 1045 — 1047. Raisons de croire que la réflexion de la lumière dépend d'une certaine force repandue uniformément sur la surface des corps et qui agit à une très petite distance, 1049 — 1052.
- Réfraction de la lumière, 1026. Se fait de manière que, pour un même milieu, le sinus de l'angle de réfraction est en rapport constant avec celui d'incidence, 1027. Sa loi inutilement cherchée par Képler, 1311; découverte par Snellius, *ibid.* Descartes substitue au rapport des co-sécantes celui des sinus, *ibid.* Effets de la réfraction considérée dans les milieux terminés par des surfaces courbes, 1029 et suiv. Cas où le milieu est terminé par une seule surface courbe, 1030 et suiv. Cas où le milieu est terminé par deux surfaces courbes opposées, 1039 et suiv. Rapports entre la réfraction et la réflexion, 1045 — 1047. Idées des Physiciens pour ramener la réfraction aux lois de la mécanique, 1054. Explication de la réfraction à l'aide de l'attraction dans les petites di-

- stances, 1055 — 1057. Démonstration du rapport constant entre les sinus d'incidence et de réfraction, 1056, note 1. Explication du cas où la réfraction se change en réflexion totale, 1058. Vues de Newton sur la réfraction et la réflexion considérées comme ayant une même cause, 1059 — 1062. Réfraction à travers les corps combustibles plus forte à densité égale, que dans les corps non combustibles. *Voyez* puissance réfractive.
- Réfraction (double). Sa découverte par Bartholin, 1320. Sa véritable loi découverte dès le commencement par Huygens, 1321. Raisons pour lesquelles elle a été méconnue pendant près d'un siècle, *ibid.* Marche de la lumière qui lui est soumise, à travers un rhomboïde de spath d'Islande, 1322. Définitions du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire, 1323 et 1324. Distance radiale, *ibid.* Duplication des images, à l'aide d'un seul rhomboïde, 1327 et suiv. Manière d'observer les variations de la distance radiale, 1331 et 1332. Explication de la différence entre les distances des deux images par rapport à l'œil, 1334 et suiv. Marche de la lumière à travers deux rhomboïdes superposés, 1338 et suiv. Théorie de Newton, 1344. Théorie d'Huygens, 1348. Recherches à l'aide desquelles MM. Wollaston et Malus ont reconnu qu'elle s'accordait avec la véritable loi du phénomène, *ibid.* Vues de M. de Laplace, sur la marche à suivre pour arriver à l'explication physique du phénomène, *ibid.* Détermination approximative de la loi d'Huygens, 1399 — 1351. Idée de Newton sur la cause physique du même phénomène, 1352 et 1553. Généralité des effets de la réfraction observés d'abord dans les rhomboïdes superposés de spath d'Islande, 1334 — 1336. Découverte par M. Biot, des deux espèces de réfraction nommées l'une *attractive* et l'autre *répulsive*, 1357. Limites relatives à la double réfraction, qui existent dans la structure des cristaux, 1360. Exemple tiré de ceux qui dérivent du rhomboïde de la chaux carbonatée, 1361. Autres exemples tirés des cristaux qui appartiennent à diverses substances, 1363 et suiv. Usages des observations précédentes pour déterminer l'axe de double réfraction, 1373. Sous-division des corps naturels, déduite de la double réfraction, 1380 et suiv.
- Réfraction moyenne; en quoi elle consiste, 1472.
- Retroidissement; loi à laquelle il est soumis, 175. Influence de certains enduits pour en faire varier le progrès, 180. Influence de l'agitation de l'air sur sa durée, 181. Différence entre son effet et celui de la compression, 237 et 238.
- Répulsion. Effets qui ont suggéré l'idée de ce mot, 30.
- Répulsions électriques, 668 et suiv.
- Répulsions magnétiques, 875.
- Réservoir commun, 595.
- Résonnance (triple) des corps sonores, 516 et suiv.
- Ressort de l'air. *Voyez* Air.
- Ressort d'une montre. Comment on corrige l'effet de son affaiblissement, tandis qu'il se débânde, 95.
- Ressorts; leur utilité, 96.
- Rétine. Membrane qui tapisse le fond de l'œil, 1215.
- Rose des vents. Sa description, 462.
- Rosée. Sa formation par le rayonnement du calorique, 185 et suiv. On voit quelquefois dans celle qui humecte l'herbe d'une prairie une copie de l'arc-en-ciel, 1131.
- Ruban de Volta; ce qu'on entend par ce mot, 830.
- Rumb des Vents, 462.

## S

SAVOX alkalin; ses effets particuliers, relativement à la transmission de l'électricité galvanique, 836.

Sciences. Division générale de celles

qui ont pour objet l'étude de la nature, en Physique, Chimie et Histoire naturelle; sous quel point de vue chacune de ces sciences consi-

- rière la nature, points de contacts qu'ont entre elles les mêmes sciences, j et ij.
- Sel marin.** Son extraction favorisée par une évaporation préalable, 471.
- Sels neutres.** Raison pour laquelle les nouveaux produits qui se forment, lorsqu'ils sont en échange de leurs bases, sont encore à l'état neutre, 81 et 82.
- Silure trembleur.** Espèce de poisson électrique, 846.
- Siphon;** son effet est dû à la pression de l'air, 441.
- Solidité.** Ce qu'on entend par ce mot, 6. Retour des fluides ou des liquides à cet état, 210—212.
- Son.** Il résulte d'un mouvement de vibration imprimé à l'air par les corps sonores, 499 et 500. Effets de ce mouvement sur l'eau renfermée dans un verre dont on frotte les bords avec un doigt mouillé, 501. L'air est le véhicule du son, 503—505. L'eau et différents corps solides sont aussi susceptibles de le transmettre, 506 et 507. Vitesse du son, 509. Idée d'après laquelle on peut concilier avec les résultats de l'observation ceux de la théorie qui donnaient la vitesse du son trop petite, 510. Différentes vitesses du son, suivant les divers corps qui le transmettent, 511. Réflexion du son; ses effets dans les lieux clos, 512. Elle est la cause des échos, *ibid.* Propriétés des voûtes elliptiques, relativement à la réflexion du son, 513.
- Sons comparés,** 514 et suiv. Principaux intervalles qui résultent de cette comparaison, 516. Cordes sonores; formules pour déterminer le nombre de leurs vibrations dans un temps donné, *ibid.* Triple résonance d'une corde sonore, 518. Les trois sons que cette corde fait entendre sont les premiers termes d'une série infinie d'harmoniques, 519—522. Expérience de Tartini, 523. Autre expérience dans laquelle les deux parties d'une corde divisée par un obstacle léger, se sous-divisent elles-mêmes en plusieurs portions égales, 524. formation de la gamme en usage, par la réunion de trois accords parfaits, 526. Raison de la préférence accordée à cette gamme sur celle qui est comprise dans la série des harmoniques d'une corde sonore, 527. Nécessité d'altérer, au moyen du *tempérament*, les tierces et les quintes, dans l'accord des instrumens à cordes, 528 et 529. Théorie de la propagation du son, 530 et suiv. Manière dont les sons simultanés se propagent sans se confondre, 543—545. Diversité de nuances dans la qualité des sons rendus par différens corps, 546.
- Sonomètre,** 517.
- Sons aigus,** 517.
- Sons comparés,** 514.
- Sons graves,** 515.
- Sons harmoniques,** 524.
- Spath d'Islande.** Nom donné aux rhomboïdes transparents de chaux carbonatée, 602.
- Spectre solaire,** ou image colorée du soleil, produite par la lumière qui a traversé un prisme, 1089 et suiv. Différences que l'on a observées entre les rayons qui le composent, relativement à leurs facultés calorifiques, 1201—1205. Différence entre les mêmes rayons, par rapport à leur faculté éclairante, 1206. Expériences sur la faculté calorifique croissante des mêmes rayons, en allant du violet au rouge, 1207—1209. Autres expériences sur l'action chimique des rayons obscurs qui existent au-delà du violet, 1210. Hypothèses relatives aux résultats de ces diverses expériences, 1211 et 1212.
- Sphère d'activité sensible,** 73.
- Sière.** Mesure de solidité égale au mètre cube, 67.
- Structure des cristaux.** Voyez Cristaux.
- Succin** ou ambre jaune. L'électricité a emprunté son nom de celui d'*electrum* que portait cette substance, 583, note 1.
- Sueur** ou transpiration sensible, 10.
- Surfaces vibrantes.** Voyez Vibrations.
- Système.** Différentes acceptions de ce mot, vij. En quoi consiste le système pris par opposition à la théorie, et combien il est opposé à la véritable marche des sciences, *ibid.*
- Système métrique (nouveau).** Exposé succinct de sa distribution, 64—70

## T

- TACT.** Comment son action se combine avec les impressions que reçoit l'œil, pour nous aider à juger des formes, des grandeurs et des distances des objets, 1219 et suiv.
- Taffetas gommé.** Manière dont il s'électrise à l'aide d'un corps appliqué par pression sur sa surface, 601.
- Télescope.** Sa découverte, 1310. D'où dépendent en général ses effets, 1453.
- Télescope astronomique.** Sa description et ses effets, 1454.
- Télescope catadioptrique,** 1465.
- Télescope dioptrique,** 1460.
- Télescope Grégorien.** Sa description, 1466.
- Télescope Newtonien.** Sa description, 1464 et 1465.
- Tempérament dans la musique;** en quoi il consiste, 528 et 529.
- Température;** ce qu'on entend par ce mot, 139.
- Temps.** Comment il doit être considéré dans l'estimation de la vitesse, 15. Rapport entre les temps et les espaces parcourus en vertu du mouvement accéléré dû à la pesanteur, 37.
- Tendres (corps),** 89.
- Tension du calorique,** 139.
- Terre.** Regardée long-temps comme un des quatre éléments, 319. *Voyez* Globe terrestre.
- Théorie.** En quoi elle consiste, et combien elle contribue au progrès des sciences, v. Avantages des détails dans le développement d'une théorie, xxxiv.
- Thermomètre (idée du),** 140 et 141. Son origine, 264. Conditions requises pour obtenir un bon thermomètre, 266. Avantages de l'emploi du mercure dans la construction de cet instrument, 269 — 272. Vérification de cet instrument, au moyen du thermomètre à mercure, 269; au moyen du thermomètre à air, 271. Pourquoi il est indifférent de laisser de l'air dans la partie supérieure du tube, 273.
- Thermomètre centigrade,** 268.
- Thermomètre d'Amontons,** 246.
- Thermomètre de Delisle,** 276.
- Thermomètre de Fahrenheit,** 275.
- Thermomètre de Florence,** 265.
- Thermomètre de Réaumur;** sa description, 267.
- Thermomètre différentiel;** sa description, 164.
- Thermomètre moderne usité en France;** manière de le construire, 268.
- Thermomètre métallique,** de M. Bréguet, 277 et suiv.
- Thermoscope,** sa description, 163. Circonstance remarquable où il reste stationnaire, 173 et 174.
- Timbre.** Vibrations de ses différens anneaux, lorsqu'on le fait résonner, 500.
- Topaze.** Exemple singulier d'un cristal de cette espèce, qui étant électrisé par la chaleur, avait des points conséquens analogues à ceux des corps magnétiques, 906.
- Torpille,** 840 et suiv. Description de son organe électrique, 841. Opinions des anciens physiciens sur la cause de la commotion qu'elle fait éprouver à ceux qui la touchent, 843 et 844. Expériences à l'aide desquelles on a reconnu que cette commotion était due à l'électricité, 845 et suiv. Idée de Walsh sur la manière dont le fluide électrique agit dans cette commotion, 849. Idée de Volta sur l'analogie entre la combinaison des substances qui composent l'organe de la torpille et celle des corps dont la pile est l'assemblage, 850.
- Torrens,** leur cause, 491.
- Toucher (sens du).** *Voyez* Tact.
- Tourmaline.** Vertu électrique qu'elle acquiert à l'aide de la chaleur, 745. Son action sur un corps à l'état naturel, 747. Détermination de ses deux pôles, 748 et suiv. Attractions et répulsions que chacun de ses pôles exerce sur des corps légers, 754. Expérience relative à la distribution des deux fluides dans son intérieur, 755. Phénomène que présente une tourmaline cassée, 756. Retour de la vertu polaire, en sens inverse, pendant le refroidissement de la pierre, 757 et suiv. Corrélation entre la forme des tourmalines et les positions de ses pôles, 762. Analogie entre une

- tourmaline devenue électrique par la chaleur et la pile de Volta, 804. Les phénomènes de la tourmaline ont indiqué le lien qui unit la théorie du magnétisme avec celle de l'électricité, 861.
- Transparent (corps). Effets des accès de facile réflexion et de facile transmission dans ceux qui sont sans couleur, 1165—1168; et dans ceux qui sont colorés, 1173 et 1174.
- Transpiration. Résultat de celle qu'on nomme *sueur*, comparé avec celui de la transpiration insensible, 10.
- Trombe, sa description, 488.
- Tubes capillaires. Idée générale des phénomènes qu'ils présentent, 337—341. Diverses causes dont on a fait dépendre ces phénomènes, 318 et suiv. Anciennes opinions sur ce sujet, 343. L'attraction dans les petites distances est la véritable cause de ces phénomènes, 344 et 345. Différentes manières dont Hauxbée, Jurin, Witbrecht et Clairaut ont essayé de les expliquer, 345 et 346. Leur véritable théorie, par Laplace, 348 et suiv. Action d'une masse de liquide sur une colonne située à l'intérieur, 349—357. Application de la théorie aux phénomènes des tubes capillaires, 358 et suiv. Cause de l'abaissement du mercure au-dessous du niveau, 360 et 361. Cas où le liquide est terminé par une surface cylindrique, 362 et 363. Circonstance dans laquelle l'eau s'élève au-dessus de son niveau, en formant une hyperbole, 364. Mouvements des liquides dans les tubes capillaires d'une figure conique, ou entre deux lames inclinées sous un petit angle, 365 et 366. Effets de la capillarité sur les parois des corps qui renferment le liquide, 379—382. Application de la théorie aux attractions et aux répulsions apparentes des petits corps qui flottent sur un liquide, 372—374. Circonstances qui déterminent la concavité ou la convexité de la surface du liquide, 375—378. Influence du frottement sur la capillarité, 379—381. Analogie de divers effets connus avec ceux des tubes capillaires, 383 et 384.

## U, V, Z

- Unité de poids. *Voyez* poids.
- Unité de temps, employée dans la considération du mouvement uniforme, 15.
- Vapeur vésiculaire, 476 et suiv.
- Vapeurs, 207 et 215. Rapport suivant lequel elles se dilatent depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante, 251. Loi à laquelle sont soumises les forces élastiques des mêmes fluides, à mesure que les températures de ces fluides varient par des différences égales, 253 et 254. Effets de leur mélange avec les gaz, 285 et suiv. Leur quantité dans un espace donné est constante, par une même température, 286—293. Pesanteur spécifique de la vapeur de l'eau comparée à celle de l'air, 300. Accord de la théorie avec l'observation sur la capacité de l'air pour cette vapeur, 301. Différence entre l'effet de la pression sur la vapeur, quand celle-ci est seule, et quand elle est unie à l'air, 475.
- Vaporisation. En quoi elle consiste, 209. Ce qui la distingue de l'évaporation, *ibid.*
- Vent d'est. Son explication, 464 et suiv.
- Vents. Leur cause générale, 460. Observations sur leur vitesse, 461. Leur diversité, 462 et suiv. Leur utilité, 468 et 469.
- Vents alises ou moussons, 463.
- Vents généraux, *ibid.*
- Vents irréguliers, *ibid.*
- Vents périodiques, *ibid.*
- Verre ardent; ses effets, 1443.
- Verrebiconcave. Ses effets, 1444 et suiv.
- Verre biconvexe. *Voyez* Verre lentillaire.
- Verre lentillaire, ou lentille, 1039. Foyer des rayons qui tombent parallèlement sur une lentille, 1040. Effets de cette espèce de verre, relativement à la vision des objets situés en dedans du foyer des rayons parallèles, 1429 et 1433. Effets du même verre, lorsque l'objet est situé au-delà du foyer des rayons pa-

- rallèles, 1434 et suiv. ; cas où l'image est simple, 1434 ; cas où l'image est double, 1435. Illusion qui nous la fait paraître située derrière la lentille, *ibid.* Explication de ces effets, 1438 et 1439. Manière de dissiper l'illusion, 1440 et 1441. Action des rayons solaires réunis au foyer d'une lentille, 1443.
- Verre lenticulaire nommé *microscope simple* ; ses effets ; 1449 — 1452. Globe de verre, ou goutte d'eau que l'on substitue quelquefois au verre lenticulaire, pour avoir un microscope simple, 1453.
- Vésicules. *Voyez* Vapeur vésiculaire.
- Vessie natatoire des poissons. Son usage, 59.
- Vibrations d'une corde ou d'un timbre. *Voyez* Oscillations.
- Vibrations excitées par le frottement d'un archet dans des lames d'une matière élastique, 547 et suiv. Expériences avec des lames carrées, 553 et suiv. Expériences avec des lames circulaires, 565 et suiv. Moyens employés par M. Savart, pour perfectionner les instrumens à cordes, 577 et suiv.
- Vision aidée par l'art. 1360 et suiv.
- Vision aidée par les instrumens composés de plusieurs verres. *Voyez* Lunette, Téléscope et Microscope.
- Vision à l'aide d'un seul verre terminé par des surfaces concaves. *Voyez* Verre lenticulaire et Verre concave.
- Vision naturelle, 1213 et suiv. Manière dont les images des objets se forment au fond de l'œil, 1216. Secours que nous tirons du tact pour nous aider à juger des formes, des grandeurs et des distances des objets, 1218—1221. Pourquoi les objets nous paraissent droits, quoique leurs images soient renversées sur la rétine, 1220. Pourquoi nous ne voyons pas les objets doubles, quoique chacun d'eux ait son image dans l'un et l'autre œil, 1225. Comment l'impression de la distance se combine avec celle de la grandeur apparente, pour produire en nous la sensation qui nous représente la grandeur réelle, 1221, 1024 et suiv. Circonstances dans lesquelles nous nous trompons sur l'estimation de la grandeur, 1226. Influence de la clarté des objets sur l'estimation de la distance, 1229. Comment les objets qui se trouvent entre nous et celui que nous regardons de préférence nous aident à estimer la distance de celui-ci, *ibid.* Exemples tirés de personnes opérées de la cataracte, qui prouvent combien l'œil est neuf dans l'art de voir, lorsqu'il donne accès à la lumière pour la première fois, 1230 et 1231. Illusions auxquelles la vue est sujette dans une multitude de circonstances, 1232 et suiv. *Voyez* Illusions d'optique.
- Vitesse. En quoi elle consiste, 15.
- Vitesse angulaire, 467, note 1.
- Vitres des appartemens. Pourquoi elles sont mouillées en dedans lorsqu'il gèle, et en dehors par un temps de dégel, 486.
- Vol des oiseaux. Moyens à l'aide desquels il s'exécute, 453.
- Volume d'un corps. En quoi il consiste, 6.
- Zinc. Densité de son alliage avec le cuivre, plus grande que la somme des densités particulières, 22. Isolé et frotté, il s'électrise vitreusement, 99.
- Zinc oxide. Acquiert des pôles électriques, à l'aide d'un léger degré de chaleur, 757. Sa vertu polaire disparaît, à un certain degré de refroidissement, et renaît en sens inverse, à un degré plus bas, *ibid.* Elle résiste sous cette nouvelle forme, à l'influence croissante du refroidissement, et l'on ne connaît pas le terme auquel elle s'arrêterait, 760.

Fin de la Table des Matières.

---

# TRAITÉ

## ÉLÉMENTAIRE

DE

# PHYSIQUE.

---

1. **L**A Physique a pour objet la connaissance des phénomènes de la nature. Dans la production de ces phénomènes, les corps manifestent diverses propriétés dont l'étude doit exciter particulièrement notre attention; et c'est en recherchant les lois établies par l'Être suprême pour régler l'exercice de ces mêmes propriétés, que nous nous élevons jusqu'aux théories qui servent à lier les faits entre eux, et à nous en montrer la dépendance mutuelle.

### I. DES PROPRIÉTÉS LES PLUS GÉNÉRALES DES CORPS.

2. **P**ARMI les différentes propriétés dont jouissent les corps, les premières qui s'offrent à notre observation sont celles qui tiennent de plus près à la nature même de ces êtres, considérés comme de simples assemblages de particules matérielles. On peut les réduire aux quatre suivantes : l'étendue, la mobilité, l'impenétrabilité, la divisibilité.

TOME I.

1

## 1. De l'Étendue.

3. Les philosophes se sont épuisés en longues discussions, pour rechercher quelle est la véritable notion de l'étendue, et si elle constitue l'essence de la matière. Nous ne connaissons pas assez la nature des corps, pour décider ces sortes de questions, et les véritables physiciens ne s'en occupent plus aujourd'hui. Contens de ce que le rapport de leurs sens leur apprend au sujet de l'étendue, ils conçoivent qu'il y a étendue, partout où il y a contiguïté et distinction de parties; et ce qui les intéresse, c'est de pouvoir mesurer l'étendue, au lieu de s'amuser à la définir; c'est d'en comparer les différentes parties, et de tirer de cette comparaison des résultats vraiment utiles aux progrès de nos connaissances.

4. La manière dont l'étendue d'un corps est bornée en tout sens, détermine la figure de ce corps; et l'on peut dire que les figures des corps varient à l'infini, à ne considérer la chose qu'en général, et en réunissant toutes les nuances que peut offrir le tableau de la nature. Mais ces nuances ne font que modifier plus ou moins légèrement les ressemblances frappantes qui existent d'ailleurs entre les êtres de chaque espèce, soit parmi les animaux et les végétaux, soit même parmi un grand nombre de corps inorganiques renfermés dans le sein de la terre; et pour fixer ici principalement notre attention sur ces derniers dont la considération, sous un certain point de vue, est du ressort de la Physique, on remarque qu'un grand nombre de ces corps présentent des figures régulières et déterminées, en sorte que leur seul aspect annonce l'action d'une cause soumise à des lois qui ont leur mesure et leurs limites. Ces corps, que l'on a nommés *cristaux*, sont terminés par des faces planes, et ont beaucoup d'analogie avec les solides que considèrent les géomètres; et ainsi dans les minéraux, le caractère de la perfection est attaché à la ligne droite; les formes arrondies sont dues à des espèces de perturbations qu'ont éprouvées les forces qui sollicitaient les molécules à se réunir, tandis que dans les ani-

maux et dans les végétaux, les contours et les arrondissemens tiennent à l'organisation elle-même, et contribuent à la grâce, et à l'élégance des formes.

5. Les physiciens ont conclu de ces observations que les corps cristallisés sont eux-mêmes composés de particules d'une figure déterminée, et plusieurs d'entre eux ont eu recours au microscope, pour essayer de surprendre à la nature le secret des formes élémentaires, en se servant de cet instrument, comme pour assister à la naissance des cristaux. Mais le microscope ne nous apprend ici rien au-delà de ce que nous disent nos yeux abandonnés à eux-mêmes; les plus petits corps qu'il puisse nous faire apercevoir sont des cristaux déjà tout formés, qui ne diffèrent que par leurs dimensions de ceux dont l'accroissement est parvenu à son terme. Nous exposerons plus bas le moyen qui paraît seul susceptible de nous guider relativement aux recherches de ce genre, et de nous offrir, dans ce qui est soumis à nos observations, des indices sinon certains, du moins vraisemblables, des formes qu'affectent ces infiniment petits de la nature, qui échapperont toujours à nos regards.

6. L'étendue d'un corps, considérée relativement à la grandeur de ses dimensions, donne le volume de ce corps. C'est l'équivalent de ce que les géomètres appellent *solidité*.

### *De la Porosité.*

7. Lorsque nous avons fait entrer dans la notion de l'étendue la contiguïté des parties dont les corps sont les assemblages, nous ne prétendons pas nous exprimer d'une manière rigoureuse. On sait que l'intérieur des corps est criblé d'une infinité de vacuoles, auxquels on a donné le nom de *pores*; et il est même très vraisemblable qu'il y a dans les corps beaucoup plus de vide que de plein. La somme totale des parties matérielles d'un corps, est ce qu'on appelle la *masse* de ce corps; et la somme des parties matérielles renfermées sous un volume donné, tel qu'un mètre cube ou un centimètre cube, est ce

qu'on appelle la *densité* du corps : d'où il résulte que la densité est le rapport de la masse au volume, ou, ce qui revient au même, elle est égale à la masse, divisée par le volume. Par exemple, un morceau de bois peut avoir plus de masse qu'un morceau d'or, si son volume l'emporte assez pour cela, sur celui de l'or. Mais le bois a nécessairement moins de densité que l'or, parce qu'il renferme, sous un volume donné, beaucoup moins de parties matérielles.

8. La faculté qu'ont tous les corps de se contracter en se refroidissant, ainsi que nous l'expliquerons dans la suite, fait voir que leurs molécules laissent entre elles de petits interstices qui leur ont permis de se rapprocher : mais quand même on supposerait le refroidissement porté à l'extrême, il ne s'ensuit pas que les molécules dussent franchir entièrement les petits espaces qui les séparent, parce qu'il peut y avoir dans leur forme, dans leur arrangement et autres circonstances, une cause d'écartement qui tienne à la nature intime des corps. On voit par là que cette expression de *contact immédiat* que nous employons souvent, en parlant des molécules des corps, ne doit pas être prise à la lettre; elle désigne seulement la plus petite distance respective à laquelle les molécules puissent parvenir, eu égard aux circonstances où elles se trouvent.

Les physiciens prouvent la porosité des corps à l'aide de plusieurs expériences fort connues. On fait le vide, au moyen de la machine pneumatique, dans un tube de verre, terminé à sa partie supérieure par un godet de bois, dont le fond à 7 ou 8 millimètres d'épaisseur, et dans lequel on a versé de l'eau. Ce liquide passe à travers les pores du fond, et tombe par gouttes dans l'intérieur du tube. On substitue à celui-ci un autre tube garni en haut d'un flacon de cristal, auquel un morceau de cuir de buffle sert de fond, et qui est rempli de mercure jusqu'à la hauteur de deux doigts. Dès les premiers coups de piston, on aperçoit dans le tube le mercure qui tombe sous la forme d'une pluie argentée.

9. On peut démontrer la même propriété au moyen d'une expérience simple et intéressante, faite sur une pierre dont

Newton a parlé au sujet de cette même propriété, parce qu'elle donne lieu à un phénomène particulier de lumière (1).

Cette pierre est du genre de celles que l'on nomme *agathes*, qui sont demi-transparentes, et assez dures pour étinceler par le choc du briquet. On lui a donné le nom particulier d'*hydrophane*. Lorsqu'on l'a plongée dans l'eau, on voit s'élever de sa surface des files nombreuses de petites bulles d'air, qui se succèdent sans interruption. Cet air qui occupait les pores de la pierre, en est délogé par l'eau qui le remplace; en même temps la pierre acquiert un nouveau degré de transparence; et si on la pèse d'abord avant l'expérience, et de nouveau après l'expérience, on trouve que son poids est augmenté d'une quantité sensible. Nous expliquerons la cause physique de la transparence acquise par l'hydrophane, lorsque nous parlerons des phénomènes de la lumière: nous ne le considérons ici que comme offrant un exemple remarquable de la porosité des corps; et même l'expérience que nous venons de citer, nous apprend ce que ne disent pas les expériences ordinaires; savoir: qu'on ne doit pas considérer les pores comme étant absolument vides de toute matière étrangère, mais plutôt comme étant occupés par l'air, ou par quelque autre fluide subtil, disséminé entre les molécules des corps.

Un hydrophane du poids d'environ 18 décigrammes, dans son état ordinaire, après avoir été soumis à cette expérience, pesait à peu près 21 décigrammes, d'où il suit que son poids était augmenté de  $\frac{1}{5}$ . La pierre perd par le desséchement l'eau dont elle s'était imbibée, et reprend en même temps son opacité naturelle.

10. La peau de l'homme et des animaux est criblée d'une infinité de pores par lesquels s'échappent, au moyen de la transpiration, les parties des alimens qui ne contribuent point à la nutrition. Indépendamment de la transpiration sensible, que l'on nomme *sueur*, et qui est accidentelle, il s'en fait une insensible, qui agit plus ou moins à tous les instans, et que l'on n'aurait pas imaginé être aussi abondante, avant les expé-

---

(1) Optice lucis, lib. II, pars tertia, propos. tertia.

riences de Sanctorius. Ce savant célèbre a eu la constance de passer une partie de sa vie dans une balance où il se pesait lui-même, pour déterminer les pertes occasionnées par les effets de la transpiration. Il a trouvé que cette espèce d'évacuation nous faisait perdre, dans l'espace de vingt-quatre heures, environ les  $\frac{5}{8}$  de la nourriture que nous avons prise.

11. Dodard, en reprenant depuis ces mêmes expériences, a eu égard à la différence de l'âge, et s'est assuré que l'on transpirait beaucoup plus dans la jeunesse. Mais les physiciens qui s'étaient occupés de cet objet, n'avaient pas distingué l'effet de la transpiration qui se fait par le poumon, et dont la matière s'échappe au moyen de l'expiration, de l'effet qui est dû à la transpiration cutanée, ou à celle qui a lieu par l'intermédiaire de la peau. Seguin a entrepris, conjointement avec Lavoisier, de déterminer les deux effets; et après avoir cherché, à l'ordinaire, le résultat de la transpiration totale, il a supprimé celle qui se fait par la peau, en appliquant sur cet organe une enveloppe imperméable à l'humeur qu'il transmet au dehors; il a obtenu ainsi la quantité de la transpiration pulmonaire, et la moyenne entre les résultats de ses expériences donne  $\frac{7}{11}$  pour le rapport entre cette quantité et celle de la transpiration cutanée, c'est-à-dire, que l'effet qui provient de la transpiration pulmonaire, est plus que le tiers de l'effet total.

12. Nous n'avons aucun moyen d'estimer la densité absolue des corps. Il faudrait pour cela qu'il existât une matière parfaitement dense, qui pût servir de terme de comparaison, pour déterminer, à l'égard de chaque corps, le rapport entre la quantité de matière propre et la somme des pores. Au défaut d'une pareille matière, nous ne pouvons que comparer entre elles les différentes densités du corps; ce qui se fait à l'aide du poids, ainsi que nous le dirons bientôt.

## 2. De la Mobilité.

13. La mobilité est la faculté qu'a un corps de pouvoir être transporté d'un lieu dans un autre. Cet état que l'on appelle

*mouvement*, suppose l'action d'une cause à laquelle on a donné le nom de *force* ou de *puissance*. Pour que cette cause existe, il n'est pas nécessaire que le corps qu'elle sollicite ait un mouvement réel. Ainsi, lorsque deux corps se font équilibre aux deux extrémités du levier d'une balance, ils sont maintenus dans cet état par des forces réellement existantes, mais dont les effets se détruisent mutuellement, ou se bornent à produire dans les corps une tendance à se mouvoir.

14. Le mouvement est uniforme, lorsque le mobile parcourt toujours le même espace dans le même temps; il est accéléré ou retardé, lorsque le mobile parcourt dans des temps égaux des espaces qui vont successivement en augmentant ou en diminuant.

### *De la Vitesse.*

15. Dans le mouvement uniforme, le temps employé à parcourir chaque espace déterminé peut être plus ou moins long, suivant le plus ou moins d'énergie de la force motrice.

Pour comparer entre eux les mouvements de deux corps, dans le cas de l'uniformité, on prend un intervalle de temps; par exemple, la seconde, pour unité de temps: on choisit de même une unité d'espace, telle que le mètre. De cette manière, on exprime l'espace total qu'a parcouru chaque corps, et le temps employé à le parcourir, par des nombres abstraits, qui indiquent combien de fois ils renferment l'unité de leur espèce; et en divisant le nombre qui représente l'espace par celui qui représente le temps, on a la vitesse de chaque corps. Si l'on suppose, par exemple, que l'un des corps ait parcouru trente-cinq mètres en sept secondes, et l'autre vingt-quatre mètres en six secondes, la vitesse du premier sera  $\frac{37}{7}$ , et celle du second  $\frac{24}{6}$ ; c'est-à-dire, que les vitesses seront entre elles dans le rapport de 5 à 4.

On voit par là dans quel sens doit être prise la notion que l'on donne de la vitesse, lorsqu'on dit qu'elle est égale à l'espace divisé par le temps. A la rigueur, on ne peut pas diviser l'une par l'autre deux quantités hétérogènes, telles que l'espace et le

temps. Ainsi, le langage dont il s'agit n'est qu'une manière abrégée d'exprimer que la vitesse est égale au nombre d'unités d'espace divisé par le nombre d'unités de temps, qui mesurent le mouvement d'un corps.

16. Comme les forces ne se manifestent à notre égard que par leurs effets, ce n'est que par les effets qu'elles sont capables de produire, que nous pouvons les mesurer. Or l'effet d'une force est d'imprimer à chaque particule d'un corps une certaine vitesse. On suppose, dans ce cas, que toutes les particules reçoivent la même vitesse, et l'effet de la force a pour mesure la vitesse prise autant de fois qu'il y a de particules dans le corps; ou, pour abrégér, sa mesure est le produit de la masse par la vitesse. Ce produit est ce qu'on appelle la *quantité de mouvement d'un corps*.

### *De l'Inertie.*

17. Tous les corps persèverent d'eux-mêmes dans leur état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite; en sorte qu'un corps en repos ne peut se mouvoir sans y être sollicité par quelque force, et que de même le mouvement rectiligne uniforme d'un corps ne peut être détruit ou changé sans l'action d'une cause étrangère.

Il suit de là que quand un corps se meut d'un mouvement accéléré ou retardé, on doit supposer l'action d'une force qui intervient à chaque instant pour occasionner une variation dans la vitesse qui, sans cela, serait uniforme.

18. Ce que nous venons de dire n'est qu'une manière différente d'énoncer qu'un corps ne peut se donner de mouvement à lui-même, ni rien s'ôter de celui qu'il avait déjà. On a appelé *inertie*, ce défaut d'aptitude qu'ont les corps pour apporter d'eux mêmes un changement dans leur état actuel. Or on sait qu'un corps, dont l'état vient à changer par l'action d'une force étrangère, ne se prête à cet effet qu'en altérant lui-même l'état de cette force, c'est-à-dire en lui enlevant une partie de son mouvement. On en a conclu que la persévérance d'un corps,

dans son état de repos ou de mouvement uniforme, était elle-même l'effet d'une force réelle qui résidait dans ce corps; et l'on a envisagé cette force tantôt comme une résistance, en ce qu'elle s'opposait à l'action de l'autre force pour changer l'état de ce corps, tantôt comme un effort, en ce qu'elle tendait à apporter du changement dans l'état de l'autre force.

19. Le célèbre Laplace a proposé une manière plus nette et plus naturelle d'envisager l'inertie. Pour concevoir en quoi elle consiste, supposons un corps en mouvement qui rencontre un corps en repos : il lui communiquera une partie de son mouvement; en sorte que si le premier a, par exemple, une masse double de celle du second, auquel cas sa masse sera les deux tiers de la somme des masses, la vitesse qu'il conservera sera aussi les deux tiers de celle qu'il avait d'abord; et comme l'autre tiers qu'il a cédé au second corps se trouve répandu sur une masse une fois plus petite, les deux corps auront après le choc la même vitesse. L'effet de l'inertie se réduit donc à la communication que l'un des deux corps fait à l'autre d'une partie de son mouvement; et parce que ce dernier ne peut recevoir sans que le premier ne perde, on a attribué cette perte à une résistance exercée par le corps qui reçoit. Mais il en est ici à peu près du mouvement comme d'un fluide élastique contenu dans un vase, avec lequel on mettrait en communication un autre vase qui serait vide; ce fluide s'introduirait par sa force expansive dans le second vase, jusqu'à ce qu'il se trouvât distribué uniformément dans les capacités des deux vases : de même un corps qui en choque un autre, ne fait, pour ainsi dire, autre chose que verser dans celui-ci une partie de son mouvement; et il n'y a pas plus de raison pour supposer ici une résistance, que dans l'exemple que nous venons de citer.

Il est vrai que quand on frappe avec la main un corps en repos, ou dont le mouvement est moins rapide que celui de cette main, on croit éprouver une résistance; mais cette illusion provient de ce que l'effet est le même à l'égard de la main, que si elle était en repos, et que ce fût le corps qui vint la frapper avec un mouvement en sens contraire.

Nous nous bornons ici à ces notions générales, par rapport à la mobilité; et nous n'entrerons point dans les détails relatifs aux différentes espèces de mouvement et aux autres résultats, dont la considération appartient aux sciences physico-mathématiques.

### 3. De l'Impénétrabilité.

20. Lorsqu'un corps en mouvement rencontre un autre corps qui est en repos, il ne prend la place que ce dernier occupait dans l'espace, qu'en le forçant à la quitter, en vertu de la partie qu'il lui a communiquée de son propre mouvement. Cette observation nous aide à découvrir dans les corps une autre propriété à laquelle on a donné le nom d'*impénétrabilité*, et qui consiste dans la faculté qu'a un corps d'exclure tout autre corps du lieu qu'il occupe; de manière que deux corps mis en contact, ne peuvent jamais occuper un espace moindre que celui qu'ils remplissaient lorsqu'ils étaient séparés.

21. S'il existait des corps dont on pût être tenté de révoquer en doute l'impénétrabilité, ce seraient ceux qui, étant invisibles, et ayant leurs molécules parfaitement mobiles, sont susceptibles de céder à la plus légère pression. Quoique nous ne soyons pas encore au moment de donner une notion exacte de ces corps que l'on a nommés *fluides*, il en est un, savoir l'air atmosphérique, dont l'existence nous est trop familière, pour qu'il ne nous soit pas permis de le citer ici comme exemple.

Tant que ce fluide n'est pas renfermé, son extrême mobilité fait qu'il livre un libre passage à tous les corps qui se meuvent au milieu de lui; mais dans ce cas il est proprement remplacé et non pas pénétré: car si on le contient par les parois d'un vase, et qu'alors un autre corps se présente pour prendre sa place, sans lui permettre de sortir, il exerce son impénétrabilité à la manière des corps solides. C'est ce dont on se convaincra aisément à l'aide d'une expérience fort simple, et que chacun peut faire. Elle consiste à plonger un vase verticalement, l'orifice

en bas, dans un autre vase rempli d'eau jusqu'à une certaine hauteur. La surface de l'eau, qui répond à l'orifice du premier vase, s'abaisse à mesure que ce vase descend lui-même ; et l'on peut rendre cet abaissement plus sensible, au moyen d'une petite lame de liège que l'on fait flotter sur la surface de l'eau. Cependant cette eau n'est pas entièrement exclue par l'air qui occupe le vase plongé ; il s'en élève toujours une certaine quantité qui augmente à mesure que le vase descend à une plus grande profondeur. Mais cet effet est dû à une propriété de l'air que nous ferons connaître plus particulièrement dans la suite, et en vertu de laquelle son volume se resserre dans un plus petit espace, par l'effort que fait la colonne d'eau qui répond à l'ouverture du vase, pour se mettre de niveau avec l'eau environnante.

22. Nous devons prévenir ici une difficulté qui paraît résulter de ce que, quand on a mêlé certains corps, le volume du mélange est moindre que la somme des volumes pris séparément. C'est ce qui arrive, par exemple, lorsqu'on mêle à parties égales de l'*alcool* avec de l'*eau* ; c'est ce qui a lieu encore lorsqu'on allie par la fusion le *cuivre* avec le *zinc*, pour former le métal composé que l'on appelle *cuivre jaune*, ou *laiton*. On observe qu'alors la densité du mélange est augmentée d'environ un dixième. Cette pénétration apparente provient de ce que les molécules des deux corps, en vertu de leurs figures particulières, se rapprochent en général davantage que dans les deux corps pris séparément. Il en résulte dans la figure des pores, un changement qui diminue l'espace égal à la somme de ces pores ; au contraire, dans l'alliage de l'*argent* et du *cuivre*, il se fait une sorte de raréfaction, en sorte que le volume du mélange est un peu plus grand que la somme des volumes des deux corps, avant la fusion.

#### 4. De la Divisibilité.

23. Le mot de *divisibilité* restreint à sa simple signification, ne présente rien qui ne soit parfaitement connu, puisque tous

les corps ont des parties que l'on conçoit aisément comme étant séparables les unes des autres. Mais la matière est-elle réellement divisible à l'infini, en sorte que sa division n'admette aucunes bornes possibles ? ou bien est-elle composée, en dernier résultat, de molécules indivisibles, et que l'on doive regarder comme simples ? Nouvelle source de discussions interminables entre les partisans des deux opinions, où l'esprit humain a exercé toute sa subtilité pour trouver des argumens en faveur de chacune, et des difficultés contre l'autre : après avoir beaucoup disputé, beaucoup écrit, le tout au sujet d'un atome, on n'en a pas été plus avancé, et la solution de la question elle-même n'aurait pas fait faire à la science un pas de plus. On a banni de la Physique toutes ces questions stériles pour le progrès de nos connaissances. Au lieu de chercher si les corps pouvaient être divisés à l'infini, on les a analysés autant qu'ils pouvaient l'être, et on a tiré de ces analyses, des connaissances qui ont répandu la lumière sur des faits regardés auparavant comme inexplicables. On a vu sagement que les bornes de l'expérience et de l'observation sont pour nous celles de la nature elle-même.

24. Ce qu'il y a de certain par rapport à la division des corps, c'est qu'il en résulte des parties séparées les unes des autres, dont la finesse étonne notre imagination. Nous pouvons d'abord citer en preuve les matières colorantes, et en particulier le carmin, qui est une espèce de poudre que l'on retire de l'insecte nommé communément *cochenille*. On délaye une petite quantité de cette poudre, du poids de 5 centigrammes (un peu moins d'un grain), au fond d'un vase, dans lequel on verse ensuite 15 kilogrammes ou environ 30 livres d'eau. La couleur s'étend de manière qu'elle devient sensible dans tout le volume de l'eau. Le poids de cette eau étant trois cent mille fois plus grand que celui des cinq centigrammes de carmin, si l'on suppose que chaque centigramme contienne seulement deux molécules de principe colorant, on aura trois millions de parties visibles dans cinq centigrammes de carmin.

25. Les impressions qui se font sur l'odorat, ne sont pas

moins propres que celles qui affectent la vue, à nous faire juger de l'extrême division à laquelle se prête la matière. Il est des corps dont le poids est à peine sensiblement altéré après un long intervalle de temps, pendant lequel tous ceux qui se trouvent à une certaine distance ne cessent de ressentir l'action des particules odoriférantes émanées de la substance de ces corps.

On retire d'une poche renfermée dans le corps de certains animaux, une substance à laquelle on a donné le nom de *musc*, et dont un seul grain répand une forte odeur, pendant un certain nombre d'années, dans un appartement où l'air est souvent renouvelé. Le simple frottement d'un papier qui a servi à envelopper un morceau de la même substance, suffit pour rendre un habit odorant pendant plusieurs jours.

26. Les procédés des arts peuvent nous donner une idée d'autant plus juste de la même propriété, qu'ici les résultats sont susceptibles d'être soumis au calcul. Suivant l'observation de Boyle, le poids d'un grain d'or, ou d'environ 53 milligrammes, réduit en feuilles, peut couvrir une surface de 50 pouces carrés, dont chacun aura par conséquent à peu près 27 millimètres de côté : or on peut concevoir le millimètre divisé en 8 parties visibles, ce qui donne 46656 petits carrés visibles dans une feuille d'or carrée de 27 millimètres de côté ; et comme le nombre de ces feuilles est de 50, on en conclura qu'une petite masse d'or du poids de 53 milligrammes, peut être divisée en plus de deux millions de parties sensibles, j'entends à la vue simple ; car au moyen du microscope, chaque partie redeviendrait une feuille d'or, où l'œil et le calcul trouveraient encore de quoi s'exercer

La division va beaucoup plus loin dans le travail du tireur d'or. On prend une certaine quantité de feuilles de ce métal, dont le poids peut ne pas excéder celui de 3 décagrammes ou d'environ une once, et l'on en couvre un cylindre d'argent. On fait passer ensuite ce cylindre par différentes filières, et lorsqu'on l'a réduit en un fil aussi délié qu'un cheveu, recouvert dans tous ses points d'une couche d'or extrêmement mince, on

l'aplatit entre deux rouleaux d'acier. Dans cet état, il forme une lame, dont la longueur est à peu près égale à 444 mille mètres, qui répondent à 111 lieues de 2000 toises chacune. Mais cette lame étant revêtue d'une couche d'or sur chacune de ses faces, on peut considérer les deux couches comme deux lames d'or d'une extrême ténuité, et les mettre par la pensée à la suite l'une de l'autre. De plus, la largeur de la lame étant d'environ  $\frac{1}{3}$  de millimètre ou  $\frac{1}{2}$  de ligne, on peut supposer cette largeur divisée en deux, et ainsi la quantité d'or employée équivaut à quatre lames dont chacune serait longue de 444 mille mètres. Maintenant si l'on conçoit que chacun des millimètres renfermés dans cette longueur soit divisé en huit, on aura plus de 14 billions de parties visibles dans une petite masse d'or du poids de 3 décagrammes, et qui équivaut à un cube d'or dont le côté n'aurait pas 12 millimètres ou 5 lignes  $\frac{1}{3}$  de longueur.

Cette prodigieuse extension dont l'or est susceptible, dépend de sa ductilité jointe à sa grande densité; deux qualités également précieuses pour les arts dont le but est d'appliquer ce métal sur la surface du bois, du cuivre et autres matières auxquelles il sert à la fois d'abri et d'ornement.

27. Ajoutons un exemple tiré de la substance pierreuse qui porte le nom de *mica*, et qui se prête avec une grande facilité à l'opération que nous avons appelée *division mécanique*. Nous sommes parvenus à détacher de la substance dont il s'agit une lame qui, au lieu de la couleur jaunâtre naturelle à la pierre, réfléchissait le beau bleu, ce qui était l'indice d'un extrême degré de ténuité, comme nous l'expliquerons en parlant de la lumière. Ayant calculé l'épaisseur de cette lame d'après une règle indiquée par Newton, et que nous ferons également connaître, nous l'avons trouvée égale à 43 millièmes de millimètre, ou environ 1,6 millièmes de pouce, ce qui suppose que l'on peut obtenir 23255 lames isolées, en divisant un morceau de mica de l'épaisseur d'un millimètre ou  $\frac{1}{2}$  de ligne.

28. Nous ne pouvons mieux terminer cet article, qu'en exposant une vue très sage de Newton, sur les bornes prescrites

à la division des corps, dans l'état actuel des choses. Ce grand philosophe pense que l'Être suprême, en créant la matière, l'a composée de diverses espèces de molécules élémentaires, solides, dures, invariables, dont les dimensions, les figures et les différentes qualités étaient assorties aux fins qu'il se proposait (1). Or, telle est la fixité de ces molécules, qu'aucuns procédés de l'art, et même aucune des forces existantes dans la nature, ne peuvent ni les diviser, ni les altérer, sans quoi l'essence des corps changerait avec le temps. Ainsi toutes les modifications que subissent les corps, dépendent uniquement de ce que ces molécules durables se séparent les unes des autres, et se réunissent ensuite de diverses manières pour former de nouvelles combinaisons. Ces différentes molécules sont ainsi les véritables substances simples de la Chimie; et les résultats des opérations qui les présenteraient isolées, seraient le terme des efforts de cette science qui, en attendant, considère comme simples les substances qu'elle n'est pas encore parvenue à décomposer, et place sagement la simplicité à l'endroit où s'arrête l'observation.

## II. DE L'ATTRACTION.

29. **D**ANS les actions soumises aux lois de la mécanique ordinaire, les mouvemens qui sollicitent les corps à se porter les uns vers les autres, sont dus à des agens extérieurs bien connus, qui poussent ces corps ou les tirent, de manière à diminuer leur distance respective; mais l'observation de ce qui se passe dans la nature nous offre une multitude de phénomènes, dans lesquels il suffit que deux corps soient en présence, pour qu'étant abandonnés à eux-mêmes ils s'approchent l'un de l'autre, sans qu'il existe entre eux ou autour d'eux aucune cause sensible de ce mouvement.

Plusieurs physiciens ont pensé que, dans ces circonstances,

---

(1) Optice lucis, lib. III, quæst. 31.

les corps étaient mus par des agens invisibles, qui se refusaient à tous les moyens de constater directement leur existence, et Newton lui-même n'a osé assurer que l'impulsion fût étrangère à cette classe de phénomènes (1). Mais ce grand géomètre et ceux qui ont suivi sa doctrine, ont senti que le point essentiel n'était pas de rechercher ici la nature de la cause motrice, mais d'étudier sa manière d'agir, en déduisant de certains phénomènes les lois qui la régissent, et d'employer ensuite ces lois comme principes pour expliquer ou même prévoir tous les autres phénomènes qui ont une liaison intime avec les premiers. Et parce que les choses se passent, à notre égard, comme si les corps tendaient d'eux-mêmes à se réunir, on a désigné cette sorte de tendance mutuelle par le mot d'*attraction* qui, réduit à sa vraie signification, n'exprime que le fait et non la cause.

50. Il y a aussi des circonstances où des corps séparés par un intervalle plus ou moins sensible, s'éloignent les uns des autres, sans qu'aucune cause extérieure paraisse les y déterminer, et l'on indique par le mot de *répulsion* l'effort qu'ils exercent pour se fuir mutuellement.

51. La diversité des phénomènes qui dépendent de l'attraction, a fait soudiviser cette force en deux espèces. L'une qui appartient plus particulièrement à la Physique, est la *pesanteur* ou la *gravitation*; l'autre dont la Physique partage l'étude avec la Chimie, est l'*affinité* ou l'*attraction moléculaire*.

## 1. De la Pesanteur.

52. On a donné le nom de *pesanteur* ou de *gravité*, à la force en vertu de laquelle un corps abandonné à lui-même se précipite vers la terre.

53. Les anciens philosophes ont imaginé divers systèmes pour remonter jusqu'à la cause de ce phénomène, si simple aux yeux du vulgaire, qui trouve tout naturel qu'un corps tombe

---

(1) Optice lucis, lib. III, quæst. 31.

dès qu'il n'est plus soutenu. De tous ces systèmes, le plus ingénieux et le plus séduisant a été celui de Descartes, qui faisait dépendre la chute des corps du mouvement de la matière subtile dont le tourbillon circulait autour de la terre. Toutes les parties de ce tourbillon ayant une force centrifuge qui les sollicitait à s'éloigner de la terre, déterminaient les corps à se mouvoir de haut en bas, dans une direction contraire à celle de cette force. Mais en supposant même l'existence des tourbillons, que personne n'admet plus aujourd'hui, l'explication de Descartes avait contre elle plusieurs difficultés insolubles, dont l'une consistait en ce qu'un corps placé dans le plan d'un parallèle à l'équateur, devrait descendre obliquement à la surface de la terre, vers le point de l'axe auquel répondrait le centre du parallèle dont il s'agit, au lieu que la direction de la pesanteur est partout perpendiculaire à la même surface. Ce système de Descartes a disparu devant la théorie de la *gravitation universelle*, dont le nom seul exprime l'effort sublime à l'aide duquel le génie de Newton a fait rentrer les mouvemens célestes et les plus grands phénomènes de la nature dans le domaine de la pesanteur.

### *De la différence entre la Pesanteur et le Poids.*

34. La pesanteur doit être envisagée comme agissant également à chaque instant sur chacune des molécules d'un corps. Il résulte d'abord de ce principe, que la vitesse qu'elle imprime à un corps qui tombe, ne dépend pas de la masse de ce corps; elle est, par rapport à l'ensemble de toutes les molécules du corps, la même qu'elle serait pour chaque molécule détachée de la masse. Que cette masse soit plus grande ou plus petite, il s'ensuivra seulement qu'il y a plus ou moins de molécules animées de la même vitesse; mais la vitesse commune n'en sera ni augmentée ni diminuée. Cependant nous ne voyons pas tous les corps tomber avec la même vitesse, et arriver dans des temps égaux à la surface de la terre, en les supposant partis de la même hauteur. Nous allons donner la raison de cette différence,

après que nous aurons établi la distinction qui existe entre la pesanteur d'un corps, et ce qu'on appelle proprement le *poids* de ce corps. La pesanteur se mesure, ainsi que nous venons de le dire, par la vitesse qu'elle imprime à chaque molécule d'un corps, et cette vitesse est indépendante du nombre des molécules; mais le poids d'un corps se mesure par l'effort qu'il faut faire pour soutenir ce corps et l'empêcher de tomber. Or cet effort est d'autant plus considérable, qu'il y a dans ce corps plus de molécules animées de la même vitesse; et ainsi le poids a proprement pour expression le produit de la masse par la vitesse, d'où il suit qu'il varie dans le même rapport que la masse, relativement aux corps que nous pesons, parce que ces corps sont censés être sollicités par des vitesses égales. Il est facile de concevoir maintenant pourquoi, parmi les corps abandonnés à eux-mêmes, ceux qui ont plus de masse tombent plus vite de la même hauteur, que ceux dont la masse est moins considérable. Cette différence provient de la résistance de l'air, qui est plus grande à l'égard des corps qui ont moins de masse; car si nous supposons, par exemple, deux balles de même diamètre, l'une de plomb, l'autre de liège, qui commencent à tomber en même temps, ces deux balles présentant des surfaces égales à la résistance de l'air, on aura ainsi deux résistances égales, appliquées à deux corps animés de la même vitesse initiale; d'où il suit que la résistance de l'air enlèvera à la balle de liège, qui a la plus petite quantité de mouvement, une portion plus grande de vitesse, que celle qui sera perdue dans le même temps par la balle de plomb; et la première, continuant de perdre à chaque instant plus que la seconde, se trouvera plus en retard.

35. Galilée, à qui était réservée la gloire de préparer de loin la théorie de Newton, par la découverte de la loi à laquelle est soumise l'accélération des graves; Galilée, dis-je, ayant fait tomber d'une grande hauteur différentes boules d'*or*, de *plomb*, de *cuivre*, de *porphyre*, avec une boule de *cire*, observa que tous ces corps employaient presque le même temps pour arriver à terre. La boule de *cire*, la seule qui fut sensi-

blement en retard, n'était plus qu'à quatre pouces de terre à la fin de la chute des autres corps. Galilée, considérant que cette différence était bien éloignée d'être proportionnelle à celle des poids, en conclut qu'elle dépendait uniquement de la résistance de l'air. Cette conjecture a été vérifiée depuis par des expériences directes, qui consistent à faire tomber du haut d'un tube, sous lequel on a fait le vide le plus parfait possible, des corps de différentes masses, tels que du plomb, du fer, du bois, du liège, de la plume, de la laine, etc.; et l'on a observé que tous ces corps ne laissaient apercevoir aucune différence sensible dans la durée de leur chute. Quant aux corps qui s'élèvent en l'air, tels que la fumée, on sait que leur ascension est due à ce qu'ils se trouvent spécifiquement plus légers que l'air : ils sont, à l'égard de ce fluide, ce qu'est, à l'égard de l'eau, un morceau de liège, qui, plongé dans cette eau à une certaine profondeur, et abandonné ensuite à lui-même, remonte à la surface. Le vulgaire regarde comme étant sans pesanteur tout ce qui s'élève, au lieu de tomber : ce qui a fait dire à Newton, que les poids du vulgaire étaient les excès des poids absolus des corps sur le poids de l'air. L'ascension des ballons aérostatiques au milieu de l'air est bien faite pour désabuser les partisans de cette théorie des corps sans pesanteur.

*De l'accélération du Mouvement produit par la  
Pesanteur.*

36. Nous avons vu (17) qu'un corps une fois mis en mouvement, tend de lui-même à y persévérer avec la même vitesse et suivant la même direction qu'il avait au premier instant. Mais si ce corps est mu par une force qui agisse sur lui sans interruption, et dont les actions soient égales pendant des temps égaux, sa vitesse croîtra continuellement et d'une manière uniforme.

37. De ce genre est le mouvement que produit la pesanteur dans les corps qu'elle sollicite. Pour bien concevoir la loi de l'accélération qui en résulte, supposons qu'un corps emploie

un temps fini, tel que trois ou quatre secondes, à tomber d'une certaine hauteur; nous pourrions considérer ce temps comme composé d'une infinité d'instans infiniment petits, et il faudra concevoir que dans le premier instant le mobile reçoit de la pesanteur un degré de vitesse infiniment petit; et que dans chacun des instans suivans un égal degré de vitesse s'ajoute à la vitesse précédente; en sorte que les vitesses du mobile, pendant les divers instans consécutifs de sa chute, croîtront comme les nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, etc. Il suit de là que le nombre de degrés de vitesse acquis successivement par le mobile, est toujours égal au nombre d'instans pendant lesquels a duré le mouvement, c'est-à-dire, que la vitesse croît comme le temps.

Supposons un triangle rectangle  $scb$  (Pl. I, fig. 1) divisé par des lignes  $gh$ ,  $il$ ,  $kz$ , etc., parallèles à la base  $bc$ , de manière que les parties  $sh$ ,  $hl$ ,  $ln$ , etc., de la hauteur, comprises entre ces lignes, soient égales entre elles: si l'on conçoit que ces parties représentent, par exemple, des secondes de temps,  $gh$  représentera la vitesse acquise par le mobile à la fin de la première seconde,  $il$  la vitesse acquise après deux secondes, et ainsi de suite; car les lignes  $gh$ ,  $il$ ,  $kz$  étant entre elles dans le rapport des lignes  $sh$ ,  $sl$ ,  $sn$ , etc., il en est des premières, relativement aux autres, comme des vitesses à l'égard des temps.

Si l'on suppose à présent le triangle  $scb$  sous-divisé par une infinité d'autres lignes comprises entre  $s$  et  $gh$ ,  $gh$  et  $il$ ,  $il$  et  $kz$ , etc., ces lignes, à partir du point  $s$ , représenteront les vitesses pendant les instans successifs infiniment petits qui composent les temps représentés par  $sh$ ,  $sl$ ,  $sn$ , etc.; et parce que ces vitesses ne sont autre chose que les petits espaces parcourus pendant les instans correspondans, le triangle  $sgk$  étant la somme des espaces qui répondent au temps mesuré par  $sh$ , cette somme représentera l'espace total parcouru pendant la première seconde (1); de même le triangle  $sil$  représentera

---

(1) Rien ne s'oppose à ce que l'on emploie ici la surface d'un triangle, pour représenter un espace en longueur, ou une simple dimension, en mettant, par la pensée, les uns à la suite des autres, tous les élémens dont le triangle est l'assemblage.

l'espace parcouru pendant les deux premières secondes, et ainsi des autres. Or les triangles  $sgk$ ,  $sil$ , etc., sont entre eux comme les carrés de leurs hauteurs  $sh$ ,  $sl$ , etc.; d'où nous concluons que les espaces parcourus par le mobile, depuis l'origine du mouvement, sont comme les carrés des temps employés à les parcourir. Ainsi les temps représentés par  $sh$ ,  $sl$ ,  $sn$ , etc., étant entre eux dans le rapport des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, etc., les espaces correspondans seront dans le rapport des carrés, 1, 4, 9, 16, 25, etc., de ces nombres.

D'après cela, il est facile d'avoir le rapport que suivent les espaces parcourus pendant différens temps consécutifs égaux entre eux; car si nous désignons le premier de ces espaces par l'unité, il est bien clair que les suivans seront représentés par les différences entre les termes de la suite 1, 4, 9, 16, 25, etc., qui désignent les espaces, depuis l'origine du mouvement. Donc les espaces parcourus pendant des temps égaux et consécutifs, à compter de cette même origine, seront entre eux comme les nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc., parmi lesquels tous ceux qui suivent le premier, donnent les différences dont il s'agit.

On a trouvé, par l'expérience, qu'un corps à qui l'air n'opposait pas de résistance sensible, tombait de 15 pieds  $\frac{1}{10}$ , qui reviennent à peu près à 49 décimètres, dans la première seconde de son mouvement. Cette connaissance une fois acquise, il est aisé de déterminer la hauteur dont un corps pesant est tombé pendant un nombre donné de secondes, en prenant autant de fois 49 décimètres, qu'il y a d'unités dans le carré de ce nombre de secondes.

38. Imaginons qu'au bout d'un certain temps, par exemple de celui qui est représenté par  $sh$ , la pesanteur ou la force accélératrice cesse d'agir: le corps persévérera dans son mouvement en vertu de la vitesse  $gh$ , devenue uniforme. Donc si l'on suppose qu'il continue de se mouvoir pendant un temps égal au premier, et que nous pouvons désigner par  $kl$ , l'espace qu'il décrira étant égal à la vitesse  $gh$ , prise autant de fois qu'il y a d'instans qui répondent à  $kl$ , cet espace sera comme le produit de  $gh$  par  $kl$ , lequel produit est double de la surface du

triangle  $shg$ ; d'où il suit que dans le mouvement uniformément accéléré qui résulte de la pesanteur, l'espace parcouru pendant un temps donné est la moitié de celui que le mobile est capable de décrire, avec la vitesse acquise continuée uniformément.

59. La découverte de la loi suivant laquelle la pesanteur agit sur les corps placés dans le voisinage de la terre, et que nous avons dit être due à Galilée, n'était que comme un premier pas fait à l'entrée d'une carrière immense, qu'il était réservé à Newton de parcourir. Le principe de la pesanteur est devenu entre ses mains d'une fécondité qui n'a, pour ainsi dire, d'autres bornes que celles de l'univers lui-même. Ce grand géomètre conjectura que cette force, dont l'intensité ne paraissait pas être sensiblement plus petite sur la cime des plus hautes montagnes qu'à la surface du globe, s'étendait jusqu'à la lune, et que, combinée avec le mouvement de projection de ce satellite, elle lui faisait décrire un orbe elliptique autour de la terre. La pesanteur, à cette distance, devait se trouver diminuée d'une quantité appréciable, et pour déterminer la loi de cette diminution, Newton chercha, d'après le mouvement connu de la lune dans son orbite, et d'après le rapport entre le rayon de la terre et celui de la même orbite, de quelle hauteur la lune, abandonnée à sa seule pesanteur, descendrait vers la terre, dans un instant déterminé : comparant ensuite cette hauteur avec celle qui mesure, pendant le même temps, la chute des corps près de la surface de la terre, il trouva que la loi de la pesanteur, en supposant que cette force s'étendit jusqu'à la lune, suivait la raison inverse du carré des distances. Enfin il généralisa ce résultat, en considérant le soleil comme le foyer d'une force qui se propage indéfiniment dans l'espace, et qui agit, en raison directe des masses et réciproquement au carré des distances, sur tous les corps de notre système planétaire, en même temps que ces corps exercent les uns sur les autres de semblables actions. Ce court exposé suffit pour faire entrevoir l'immensité du travail entrepris par Newton et par les illustres géomètres qui ont perfectionné sa théorie, pour déterminer les diverses modifications d'une loi si

simple en elle-même et si compliquée dans ses résultats, pour démêler l'influence mutuelle des phénomènes, et résoudre le nœud par lequel chacun des détails tient à l'ensemble.

40. L'attraction que les différens corps de la nature exercent entre eux, n'est autre chose que la somme des attractions particulières de toutes les molécules dont ces corps sont les assemblages; d'où il résulte que le principe qui a fourni à Newton comme la clef de sa théorie, si on le considère dans son plus haut degré de généralité, doit être énoncé ainsi : *Toutes les molécules de la matière s'attirent mutuellement en raison directe des masses, et inverse du carré des distances.*

41. Pour donner un nouveau développement à ce principe, que nous aurons occasion d'appliquer à divers phénomènes qui sont du ressort de la Physique, supposons, avec Newton, une enveloppe sphérique  $pnx$  (fig. 2), dont toutes les particules agissent par des attractions en raison inverse du carré des distances, sur une molécule  $m$  située en dehors à une distance quelconque. Newton a prouvé que, dans ce cas, l'attraction totale qui résulte de toutes les attractions particulières, est la même, par rapport à la molécule attirée, que si toutes les molécules attirantes se trouvaient réunies au centre  $c$  de l'enveloppe sphérique qu'elles composent (1). Car si l'on imagine qu'elles aillent toutes se placer dans ce point, les attractions de celles qui étaient plus voisines de la molécule attirée que le centre, diminueront, par une suite de l'augmentation de distance, tandis que les attractions de celles qui étaient plus éloignées de la molécule attirée que le centre, augmenteront, en vertu d'une distance plus petite (2). Or on démontre, par

(1) Princip. Mathém. L. I, prop. 71, théor. 31.

(2) Si du point  $m$  pris comme centre, et de l'intervalle  $mc$  pris comme rayon, on décrit un arc de cercle  $acv$  qui coupe la circonférence  $pnx$ , et si l'on suppose que cet arc appartienne à une seconde enveloppe sphérique, qui ait pour centre le point  $m$ , celle-ci déterminera la limite entre les points  $a, b, p, z$ , etc., qui s'éloigneront de la molécule  $m$ , et les points  $c, g, h, o$ , etc., qui s'en rapprocheront.

la Géométrie, qu'il s'établit, dans ce cas, une compensation entre les attractions qui décroissent, et celles qui prennent de l'accroissement, de manière que la somme des forces conserve sa valeur primitive.

Maintenant une sphère pouvant être considérée comme un assemblage d'enveloppes sphériques superposées, à chacune desquelles s'applique le raisonnement que nous venons de faire, il en résulte que la sphère entière, toujours dans l'hypothèse d'une attraction en raison inverse du carré de la distance, agit sur une molécule située extérieurement, comme si toute la matière de cette sphère était réunie au centre. On a appelé *centre d'action*, ce point dans lequel il faudrait supposer que toutes les particules d'un corps se trouvassent rassemblées, pour que leur action totale fût encore la même que quand elles étaient disséminées dans toute l'étendue de ce corps. Le théorème dont nous venons de donner une idée est très remarquable, en ce qu'il conduit à considérer les sphères comme de simples points pesans.

42. Quelle que soit la figure du corps qui attire la molécule  $m$ , il est visible que le centre d'action sera toujours placé dans l'intérieur de ce corps, à une distance finie de la surface; et si l'on substitue à la molécule  $m$  un nouveau corps d'une certaine étendue, les deux corps s'attireront en raison directe de leurs masses, et en raison inverse des carrés des distances entre leurs centres d'action.

43. On voit maintenant pourquoi un corps porté à la plus grande hauteur à laquelle nous puissions atteindre, n'est pas sensiblement moins attiré que s'il était placé à la surface de la terre : car l'élévation de ce corps au-dessus de la surface n'étant pas comparable au rayon terrestre, la distance entre les deux centres d'action ne se trouve augmentée que d'une quantité extrêmement petite par rapport à elle-même, et ainsi l'attraction n'a dû éprouver qu'une diminution inappréciable, par le trajet qu'a fait le corps en s'éloignant de la terre.

44. On conçoit aussi pourquoi deux corps d'un volume peu

considérable, même en les supposant librement suspendus à une petite distance réciproque, ne prennent aucun mouvement sensible l'un vers l'autre. Car ces corps n'étant que comme des points en comparaison de la terre, l'attraction que celle-ci exerce sur eux devient tellement prépondérante, qu'elle les dérobe à l'effet de leur attraction mutuelle. Si l'on représente les deux attractions par deux côtés d'un parallélogramme, dont l'un coïncide avec la ligne qui joint les centres d'action des deux corps, et l'autre avec celle qui passe par l'un de ces centres et par le centre de la terre, le rapport entre ces côtés sera si grand, que la résultante représentée par la diagonale du parallélogramme ne s'écartera qu'infiniment peu du grand côté situé sur la direction de l'attraction terrestre.

45. Ce que nous venons de dire doit s'entendre des circonstances ordinaires, dans lesquelles nous jugeons, d'après ce que nous en disent nos sens, de l'état des corps situés en présence les uns des autres. Mais le célèbre Cavendish a été conduit, par des moyens aussi précis qu'ingénieux, à saisir et à mesurer les effets de l'attraction mutuelle de ces corps, en rendant l'un d'eux susceptible, par son extrême mobilité, d'obéir à une très petite force (1).

L'appareil était le même que celui dont M. Coulomb s'est servi avec tant d'avantage, pour déterminer la loi à laquelle sont soumises les actions électriques, et que nous décrivons avec détail dans l'article relatif à l'électricité. Il nous suffira de dire ici que la pièce principale de cet appareil est un levier suspendu librement à un fil métallique, qui en se tordant, par l'effet de l'attraction ou de la répulsion qu'un corps exerce sur une des extrémités de ce levier, y fait naître un mouvement qui donne la mesure de l'une ou l'autre des forces dont il s'agit.

Dans les expériences faites par le célèbre chimiste anglais, le levier portait, à chacune de ses extrémités, un petit globe de fer ou de cuivre. On approchait de ces globes deux boules de plomb d'environ 3 décimètres, ou un pied de diamètre, dis-

---

(1) Transact. philosop. de la Société royale de Londres, année 1798.

posées de manière à ce que leurs actions conspirassent pour faire tourner, dans le même sens, les deux bras du levier. Elles se manifestèrent par un mouvement oscillatoire très sensible qu'elles imprimèrent à ce levier. M. Cavendish compara ce mouvement avec celui que la pesanteur imprime à un pendule; et, connaissant de plus la densité et le volume de chaque boule, ainsi que celui du globe terrestre, il déduisit de ces différentes données la densité moyenne de ce globe, qui se trouva être à celle de l'eau dans le rapport de 5,5 à l'unité. Ce résultat est un des plus remarquables, parmi ceux qui offrent la preuve du haut degré de perfection auquel la Physique est arrivée de nos jours, et qu'atteste surtout le succès des expériences qui, comme celle que nous venons d'exposer, exigent une précision assortie à leur délicatesse.

### *De la Pesanteur spécifique.*

46. Supposons une suite de corps de différentes natures, qui aient des volumes égaux. Si l'on pèse successivement tous ces corps à l'aide de la balance ordinaire, il faudra, pour établir l'équilibre, employer des poids plus ou moins considérables, suivant que ces mêmes corps seront plus ou moins denses. Supposons de plus, qu'ayant choisi pour terme de comparaison l'un de ces corps, par exemple le plus léger, on représente son poids par l'unité, et que l'on exprime les poids de tous les autres corps par des nombres relatifs à cette unité, on aura les rapports entre les poids des différens corps comparés à une mesure commune, ou les *pesanteurs spécifiques* de ces corps.

47. Quand même les volumes des corps dont il s'agit ne seraient pas égaux, il suffirait que l'on pût les évaluer assez exactement pour les comparer entre eux; après quoi il serait facile de ramener les résultats des différentes pesées à ce qu'elles auraient été dans le cas de l'unité de volume. Mais aucune de ces deux hypothèses n'étant admissible dans la pratique, on y a suppléé à l'aide d'un principe d'Hydrosta-

tique découvert par Archimède, à l'occasion d'un problème qu'Hiéron, roi de Syracuse, lui avait, dit-on, proposé. Ce prince, ayant ordonné à un orfèvre de fabriquer une couronne d'or pur, le soupçonna d'avoir allié à ce métal une certaine quantité d'argent, et désira qu'Archimède pût vérifier le fait sans endommager la couronne, et au cas que l'alliage existât, en déterminer la quantité. Pour donner une notion claire du principe qui a conduit ce savant célèbre à la solution du problème, concevons un corps qui, à volume égal, pèse précisément autant que l'eau. Si l'on tient ce corps suspendu à un fil que nous considérerons ici comme étant sans pesanteur, et qu'on le plonge dans l'eau, il ne faudra plus employer aucune force pour le soutenir, parce qu'il est soutenu tout entier par le liquide, qui exerce sur lui le même effort que quand il tenait en équilibre le volume d'eau dont ce corps a pris la place. Imaginons maintenant que le corps, en conservant son volume, devienne plus pesant; l'eau continuera de faire équilibre à toute la partie du poids de ce corps, qui égale le poids primitif ou celui du volume d'eau déplacé; en sorte que si l'on pèse le corps ainsi plongé, il n'y aura que l'excédant du poids primitif qui agisse sur la balance. Il suit de là (et c'est en quoi consiste le principe dont nous avons parlé) que si l'on pèse d'abord dans l'air et ensuite dans l'eau un corps respectivement plus pesant que ce liquide, il y perd une partie de son poids égale à celui du volume d'eau déplacé. On détermine, par ce moyen, le rapport entre le poids du corps et celui de l'eau, à volume égal, et ce liquide sert ainsi de mesure commune, pour comparer entre elles les pesanteurs spécifiques des différens corps.

48. La balance destinée pour les recherches de ce genre, se nomme *balance hydrostatique*. Le corps sur lequel on opère est suspendu par un crin, à un petit crochet fixé sous l'un des bassins, ce qui procure la facilité de plonger ce corps dans l'eau pour l'y peser.

49. Pour que les expériences deviennent comparables, il est nécessaire que le liquide soit toujours le même, relati-

vement à sa nature et à sa densité. On prend pour cet effet de l'eau distillée, ou, à son défaut, de l'eau de pluie, qui a sensiblement le même degré de pureté, et l'on emploie cette eau à une température donnée. Brisson, à qui nous devons une table des pesanteurs spécifiques des corps, plus étendue que toutes celles qui avaient paru jusqu'alors, a adopté la température de  $14^{\text{d}}$  du thermomètre divisé en 80 parties, qui répond à  $17^{\text{d}},5$  du thermomètre centigrade, comme moyenne dans notre climat.

Il est plus naturel de représenter par l'unité la pesanteur spécifique de l'eau, qui est le terme de comparaison auquel on rapporte les pesanteurs spécifiques des autres corps, que de la désigner par 1000 ou par 10000, ainsi qu'on le fait ordinairement. Du reste, le calcul est le même, excepté que l'on a communément une fraction décimale dans le résultat.

50. Rendons sensible, par un exemple, la marche qui doit être suivie dans la détermination de la pesanteur spécifique d'un corps. Supposons qu'une masse d'or pèse 6 décagrammes dans l'air, et que son poids, dans l'eau, ne soit plus que de 5688 centigrammes : retranchant ce second poids de 6 décagrammes ou 6000 centigrammes qui représentent le premier poids, on trouvera 312 centigrammes pour la perte que l'or a faite dans l'eau, et en même temps pour le poids d'un égal volume d'eau. On aura donc cette proportion : 312 ou le poids du volume d'eau égal à celui de l'or est à 6000, poids absolu de l'or, comme l'unité, qui représente en général la pesanteur spécifique de l'eau, est à un quatrième terme, qui donnera la pesanteur spécifique de l'or. On voit que l'opération se réduit à diviser le poids absolu par la perte dans l'eau. Le terme inconnu, pris avec quatre décimales, sera 19,2508.

51. Il est facile maintenant de concevoir comment Archimède a pu s'y prendre pour résoudre le problème dont nous avons parlé. Il n'eut besoin que de connaître le poids absolu de la couronne, sa pesanteur spécifique, celle de l'or pur, telle que nous venons de la donner, et celle de l'argent pur, qui est à peu près 10,5. Il trouva d'abord que la pesanteur

spécifique de la couronne était moindre que celle de l'or pur, ce qui seul indiquait un alliage d'argent. Ayant combiné ensuite, au moyen du calcul, les diverses données que nous venons de citer, il parvint à déterminer les quantités relatives des deux métaux que renfermait la couronne, sauf la petite différence qui devait résulter de ce que jamais le volume de l'alliage n'est tout-à-fait égal à la somme des volumes qu'avaient les métaux pris séparément.

52. L'or qui avait été regardé, pendant long-temps, comme le plus dense de tous les corps naturels, le cède, sous ce rapport, à un métal nommé *platine*, qui a été découvert en 1741, et dont la pesanteur spécifique, déterminée par le célèbre Borda, est de 20,980. Les connaissances relatives à ce genre d'observations, déjà si précieuses pour le physicien, n'offrent pas moins d'avantages au naturaliste, qui leur doit un des caractères les plus décisifs pour la distinction des minéraux. Ainsi on évitera de confondre le minéral appelé *dichroïte* (*saphir d'eau* des lapidaires) avec la variété de corindon connue sous le nom de *saphir oriental*, la pesanteur spécifique du premier n'étant que d'environ 2,8, tandis que celle du second est d'environ 4; et ici l'on est d'autant plus intéressé à éviter la méprise, que la différence des prix surpasse de beaucoup celle des pesanteurs spécifiques.

53. La construction de l'aréomètre de Fahrenheit, dont on se sert pour peser spécifiquement les liquides, est fondée sur un principe qui n'est autre chose qu'un corollaire du précédent; savoir, que dans un corps respectivement plus léger que l'eau, et qui, en conséquence, surnage en partie, le poids du volume d'eau déplacé par la partie plongée est égal au poids du corps entier. En plongeant successivement l'aréomètre dans des liquides de différentes densités, on fait varier son poids par les poids additionnels dont on le charge, de manière que le volume de la partie plongée soit constant; et on a ainsi une mesure commune qui sert à déterminer les pesanteurs spécifiques des divers liquides, rapportées à celle de l'eau distillée. Nous donnerons dans l'instant une description détaillée d'un instru-

ment du même genre que cet aréomètre, d'après laquelle on pourra s'en former une juste idée.

54. L'usage des aréomètres ordinaires dépend d'une autre application du même principe, fondée sur ce qu'un corps qui surnage en partie, s'enfonce plus profondément dans les liquides moins denses que dans ceux qui ont plus de densité. Il consiste en un tube de verre terminé en boule par sa partie inférieure, et divisé dans toute sa longueur en parties égales. Pour que cet instrument puisse se tenir dans une situation verticale lorsqu'il est plongé, on soude en-dessous de la boule dont nous avons parlé, une autre boule qui contient du mercure. Mais cet aréomètre ne peut qu'indiquer si une liqueur est plus ou moins dense que l'autre ; il ne donne pas, comme celui de Fahrenheit, le rapport entre les deux densités.

55. Nickolson a imaginé d'employer à la détermination des pesanteurs spécifiques des solides, un instrument qui a beaucoup de rapport avec ce dernier aréomètre, et qui mérite d'être connu. Il consiste dans un tube MN (*fig. 3*) de fer blanc, surmonté d'une tige B, faite d'un fil de laiton, et qui porte à son extrémité une petite cuvette A. Cette tige est marquée vers son milieu d'un trait *b* fait avec la lime. La partie inférieure tient suspendu un cône renversé EG, concave à l'endroit de sa base, et lesté en dedans avec du plomb. Le poids de l'instrument doit être tel, que quand on plonge celui-ci dans l'eau pour l'abandonner ensuite à lui-même, une partie du tube surnage. La cuvette qui termine la tige, et qui a la forme d'une calotte sphérique, y est assujétie au moyen d'un petit tube de fer blanc, dans lequel cette tige entre avec frottement. On a ordinairement une seconde cuvette plus large, que l'on place au-dessus de la première, dans la concavité de laquelle elle s'engage par sa convexité. On peut ainsi enlever à volonté cette seconde cuvette, soit pour retirer plus facilement les poids dont elle est chargée, comme nous le dirons dans un instant, soit pour faire quelque changement dans leur assortiment.

L'usage de cet instrument est facile à concevoir. On com-

mence par placer dans la cuvette supérieure les poids nécessaires pour que le trait *b*, marqué sur la tige, descende à fleur d'eau : c'est ce que nous appelons *affleurer* l'aréomètre ; et la quantité de poids dont nous venons de parler se nomme la *première charge* de l'aréomètre (1). Ayant repris cette charge, on met dans la même cuvette le corps destiné pour l'expérience, et que nous supposons toujours plus dense que l'eau, puis l'on place à côté les poids nécessaires pour produire l'affleurement. On retranche cette seconde charge de la première, et la différence donne le poids du corps dans l'air. On retire l'aréomètre, pour placer le corps dans le bassin inférieur E ; puis ayant replongé l'instrument, on ajoute de nouveaux poids dans la cuvette A, jusqu'à ce que l'affleurement ait encore lieu. Ces nouveaux poids forment, avec ceux qui étaient déjà dans la cuvette, la troisième charge de la balance. On soustrait de cette charge la seconde, et la différence donne la perte que le corps a faite de son poids dans l'eau, ou le poids du volume d'eau déplacé, après quoi on divise par ce poids celui du corps pesé dans l'air.

56. Si l'on voulait peser une substance respectivement plus légère que l'eau, il faudrait, en la plaçant dans le bassin inférieur, l'y assujétir d'une manière fixe. Dans ce cas, le corps qui sert d'attache est censé faire partie de l'aréomètre. Du reste, l'opération est la même que dans le cas précédent ; seulement, le poids du corps soumis à l'expérience, divisé par le poids du volume d'eau déplacé, donne un quotient plus petit que l'unité.

Supposons que le poids du corps étant de quatre grammes, on ait trouvé cinq grammes pour différence entre la seconde charge et la troisième ; il en résulte que le corps pèse un gramme de moins qu'il ne faut, pour que son poids représente celui du volume d'eau déplacé. Ce dernier poids étant donc de 5 grammes, on aura  $\frac{4}{5}$  ou 0,8 pour la pesanteur spécifique du corps.

57. Il y a des substances qui, étant plongées dans l'eau,

(1) Il est presque inutile d'avertir que l'usage de l'instrument est limité aux corps dont le poids dans l'air n'excède pas cette première charge.

s'imbibent de ce liquide : tel est le grès ordinaire. On s'aperçoit de cette propriété, lorsque ayant placé le corps dans le bassin inférieur E, on voit l'aréomètre descendre après être remonté, quoique la cuvette A reste chargée du même poids. Dans ce cas, on laissera le corps s'imbibir de toute la quantité d'eau qu'il peut admettre dans ses pores, et l'on jugera qu'il est parvenu à cette espèce de point de saturation, lorsque l'aréomètre restera dans une position fixe; alors on l'affleurera et l'on cherchera, à l'ordinaire, la perte que le corps a faite de son poids dans l'eau. On cherchera ensuite le poids de la quantité d'eau dont il s'est imbibé, en le pesant dans l'air le plus promptement possible, et en retranchant le premier poids du second, puis on ajoutera la différence à la perte trouvée précédemment, et le résultat donnera la véritable perte, ou celle qui aurait lieu si le corps n'était pas susceptible d'imbibition; après quoi on opérera comme il a été dit plus haut.

Supposons que le corps pèse 10 grammes avant l'imbibition, et que la quantité d'eau dont il s'est imbibé soit de 2 décigrammes; supposons de plus, que la perte qu'il a faite de son poids dans l'eau, y compris l'effet de l'imbibition, soit de  $4^{\text{gram.}},3$ ; comme les corps, à égalité de volume, perdent moins de leur poids dans l'eau, à proportion qu'ils sont plus denses, il en résulte que le corps soumis à l'expérience a perdu 2 décigrammes de moins que dans le cas où l'imbibition n'aurait pas eu lieu, puisque celle-ci équivaut à un accroissement de densité: donc il faut ajouter 2 décigrammes à la perte trouvée, qui est de  $4^{\text{gram.}},3$ ; ce qui donnera  $4^{\text{gram.}},5$  pour la perte corrigée. La pesanteur spécifique du corps, considéré comme exempt d'imbibition, sera donc de  $\frac{100}{42}$  ou de 2,2222, en se bornant à 4 décimales.

58. La double propriété qu'a le même instrument de pouvoir faire en même temps la fonction de véritable aréomètre et celle de balance hydrostatique, deviendrait utile dans le cas où l'on n'aurait à sa disposition qu'un liquide dont la densité différât sensiblement de celle de l'eau distillée, et dont la température fût de plusieurs degrés au-dessus ou au-dessous de

celle qui aurait été choisie comme terme de comparaison. Il serait facile de ramener le résultat de la pesée faite au moyen de ce liquide, à celui qu'aurait donné l'eau distillée à 14 degrés de Réaumur. Cette opération exige seulement une connaissance de plus, savoir, celle du poids absolu de l'instrument.

Supposons que ce poids soit de 152 grammes, et que le poids additionnel qui donne, à l'ordinaire, la première charge, quand on emploie l'eau distillée à 14<sup>d</sup>, soit de 20 grammes, on aura 172 grammes pour la somme de ces deux poids. Supposons maintenant que le poids qui forme la première charge avec le liquide substitué à l'eau distillée, soit de 20<sup>gram</sup>,5, la somme deviendra 172<sup>gram</sup>,5 : or la partie plongée de l'instrument étant la même de part et d'autre, il en résulte que les poids des deux liquides, à volume égal, ou, ce qui revient au même, leurs pesanteurs spécifiques, sont dans le rapport de 1720 à 1725.

Cela posé, il est d'abord évident que le liquide substitué à l'eau distillée donne immédiatement le poids absolu du corps soumis à l'expérience. Soit ce poids de 11 grammes ; on cherchera la quantité que le corps pesé dans le liquide que l'on emploie y perd de son poids, et que nous supposerons être de 4<sup>gram</sup>,7 ; mais les corps pesés dans un liquide, y perdent davantage de leur poids, à proportion que ce liquide est plus dense ; ce qui revient à dire que les pertes sont proportionnelles aux densités des liquides. Donc on aura la perte corrigée, ou celle qui aurait lieu avec l'eau distillée, à 14<sup>d</sup>, en multipliant 4<sup>gram</sup>,7, par le rapport  $\frac{1720}{1725}$  entre les pesanteurs spécifiques des deux liquides ; ce qui donne 4<sup>gram</sup>,69 pour la perte corrigée : divisant par ce nombre le poids absolu, qui est 11, on trouvera 2,5454 pour la vraie pesanteur spécifique du corps ; en ne faisant aucune correction, on aurait trouvé 2,3404.

On voit, par ces détails, que l'instrument dont il s'agit, quoique peut-être moins susceptible de précision que la balance hydrostatique ordinaire, l'emporte sur elle par l'avantage qu'il a de se prêter à des usages plus variés, d'être moins dispendieux et d'un transport plus facile.

59. Les mouvemens à l'aide desquels les poissons s'élèvent

et descendent alternativement dans l'eau, sont dus à la faculté qu'ont ces animaux de faire varier à leur gré la pesanteur spécifique de leur corps : c'est à quoi ils parviennent, au moyen d'une vessie communément double, à laquelle on a donné le nom de *vessie nataoire*, et qui est placée, pour l'ordinaire, au-dessus des viscères abdominaux. Un petit canal pneumatique, qui établit la communication entre l'arrière-bouche et la vessie, sert au poisson pour introduire dans cette espèce de sac un fluide aériforme, qui varie, par sa nature, suivant les différentes espèces de poissons (1). La vessie, dilatée par cet air, détermine, relativement à l'animal lui-même, une augmentation de volume qui le rend respectivement plus léger que l'eau, en sorte qu'il s'élève dans ce liquide, sans l'intermède des organes du mouvement; et lorsqu'il veut descendre, il n'a besoin que d'expulser assez d'air de sa vessie, pour qu'il en résulte une diminution de volume qui le rende plus pesant que le volume d'eau qu'il déplace. Quelques poissons qui sont privés du canal pneumatique, paraissent agir directement sur l'air renfermé dans leur vessie, pour le comprimer ou lui permettre de se dilater.

Des observations faites par mon savant collègue M. Geoffroy, et qu'il a bien voulu me communiquer, prouvent que dans les deux familles de poissons, nommées *diodons* et *térodons*, c'est l'estomac qui, en se gonflant et en se resserrant, suivant que le poisson y introduit de l'air ou expulse une partie de celui qui en occupait la capacité, fait réellement la fonction de vessie nataoire; en sorte que la destination de cette vessie, qui néanmoins existe toujours, est de se porter, à l'aide d'un mécanisme particulier, entre la cavité de la bouche et celle de l'estomac, pour s'opposer à la sortie de l'air, lorsque le poisson veut s'élever. Parvenu à la surface de l'eau, il continue de se

---

(1) On peut lire dans le Discours sur la nature des poissons, par M. de Lacépède, les détails intéressans dans lesquels ce célèbre naturaliste est entré sur tout ce qui concerne la vessie nataoire de ces animaux. *Hist. nat. des Poissons*, édit. in-12, t. I, p. 147 et suiv.

dilater ; et bientôt il s'établit une si grande disproportion entre le poids du dos et celui du ventre , que le premier venant à l'emporter, l'animal se renverse. Dans cette position, il flotte au gré de l'eau, en se gonflant de plus en plus, de manière que son corps, qui naturellement est d'une forme allongée, passe à celle d'un globe dont la surface, hérissée d'épines, présente de toutes parts une arme défensive redoutable aux autres poissons, qui, après avoir poussé ce globe devant eux, sont forcés d'abandonner l'attaque.

### *De la nouvelle unité de Poids.*

60. Nous ne quitterons pas cette matière, sans avoir fait connaître une opération de pesanteur spécifique également remarquable par l'importance de son objet et par la perfection des méthodes employées pour l'exécuter ; savoir, celle qui a conduit à déterminer l'unité de poids relative au nouveau système des poids et mesures. Le type commun auquel se rapportent toutes les branches de ce système, est l'unité des mesures linéaires, ou la dix-millionième partie de la distance entre l'équateur et le pôle boréal, et on lui a donné le nom de *mètre*. En comparant la grandeur de l'arc terrestre qui s'étend depuis Barcelone jusqu'à Dunkerque, telle que la donnent les opérations faites par Delambre et Méchain, avec celle de l'arc mesuré au Pérou, vers l'année 1740, on en a conclu que la distance cherchée, ou le quart du méridien situé vers le pôle boréal, était de 5150740 toises ; d'où il suit que le mètre répond à une longueur de  $0^{\text{tois}}, 515074$ , ou de 3 pieds 11 lignes  $\frac{3}{10}$  à très peu près.

61. L'unité de poids, que l'on a nommée *gramme*, est le poids absolu du cube de la centième partie du mètre, en eau distillée, prise à son *maximum* de densité. Nous verrons dans la suite, que ce *maximum* ne répond pas au terme de la congélation, mais à quelques degrés au-dessus. Ces précautions étaient nécessaires pour attacher, en quelque sorte, le résultat à un point fixe auquel on pût toujours le ramener, si l'on

répétait l'expérience. Le liquide se trouvait débarrassé, par la distillation, de toutes les particules hétérogènes qui altèrent sa pureté; en le prenant au *maximum* de densité, on avait une limite au milieu de toutes les variations de volume qui résultent du changement de température. Enfin la détermination du poids absolu, qui supposait la pesée faite dans le vide, débarrassait encore le résultat d'une quantité hétérogène et variable; savoir, la perte que le corps fait de son poids dans l'air, et que l'on néglige dans les expériences ordinaires.

62. M. Lefebvre-Gineau fut chargé de tout ce qui concernait cette opération, ou plutôt cette réunion d'opérations toutes extrêmement délicates. La précision à laquelle il se proposait d'atteindre, excluait un moyen qui, au premier aperçu, paraît fort simple, et qui consisterait à prendre un vase cubique, dont le côté eût un rapport connu avec le centième du mètre, à le peser d'abord seul, puis à le peser de nouveau, après l'avoir rempli d'eau distillée. La différence entre les poids donnerait le poids du volume d'eau employé; mais on conçoit, sans qu'il soit besoin d'entrer dans les détails, que le résultat serait affecté de diverses erreurs, qu'il eût été impossible d'éviter ou d'apprécier. On a donc adopté un autre moyen, susceptible d'une beaucoup plus grande exactitude: il consiste à peser spécifiquement dans l'eau un cylindre creux, de cuivre, dont on a auparavant comparé le volume avec celui du cube qui a pour côté le centième du mètre. L'opération fait connaître le poids du volume d'eau distillée égal à celui du cylindre, et l'on en conclut le poids du cube de la même eau qui représente l'unité cherchée. Nous espérons qu'on nous saura gré d'entrer ici dans quelques détails sur la marche que l'on a suivie pour arriver à ce résultat.

63. La machine destinée à mesurer le cylindre avait été construite avec autant de soin que d'intelligence, par Fortin, l'un des artistes les plus distingués de cette ville. Sans nous arrêter à en donner la description, il suffira de dire qu'elle rend appréciable une différence égale à un deux millième ou même à un quatre millième de ligne: cette évaluation se fait au moyen

d'un levier, dont un des bras est dix fois plus court que l'autre ; le tout est tellement disposé, que les différences réelles qu'il s'agit de déterminer, occasionnant dans le plus petit bras des mouvemens égaux à ces différences, les mouvemens du plus long bras, qui sont décuples, et qui par là deviennent sensibles au moyen d'un nonius appliqué à l'extrémité de ce bras, font connaître les deux millièmes de ligne mesurés par le jeu du bras le plus court.

Quelque attention que le même artiste eût apportée dans la fabrication du cylindre, la forme de ce solide se trouvait nécessairement affectée d'une multitude de petites inégalités qui pouvaient influencer sensiblement sur le résultat, si on les eût négligées ; car ici une erreur commise sur une seule des deux dimensions du cylindre, savoir, la hauteur et le diamètre de la base, est, pour ainsi dire, une erreur cubique, et non pas seulement une erreur linéaire, comme dans la détermination d'une simple distance. Il a fallu suivre, en quelque sorte, d'un point à l'autre, la surface du corps dans tous ses écarts, et mesurer un nombre suffisant de hauteurs et de diamètres, à différens endroits des bases et de la convexité, pour ramener la solidité du cylindre, qui était l'objet de l'opération, à celle d'un cylindre parfaitement régulier et d'un égal volume.

Cette opération terminée, on a pesé le cylindre dans l'air, en employant un procédé aussi simple qu'ingénieux, qui fait disparaître l'inconvénient occasionné par l'inégalité presque inévitable entre les bras des balances même les mieux exécutées. On place dans un des bassins le corps que l'on veut peser, et l'on charge l'autre bassin avec des poids quelconques, jusqu'à ce que le fléau soit horizontal. On retire ensuite le corps du premier bassin, et on le remplace par des poids connus, jusqu'à ce que le fléau ait repris la position horizontale. Il est évident que le poids de ce corps est représenté exactement par la somme des poids qu'on lui a substitués, quoiqu'il puisse bien arriver que cette somme diffère de celle des poids qui sont de l'autre côté, par une suite de la construction vicieuse de la balance.

La pesée du cylindre dans l'air, faite au moyen de ce procédé,

a eu de plus l'avantage de donner précisément le même résultat que si elle avait eu lieu dans le vide. D'abord les poids substitués au cylindre étant de la même matière que ce corps, leur volume égalait celui de la partie solide du cylindre ; et sous ce rapport, la perte dans l'air était aussi égale de part et d'autre. Mais de plus, on avait pratiqué à l'une des bases du cylindre une petite ouverture qui établissait une communication entre l'air intérieur et celui de l'atmosphère. Il en résulte qu'au moment de la pesée, l'air intérieur était de la même densité que celui qui avait été remplacé par le cylindre ; l'air environnant lui faisait donc équilibre, et ainsi la perte de poids était nulle à cet égard.

On a pesé ensuite le cylindre dans l'eau, et comme alors le poids qui lui faisait équilibre était seul soutenu par l'air, il a fallu tenir compte de la petite perte qu'il faisait dans ce fluide, comme n'étant plus commune au cylindre plongé dans l'eau. On a eu égard aussi à la petite augmentation de poids qu'occasionnait, par rapport au cylindre, l'air renfermé dans son intérieur. Enfin on a ramené le résultat à ce qu'il aurait été dans l'eau prise à son *maximum* de densité, et l'on a trouvé que la nouvelle unité de poids, ou le gramme, répondait à 18<sup>grains</sup>,82715 de l'ancien poids de marc.

64. Nous terminerons ce qui regarde cet objet, par un exposé succinct du système des nouvelles mesures : nous avons déjà dit (60) que l'unité des mesures linéaires où le mètre était une longueur de 3 pieds 11 lignes  $\frac{3}{10}$ . Ses sous-divisions en parties, successivement dix fois plus petites, portent les noms de *décimètre*, *centimètre*, *millimètre*, et ses multiples décimaux, ceux de *décamètre*, *hectomètre* et *kilomètre*. On a adopté le même mode de division pour toutes les autres espèces de mesures, et l'on indique les degrés de l'échelle relative à chacune d'elles, par les mêmes expressions initiales ajoutées au nom de l'unité à laquelle ils se rapportent. Il en faut excepter les divisions de l'unité monétaire, comme nous le verrons dans l'instant.

65. Pour se ménager la facilité de réduire sur-le-champ,

par approximation, une nouvelle mesure linéaire en ancienne, ou réciproquement, on peut observer que le millimètre est sensiblement égal à  $\frac{4}{9}$  de ligne du pied français, ou, ce qui revient au même, la ligne est égale à  $\frac{9}{4}$  de millimètre. Il en résulte que le pouce vaut 27 millimètres.

66. L'unité des mesures superficielles pour le terrain est un carré, dont le côté est de dix mètres; elle se nomme *are*, et vaut environ 948 pieds carrés.

67. On appelle *stère*, une mesure égale au mètre cube, et destinée particulièrement pour le bois de chauffage; elle répond à un peu plus de 29 pieds cubes.

68. L'unité des mesures de capacité est le cube du décimètre. On la nomme *litre*, et elle vaut à peu près 50 pouces cubes  $\frac{4}{10}$ . Elle surpasse de  $\frac{1}{14}$  la pinte de Paris, qui contient 46 PONCES CUBES 95.

69. Le *gramme*, ou l'unité de poids, répond, ainsi que nous l'avons dit, à près de 19 grains. Le *kilogramme*, ou le poids de mille grammes, équivaut à 2 livres, 5 gros, 55 grains. L'onçe diffère très peu de trois décagrammes, et le grain de 53 milligrammes.

70. La livre monétaire porte le nom de *franc* d'argent. Sa dixième partie s'appelle *décime*, et la centième partie, *centime*.

Il appartenait d'autant mieux à la France de voir sortir de son sein ce nouveau système de mesures qui remontent toutes à une partie déterminée de la circonférence du globe, comme à leur origine commune, que nul autre pays n'offrait une position aussi heureuse, par rapport à l'arc du méridien qui devait être mesuré; celui qui traverse la France ayant le double avantage d'être coupé par le parallèle moyen, et de reposer par ses extrémités sur les bords des deux mers. Mais ce système, dont la base est prise dans la nature et invariable comme elle, convient également à tous les peuples. Plusieurs puissances étrangères, sur l'invitation du Gouvernement français, ont envoyé des savans d'un mérite distingué, qui, réunis aux commissaires de l'Institut national, ont discuté avec eux les observations et les expériences, d'où l'on a déduit les unités fondamentales de longueur et de poids, et ont concouru ainsi, par leur zèle et

par leurs lumières, à consommer cette vaste entreprise. Jamais les sciences n'ont offert un spectacle plus digne d'elles que celui de cette société si intéressante, qui, en fournissant une nouvelle preuve que les hommes éclairés de tous les pays ne composent qu'une même famille, donnait en quelque sorte sa sanction à ce système, dont l'adoption pourrait devenir le gage d'une union plus étroite entre les nations elles-mêmes.

## 2. De l'Affinité ou de l'Attraction moléculaire.

71. L'attraction qui sollicite les corps de notre système planétaire à tendre vers le soleil, et les uns vers les autres, ne diffère pas de celle qui détermine la chute des corps placés dans le voisinage de la terre (39). Ces derniers corps ont aussi une tendance à s'approcher les uns des autres en vertu de la même force; mais l'effet en est détruit par l'attraction beaucoup plus énergique que la terre exerce sur eux (44). Si l'on suppose une série de corps dont les volumes aillent en diminuant, on est conduit par le raisonnement, à conclure que leur tendance mutuelle doit s'éloigner toujours davantage du terme où elle commencerait à être comparable avec l'attraction terrestre.

72. Cependant les molécules des corps solides, placées à l'extrémité de cette série, sont enchaînées les unes aux autres par une action puissante, et l'on sait jusqu'à quel point plusieurs de ces corps résistent aux efforts que nous faisons pour les diviser. Cette considération, jointe à d'autres dont nous parlerons dans la suite, a fait naître l'idée d'une nouvelle espèce d'attraction d'où dépendait la cohésion de ces molécules, et qui était distinguée de la pesanteur, en ce qu'elle n'agissait qu'au contact ou très près du contact, et s'évanouissait à une distance tant soit peu sensible du contact. On a donné à l'attraction dont il s'agit les noms d'*affinité* et d'*attraction moléculaire*.

73. A la rigueur, l'action de l'affinité s'étend indéfiniment autour de chaque molécule. Mais comme elle diminue avec beaucoup de rapidité, en sorte que passé une très petite di-

stance elle cesse d'être appréciable; on la regarde comme nulle à ce terme, et l'on appelle *sphère d'activité sensible*, celle dont le centre se confond avec celui de la molécule, et dont le rayon est égal à la distance dont nous avons parlé.

74. Une observation très simple peut déjà nous faire entrevoir la manière d'agir de cette force. Elle consiste en ce qu'un petit fragment séparé d'une masse de métal ou de pierre, ne résiste pas moins à l'effort de la lime, pour en détacher des particules, que quand ce fragment tenait au corps; d'où l'on voit que tout le reste de la masse n'influe en rien sur la force avec laquelle les particules du fragment adhéraient entre elles.

75. Diverses expériences intéressantes répandent un nouveau jour sur cette conséquence. Si l'on prend deux plaques de marbre ou deux glaces bien polies, et qu'on les fasse glisser l'une sur l'autre, pour qu'elles se touchent le plus exactement qu'il est possible, on observe qu'elles tiennent fortement l'une à l'autre. Chacune des deux surfaces ayant, dans ce cas, un grand nombre de points qui se mettent en contact avec les points correspondans de l'autre surface, ou n'en sont séparés que par une distance extrêmement petite, il en résulte une somme d'attraction comparable, en quelque sorte, à celle qui lie entre elles deux parties d'un même corps distinguées par un plan imaginaire. La pression de l'air environnant, à laquelle on pourrait d'abord être tenté d'attribuer l'adhérence des deux corps, ne fait autre chose qu'ajouter à l'effet de l'attraction. Car si l'on place ces deux corps dans le vide, ils continueront d'adhérer entre eux avec une force qui sera seulement diminuée d'une quantité égale à l'action de l'air. On a remarqué que les mêmes corps, après être restés pendant quelque temps en contact, opposaient plus de résistance à leur séparation que dans le premier moment. Il paraît que l'action prolongée de la force attractive sollicite les molécules à de petites oscillations, à la faveur desquelles les parties saillantes de chaque surface se placent dans les interstices de l'autre, d'où résulte un rapprochement plus intime entre les deux surfaces.

76. Si l'on étend une couche très mince de quelque matière

grasse sur les deux surfaces, avant de les appliquer l'une contre l'autre, elles adhéreront beaucoup plus fortement entre elles. Dans ce cas, les molécules grasses servent aux deux surfaces comme de lien commun, en vertu des attractions qu'elles exercent sur chacune d'elles, et ce lien est d'autant plus puissant que les molécules dont il s'agit, non-seulement se moulent, en quelque sorte, sur les endroits où les surfaces sont de niveau, mais s'insinuent dans les cavités imperceptibles qui interrompent ce niveau, et multiplient ainsi le nombre des points attirans.

Pour juger de la grande résistance que les corps dont nous venons de parler opposent à leur séparation, il faut diriger la force qui tend à produire celle-ci dans un sens perpendiculaire aux surfaces de contact. Mais si l'on fait glisser doucement les deux corps l'un sur l'autre, on parvient facilement à les séparer. Dans le premier cas, la résistance est égale à la somme des attractions réciproques de toutes les molécules en contact, en sorte que, pour opérer la séparation, il faut vaincre toutes ces attractions par un effort unique. Dans le second cas, au contraire, la séparation se fait, pour ainsi dire, en détail, par des actions successives, dont chacune ne dérobe qu'une petite partie des molécules à la force attractive.

77. La figure sphérique que prennent les gouttes d'eau et de mercure, et qui a lieu même dans le vide, offre une nouvelle preuve des effets de l'attraction moléculaire. Cette figure est d'autant plus exacte, que la goutte est plus petite, et que le plan qui la soutient agit moins sur elle par son attraction particulière. Ainsi la rosée forme sur les feuilles de certaines plantes des globules qui ne les touchent que par un point. Mais les gouttes qui se trouvent sur le verre et sur différentes pierres sont seulement hémisphériques; et comme l'attraction réciproque des molécules aqueuses est considérablement affaiblie par l'action contraire d'une autre cause que nous ferons connaître ailleurs, si la goutte qui est dans le cas dont nous venons de parler a un certain volume, la pesanteur lui fait prendre la forme d'une moitié de sphéroïde, dont le petit axe est dans une

position verticale. Si au contraire la goutte est suspendue à la surface inférieure du corps, elle s'allonge de manière que c'est le grand axe du sphéroïde qui est situé verticalement.

78. Si l'on fait avancer doucement deux gouttes d'eau ou de mercure l'une vers l'autre, jusqu'à une très petite distance, on les verra s'élancer pour se réunir en une seule. Nous aurons occasion, dans la suite, de citer beaucoup d'autres phénomènes qui dépendent de l'affinité.

Mais les effets de cette force ne se montrent nulle part d'une manière plus évidente, et à la fois plus admirable, que dans ces opérations si variées, où la Chimie met les élémens des corps, pour ainsi dire, aux prises les uns avec les autres, fait renaître ce qu'elle avait détruit, ou le transforme en un être tout nouveau, et, par des décompositions et des combinaisons successives, obtient des résultats qui sont autant d'imitations fidèles de ceux de la nature, et d'autres dont celle-ci ne lui avait pas fourni le modèle.

*De l'Équilibre entre les Affinités des principes qui  
forment les combinaisons neutres.*

Quoique le développement des phénomènes qui dépendent des actions qu'exercent les unes sur les autres les molécules élémentaires des corps n'entre pas dans notre plan, le point de vue sous lequel nous allons ici les envisager n'est pas étranger à la Physique, puisqu'il nous fait apercevoir la généralité des lois auxquelles ces phénomènes sont soumis.

79. Dans la combinaison mutuelle d'un acide avec un alkali, si l'on suppose que la quantité d'alkali, d'abord très petite, augmente progressivement par rapport à la quantité d'acide, il y aura un terme où les propriétés des deux principes disparaîtront, en sorte, par exemple, que si le sel qui résulte de la combinaison est soluble, une teinture bleue végétale, mise en contact avec la solution, ne subira aucune altération. On dit alors que la combinaison est dans *l'état neutre*.

On emploie aussi le mot de *saturation* pour indiquer le terme

où les affinités réciproques des deux principes étant satisfaites, l'un quelconque des deux n'est plus susceptible de s'unir avec une nouvelle quantité de l'autre. Or ce terme ne répond pas à celui qui constitue l'état neutre. Nous allons essayer d'éclaircir cette distinction, d'après les idées du célèbre Laplace.

Lorsqu'un acide est uni avec un alkali, on peut concevoir les molécules de l'acide comme agissant par des centres d'action (41), sur les molécules de l'alkali réunies autour d'elles, de manière à former autant de petites sphères dont les centres seraient occupés par ce même acide; et la combinaison des deux principes sera celle qui donne le point de saturation, si l'alkali est dans la proportion requise, pour que le rayon de chaque petite sphère soit égal à celui de la sphère d'affinité sensible de l'acide par rapport à l'alkali (73). On peut substituer à cette hypothèse celle où les petites sphères seraient composées de molécules d'acide et auraient leurs centres occupés par l'alkali. Pour qu'il y ait saturation, il faudra encore que le rayon de chaque petite sphère soit égal à celui de la sphère d'affinité sensible de l'alkali pour l'acide, et il est visible qu'alors les quantités relatives d'acide et d'alkali seront les mêmes que dans le cas précédent, chacune des deux hypothèses n'étant qu'une manière équivalente de concevoir les actions réciproques des deux principes qui forment la combinaison.

80. Imaginons maintenant que les centres des petites sphères étant occupés par l'alkali, on mette une teinture bleue végétale en contact avec le sel, et qu'elle reste sans altération. Les molécules colorées sont susceptibles d'agir par affinité, soit sur l'acide, soit sur l'alkali; et, puisque dans le cas présent cette affinité ne produit aucun effet, si nous nous bornons à la considérer par rapport à l'acide, nous concluons qu'elle est en équilibre avec celle que l'alkali exerce sur les parties de cet acide qui composent la couche extérieure de la petite sphère, ou celle avec laquelle les molécules bleues sont en contact. Le sel alors est dans l'état neutre, relativement à la teinture végétale; mais il ne s'ensuit pas qu'il y ait saturation; car si cela était, l'action de l'alkali sur l'acide se terminerait à la

surface de la petite sphère, et l'affinité de la couleur bleue étant libre de s'exercer, les molécules colorées passeraient au rouge, en se combinant avec une partie de l'acide.

Ainsi, lorsqu'un sel offre les caractères de l'état neutre, à l'aide d'une expérience semblable à celle que nous venons de citer, on doit concevoir que le rayon de la sphère d'affinité sensible de l'alkali pour l'acide s'étend plus loin que celui des petites sphères dont l'acide est supposé fournir la matière; en sorte que ces sphères sont susceptibles de s'accroître par l'addition d'une nouvelle couche d'acide, jusqu'à ce que les deux rayons soient devenus égaux. Il suit de là que l'état de saturation doit être considéré comme un terme absolu, au lieu que l'état neutre n'est qu'un terme relatif, qui dépend des affinités réciproques entre l'acide ou l'alkali et la substance colorante que l'on met en contact avec le sel.

Le sulfate de potasse peut servir ici d'exemple. Une solution de ce sel fait passer au rouge les teintures bleues végétales, parce que la quantité d'acide, relativement à celle d'alkali, dépasse le terme qui constitue l'état neutre, et se rapproche de la limite qui répond à la saturation. On a donné aux sels qui sont dans ce cas, le nom de *sels avec excès d'acide*, ou de *sels acidules*.

Ce que nous venons de dire d'un alkali doit s'entendre généralement de toutes les bases susceptibles de se combiner avec des acides. Il y a aussi des sels dans lesquels c'est au contraire la quantité d'alkali qui, relativement à la quantité d'acide, dépasse le point d'où dépend l'état neutre, en sorte que leur action verdit les teintures bleues végétales. Ces sels sont appelés par les chimistes, *sels avec excès d'alkali*, ou *sels alkalinules*. De ce nombre sont le borate de soude, vulgairement *borax*, et le carbonate de soude.

81. Cette manière de représenter les résultats des combinaisons produites par les acides et les alkalis, conduit à expliquer ce qui arrive à deux sels neutres qui, mêlés l'un avec l'autre, échangent leurs bases, en sorte que les nouveaux produits qui naissent de cette opération sont encore dans l'état neutre. L'ac-

cord qui existe, à cet égard, entre la théorie et l'expérience, sert à dévoiler une propriété très remarquable de l'affinité, savoir, que la loi à laquelle son action est soumise, à raison de la distance, est la même pour tous les corps, en sorte que les différences entre les actions de ces corps ne dépendent que de l'intensité plus ou moins grande de l'affinité particulière à chacun d'eux.

Pour éclaircir ceci par un exemple très simple, imaginons une particule d'acide sulfurique logée au centre d'une petite sphère composée d'un alkali quelconque, de manière qu'il y ait saturation, et désignons par  $a$  la quantité de cet alkali. Substituons maintenant l'acide hydrochlorique à l'acide sulfurique, et supposons que l'action du premier soit une fois moins intense que celle du second. Pour que l'acide hydrochlorique sature la même quantité  $a$  d'alkali, il faudra, dans l'hypothèse où la loi relative à la distance serait la même de part et d'autre, que la particule de cet acide, placée au centre de la petite sphère, ait une masse double de celle de la particule d'acide sulfurique qu'elle a remplacée. Supposons, d'un autre côté, que cette dernière particule soit capable de saturer une quantité de chaux égale à  $2a$ . Nous en concluons qu'il faut la même quantité  $2a$  de chaux, pour saturer la particule d'acide hydrochlorique. Car, puisque l'acide sulfurique est capable d'agir jusqu'à saturation sur deux sphères composées l'une de  $a$  d'alkali et l'autre de  $2a$  de chaux, et que l'acide hydrochlorique est dans la proportion requise pour saturer la sphère composée de  $a$  d'alkali, il faudra bien que son action sur la sphère composée de  $2a$  de chaux, atteigne encore le terme de la saturation, par une suite de ce que la fonction de la distance étant la même de part et d'autre, les limites de l'action sont aussi les mêmes.

On peut supposer que la quantité  $a$  d'alkali et la quantité  $2a$  de chaux, inférieures à celle qu'exige la saturation, soient seulement suffisantes pour amener, par exemple, l'acide sulfurique à l'état neutre; dans ce cas, l'union des mêmes quantités avec l'acide hydrochlorique déterminera encore l'état neutre dans un égal degré, c'est-à-dire que les rayons des petites sphères,

dont on suppose les centres occupés par les deux acides, différeront de la même quantité avec les rayons des sphères d'activité sensible des mêmes acides sur l'alkali et sur la chaux.

D'après cette théorie, si l'on mêle ensemble deux sels neutres, qui aient les conditions nécessaires pour faire échange de leurs bases (1), comme cela a lieu par rapport à l'hydrochlorate de baryte et au sulfate de soude, les nouveaux sels qui résulteront de ce mélange, et qui seront, dans le cas présent, le sulfate de baryte et l'hydrochlorate de soude, se trouveront à leur tour dans l'état neutre. Car si les deux premiers sels sont dans un tel rapport, que la quantité de baryte, par exemple, renfermée dans l'hydrochlorate de baryte, soit celle qui est requise pour neutraliser la quantité d'acide sulfurique que contient l'autre sel, la quantité de soude renfermée dans ce dernier, sera aussi celle qui est capable de neutraliser la quantité d'acide hydrochlorique que contient l'hydrochlorate de baryte. Si au contraire un des deux sels, tel que le sulfate de soude, est en trop grande proportion, il ne s'en décomposera que la partie nécessaire, pour que les produits de l'opération atteignent le degré qui répond à l'état neutre. Le surplus restera comme étranger à la combinaison, en conservant son état primitif, sans qu'aucune portion d'acide ou de base soit mise en liberté.

82. On avait déjà observé cette corrélation entre les affinités, dans le mélange de différens sels neutres. Mais les quantités respectives de base et d'acide que plusieurs chimistes avaient assignées pour les mêmes sels, ne s'accordaient pas avec celles qu'exigeait la permanence de l'état neutre; ainsi que l'a prouvé, dans une discussion lumineuse, M. Guyton, qui en a conclu que ces quantités n'étaient pas exactes (2).

---

(1) Statique chimique, t. I, p. 94 et suiv.

(2) Mémoires de l'Institut national, Sciences mathém. et phys., t. II, p. 326 et suiv. Voyez aussi, dans la Statique chimique, t. I, p. 134, les résultats d'un travail entrepris par Richter, antérieurement à celui de Guyton, dans la vue de déterminer le véritable rapport entre les quantités de base et d'acide que renferment les sels les plus connus.

Les recherches faites depuis par M. Berthollet, ont servi à vérifier de plus en plus l'existence des lois que nous avons exposées, et qui ne sont autre chose que des inductions de la belle théorie que ce savant chimiste a donnée sur les affinités (1). Voici une partie des résultats qu'il a bien voulu nous communiquer. Si on mêle une solution de nitrate ou d'acétate de baryte qui soit parfaitement neutre, avec une solution de sulfate de potasse ou d'ammoniaque, qui soit neutre dans un égal degré, l'échange de base qui se fait entre les deux sels employés, détermine un précipité de sulfate de baryte, et le sel qui reste en solution est encore dans un état parfaitement neutre. Le même effet a lieu lorsqu'on mêle de l'hydrochlorate ou du nitrate de chaux avec du sulfite de potasse ou de soude, auquel cas il se précipite du sulfite de chaux; ou lorsqu'on mêle du sulfate de magnésie avec de l'hydrochlorate ou du nitrate de baryte ou de strontiane; c'est alors le sulfate de baryte ou de strontiane qui se précipite. La même propriété s'étend aux sels métalliques qui peuvent être amenés à l'état neutre; ainsi le mélange du nitrate d'argent avec l'hydrochlorate de potasse ou de soude détermine un précipité d'hydrochlorate d'argent, et tout reste comme auparavant dans l'état neutre.

### *Comparaison de l'Affinité avec la Pesanteur.*

85. Il était naturel de regarder cette attraction, qui ne se manifeste que dans le voisinage du contact, comme étant entièrement indépendante de la pesanteur, dont l'action franchit les intervalles immenses qui séparent les corps célestes. Aussi un grand nombre de physiciens, à la tête desquels se trouve Newton lui-même, ont-ils pensé que l'affinité devait être soumise à une loi plus rapide que celle de la raison inverse du carré des distances, et que peut-être elle suivait la raison inverse du cube.

---

(1) Statique chimique, t. I. Mémoires de l'Institut, Sciences mathém. et phys., t. III, p. 1 et suiv.

84. Pour mieux concevoir la différence qui, d'après cette opinion, existerait entre les effets des deux attractions, reprenons la considération d'un corps sphérique  $pnx$  (fig. 2), dont toutes les particules agissent par des attractions en raison inverse du carré des distances, sur une molécule  $m$  située à une distance quelconque. Nous avons vu (41) que l'attraction totale qui résulte ici de toutes les attractions particulières est la même, à l'égard de la molécule  $m$ , que si toute la matière de la sphère se trouvait réunie au centre.

Or, dans l'hypothèse actuelle, il n'arrivera jamais que l'attraction au contact soit infinie, relativement à celle qui avait lieu avant le contact; car le rayon de la sphère, qui mesure la distance au centre d'action dans le premier cas, sera toujours en rapport fini avec la distance qui a lieu hors du contact, et ainsi les attractions elles-mêmes seront comparables (1).

85. Supposons maintenant une autre sphère  $pnx$  (fig. 4), composée de particules qui agissent en raison inverse du cube des distances, sur une molécule  $m$ , située extérieurement à une distance sensible, et concevons de nouveau que toutes les particules attirantes aillent se réunir au centre  $c$ . Dans ce cas, les attractions des particules qui s'éloigneront de la molécule  $m$ , diminueront, en général, dans un plus grand rapport que celui suivant lequel augmenteront les attractions des particules qui se rapprocheront de la même molécule  $m$ . Donc la perte n'étant pas compensée par l'avantage, l'attraction totale des particules réunies en  $c$  sera devenue plus faible que quand elles agissaient de tous les points de la sphère. Donc, pour rétablir l'égalité d'attraction, il faudra supposer que le centre d'action soit situé quelque part en  $c'$ , entre le centre  $c$  et la surface de la sphère.

Plaçons la molécule attirée plus près de cette même surface, comme en  $m'$ . Alors, pendant le mouvement des particules de la sphère vers le centre, les attractions décroissantes perdront encore davantage, en comparaison de ce que gagneront les

(1) Newtonis, Princip. mathem., propos. 81, theor. 41, exempl. 2.

attractions croissantes, que dans le cas où la molécule attirée était en  $m$ ; d'où l'on voit que le centre d'action se trouvera quelque part en  $c''$ , toujours plus près de la surface. Ainsi, à mesure que la distance diminue entre la molécule attirée et la surface de la sphère, le centre d'action, de son côté, au lieu de rester fixe, comme dans l'hypothèse précédente, s'avance continuellement vers cette surface, et l'attraction s'accroît par une progression dont la limite, qui a lieu au contact, est l'infini; d'où il suit qu'elle est alors infiniment plus grande qu'à une distance appréciable du contact : à plus forte raison la même chose aura-t-elle lieu, si l'on suppose que l'attraction diminue dans un rapport plus grand que celui de la raison inverse du cube. Ces résultats, qui étaient conformes à l'observation de ce qui se passe dans les phénomènes offerts par les molécules élémentaires des corps, semblaient indiquer une ligne de séparation entre la force qui sollicite ces molécules et celle qui régit les grandes masses de notre système planétaire.

86. Il y aurait cependant une manière de concilier les actions de ces deux forces, en adoptant une idée très heureuse de M. de Laplace, qui consiste à supposer que les distances entre les molécules d'un corps soient incomparablement plus grandes que les diamètres de ces molécules, de manière que la densité de chaque molécule surpasse de beaucoup la densité moyenne de l'ensemble, ou celle qui aurait lieu si toute la matière des molécules était distribuée uniformément dans l'intérieur du corps. Suivant cette hypothèse, le contact donnerait une grande supériorité à la molécule attirante située dans ce même point, sur l'attraction à une distance finie du contact, conformément à l'observation; et la scène des affinités rentrerait ainsi sous la dépendance de l'attraction planétaire. Plusieurs phénomènes, entre autres l'extrême facilité avec laquelle les rayons de la lumière traversent les corps dans toutes les directions imaginables, semblent être favorables à cette hypothèse. Les diversités que présentent les résultats de l'affinité dépendraient alors de la forme des molécules élémentaires. Mais nous sommes encore loin d'avoir acquis les connaissances

nécessaires, pour être en état d'appliquer le calcul aux actions intimes que les corps mus par l'affinité exercent les uns sur les autres, et de manier cette branche délicate de Physique avec l'instrument dont Newton et ses successeurs se sont servis pour élever la théorie des phénomènes célestes à un si haut degré de perfection.

*De quelques Propriétés des Corps solides, qui ont du rapport avec l'Affinité.*

De la Dureté.

87. La dureté est la résistance qu'un corps oppose à la séparation de ses molécules : cette propriété dépend de la force de cohésion, jointe à l'arrangement des molécules, à leur figure et aux autres circonstances. Un corps est censé plus dur, à proportion qu'il résiste davantage au frottement d'un autre corps dur, tel qu'une lime d'acier, ou qu'il est plus susceptible d'attaquer tel autre corps sur lequel on le passe lui-même avec frottement. Les lapidaires jugent de la dureté des pierres fines et autres corps qui sont les objets de leur art, d'après la difficulté qu'ils éprouvent à les user, en les présentant à l'action de la meule.

88. Le diamant est le plus dur de tous les corps connus. Les facettes artificielles qui font ressortir la vivacité de ses reflets, sont l'ouvrage du diamant même, et ce n'est qu'à l'aide de sa propre poussière que l'on parvient à l'user et à le tailler.

89. Nous avons indiqué le frottement plutôt que la percussion, comme étant, en quelque sorte, la mesure de la dureté des corps, parce que la résistance que ceux-ci opposent à la première de ces forces, n'annonce pas toujours celle qu'ils sont capables d'opposer à la seconde. Ainsi le verre, quoique plus dur que le bois, cède plus facilement que lui à la percussion. Le diamant même se divise par l'effort du marteau, tandis que d'autres corps restent entiers dans le même cas. Cette faculté qu'ont certains corps de se prêter plus ou moins à l'effet de

la percussion, pour les briser, a été désignée sous le nom de *fragilité*; d'où il suit qu'il ne faut pas confondre les corps *fragiles* avec les corps *tendres*, qui sont en opposition avec les corps *durs*. Il n'est peut-être point de corps dont la fragilité contraste plus fortement avec sa dureté, qu'une pierre verdâtre transparente, et très sensiblement lamelleuse, qui se trouve au Pérou, et à laquelle on a donné le nom d'*euclase*. Après qu'elle a cédé, avec beaucoup de difficulté, aux efforts que l'on a faits pour l'user, on est surpris de la voir se séparer en éclats, par l'effet d'une assez légère pression.

### De l'Élasticité et de la Ductilité.

90. L'action d'un corps sur un autre peut être telle, qu'il n'en résulte point l'entière séparation des parties de celui-ci, mais un simple déplacement de ses molécules, dont l'effet est de faire varier sa figure ou même son volume. On appelle en général *compressibles*, les corps susceptibles de changer de figure par l'action d'une cause extérieure, et les résultats de ce genre d'action donnent naissance à un nouvel ordre de phénomènes qui se sous-divisent en deux classes : dans l'une, le corps qui a subi le changement a la propriété de revenir de lui-même à sa figure naturelle, dès que la cause qui avait dérangé ses parties cesse d'agir sur lui. Ainsi une lame d'acier que l'on a courbée, se redresse aussitôt qu'on l'abandonne à elle-même. Cette propriété a été nommée *élasticité*, et l'on appelle *élastiques* les corps qui en sont pourvus. Dans l'autre classe, le corps conserve la nouvelle figure qu'il a été forcé de prendre. Ainsi l'inflexion qu'a subie une lame de plomb persévère, lorsque rien n'agit plus sur cette lame. Nous allons donner quelques détails sur ces deux classes de phénomènes.

91. Le retour des corps élastiques à leur forme naturelle ne se fait pas brusquement, et par un mouvement unique en sens contraire de celui qui a produit le changement de forme; mais les molécules de ces corps font des vibrations qui les transportent successivement au-delà et en-deçà de leurs pre-

nières positions, et qui vont toujours en diminuant, jusqu'à ce que les molécules aient repris ces positions.

Les vibrations dont il s'agit se montrent surtout d'une manière très marquée dans les cordes de plusieurs instrumens de musique, ainsi que nous l'expliquerons en parlant du son. Elles sont encore très apparentes dans une lame d'acier fixée par une extrémité, et que l'on courbe en appuyant sur l'extrémité opposée, pour la laisser ensuite jouer en liberté.

92. Le choc d'un corps dur produit des effets analogues sur un globe d'ivoire, quoiqu'ils s'opèrent avec une rapidité qui les rend inappréciables pour nos sens, et que le changement même de figure que subit le globe ne puisse être aperçu; mais on parvient à le rendre sensible en laissant tomber le globe sur une tablette de marbre noir bien unie, et enduite d'une légère couche d'huile. Lorsqu'ensuite on regarde obliquement cette tablette, on voit, à l'endroit du contact, une tache ronde, dont le diamètre est plus ou moins considérable, suivant la hauteur d'où le globe est tombé. Or il est évident que ce corps, en conservant sa figure, n'aurait pu toucher la table que par un point; et quoique le marbre, de son côté, puisse éprouver une dépression, et se rétablir aussitôt, il n'est pas douteux que le globe lui-même ne contribue pour beaucoup à la formation de la tache par son changement de figure; en sorte que cette expérience offre une double preuve de l'effet que nous considérons.

93. Voici maintenant de quelle manière on doit concevoir le rétablissement de figure qui se fait dans le globe par une gradation imperceptible et presque instantanée: au moment du choc, les parties les plus voisines du contact sont refoulées vers le centre, tandis que les parties les plus éloignées s'avancent par un mouvement contraire; d'où il suit que le globe prend une forme aplatie dans le sens de son axe vertical, et allongée dans le sens de son axe horizontal. Lorsqu'ensuite le débandement commence, il se fait un nouveau changement de figure opposé au premier, en sorte que le globe s'allonge dans le sens de l'axe vertical, et les deux changemens de figure

continuent de se succéder, en passant par des degrés décroissans, jusqu'à ce que le corps se trouve ramené à la forme globuleuse qu'il avait avant le choc.

C'est en conséquence du débandement qui suit le choc, que le globe, après avoir frappé la table de marbre, rejait en remontant vers le point d'où on l'a laissé tomber. Lorsque deux corps élastiques se choquent, le débandement leur imprime des vitesses en sens contraire du mouvement qui les avait portés l'un vers l'autre. Les géomètres ont représenté par des formules les rapports de ces vitesses dans les différens cas auxquels s'étend le phénomène.

94. Il existe un certain nombre de corps qui sont en même temps très durs et très élastiques, en sorte que les deux qualités paraissent avoir beaucoup de rapports entre elles. On sait à quel point l'une et l'autre s'accroissent dans l'acier, par l'opération de la trempe.

95. La plupart des physiciens qui ont essayé de donner une théorie de l'élasticité, ont surtout considéré que quand on bande un corps élastique, par exemple un arc, les particules situées du côté convexe s'éloignent les unes des autres, tandis que celles qui sont du côté concave se rapprochent. Mais de toutes les causes dont on a fait dépendre le rétablissement du corps dans son premier état, telles que l'attraction, la résistance d'une matière subtile particulière, disséminée entre les molécules du corps, l'action du calorique, il n'en est aucune qui conduise à une explication satisfaisante du phénomène.

96. C'est à l'élasticité que nous devons une grande partie des services que nous rend le fer converti en acier et travaillé par les arts. C'est d'elle qu'empruntent leur force les ressorts en spirale qui animent les montres et autres machines destinées à nous donner la mesure du temps. Mais ici l'affaiblissement du ressort, pendant qu'il se débande, deviendrait une cause de retard, relativement à un mouvement dont l'essence consiste dans son uniformité. Pour obvier à cet inconvénient, on donne à la fusée sur laquelle est enveloppée la chaîne tirée par le

ressort, la forme d'un cône tronqué, dans lequel le rapport entre les diamètres des cercles parallèles aux bases est combiné avec les variations de la force motrice. Dans le premier moment où cette force jouit de toute son intensité, la partie de la chaîne qu'elle tire repose sur la spire la plus étroite de la fusée, et à mesure qu'ensuite le ressort s'affaiblit, les spires auxquelles répondent les parties de la chaîne qui se développent, vont en s'élargissant. Ainsi, d'une part, le bras de levier sur lequel agit la résistance du rouage, reste le même, puisqu'il n'est autre chose que le rayon de la roue de fusée, dont le mouvement se communique de proche en proche jusqu'aux aiguilles. D'une autre part, le bras de levier sur lequel s'exerce la puissance du moteur, à l'endroit qu'abandonne la chaîne en se développant, s'allonge continuellement; en sorte que la puissance motrice regagne, à chaque instant, par cet allongement, ce qu'elle perd en intensité, et tout marche comme si les deux bras de levier étaient parfaitement égaux. Toute la Mécanique est pleine d'applications également intéressantes et ingénieuses de la force de ressort : c'est à elle qu'obéissent les pièces qui déterminent, en un clin-d'œil, l'explosion des armes à feu portatives, les lames flexibles qui amollissent le mouvement des voitures, et les rendent d'un usage si commode, et les cordes de différens instrumens, dont les vibrations, combinées avec celles de l'air, diversifient les plaisirs de l'oreille.

97. Il n'est point de corps dont l'élasticité soit parfaite, et peut-être n'en est-il aucun qui soit entièrement dépourvu de cette qualité. Mais ici, comme par rapport à un grand nombre d'autres phénomènes, nous nous arrêtons à la limite où une qualité cesse d'être appréciable, et nous regardons comme non élastiques les corps qui, après avoir été comprimés et forcés de changer de figure, restent dans le même état, et ceux qui résistent absolument à la compression.

98. On a donné le nom de *ductilité* à la facilité qu'ont les premiers corps, et particulièrement certains métaux, de s'aplatir par la pression ou par la percussion, de manière à conserver la figure qu'ils ont prise en vertu de l'une de ces deux

forces. Les molécules, dans ce cas, glissent les unes sur les autres, en sorte que les points de contact, quoique déplacés, restent toujours à des distances assez petites pour que l'adhérence continue d'avoir lieu.

99. En comparant l'élasticité, la ductilité et la dureté dans les six métaux les plus connus, on trouve que l'ordre des élasticités suit celui des duretés; et telle est la succession de ces métaux, en commençant par celui qui possède les deux qualités au plus haut degré, *fer, cuivre, argent, or, étain et plomb*. Les ductilités, relativement aux quatre premiers métaux, suivent une marche inverse de celle des autres propriétés, en sorte que l'ordre est celui-ci : *or, argent, cuivre et fer*. Mais l'étain tient le cinquième rang, et le plomb le sixième, relativement aux trois propriétés à la fois; en sorte que ces deux métaux sont les plus tendres, les moins élastiques et les moins ductiles de tous. C'est que le défaut de jeu nécessaire entre les molécules, pour produire la ductilité, peut provenir également et de la grande force d'adhérence qui a lieu dans les corps durs, et de la facilité avec laquelle cette adhérence peut être totalement rompue dans les corps tendres.

100. Il y a des corps qui sont ductiles à chaud et à froid : de ce nombre sont encore les métaux; quelques-uns, tels que le verre, acquièrent de la ductilité par la chaleur; d'autres enfin, tels que l'argile, deviennent ductiles par l'interposition d'un liquide entre leurs molécules.

101. La ductilité, qui est une qualité précieuse dans les métaux, quand il s'agit de les étendre et de les appliquer sur la surface des corps, ce qui a lieu surtout par rapport à l'or, le plus ductile de tous, devient, au contraire, un inconvénient lorsqu'on les emploie en masse; et les ouvrages faits avec ces métaux, façonnés dans leur état naturel, n'auraient pas assez de consistance, et seraient sujets à se déformer et à perdre le fini que la main de l'art leur a donné. On y remédie en alliant avec le métal que l'on emploie, un autre métal dont les molécules interposées entre les siennes, en diminuent le jeu, et les lient plus fortement les unes aux autres. Au moyen de ces

alliages, les arts parviennent à rendre les métaux plus durs ou plus sonores; ils en modifient à leur gré les propriétés, et les transforment en d'autres métaux intermédiaires, dont la diversité est assortie à celle de nos usages.

102. On dit d'un corps qu'il est *mou*, lorsque ses parties cèdent facilement à la pression, en conservant néanmoins une certaine adhérence entre elles. L'effet de cette pression persiste dans plusieurs corps, sans être suivie d'un retour vers la forme que ces corps avaient primitivement, et alors on peut considérer la mollesse comme n'étant qu'un haut degré de ductilité. Ce cas est celui de l'argile humectée d'eau, que nous avons déjà prise pour exemple. Mais le terme de *mollesse* a une plus grande extension que celui de *ductilité*, en ce qu'il y a des corps mous qui sont en même temps élastiques. Tel est le caoutchouc, que l'on a nommé aussi, pour cette raison, *gomme élastique*.

### *De la Cristallisation.*

103. L'action de l'affinité sur les molécules de la matière n'a été considérée jusqu'ici que comme le moyen employé par la nature pour composer des masses d'un volume plus ou moins sensible. Du reste, nous n'avons supposé ces molécules soumises, dans leur réunion, à d'autre condition que celle de se mettre presque en contact les unes avec les autres, et nous avons fait abstraction de l'influence que leurs formes particulières et leurs positions respectives pouvaient avoir sur la structure et sur la configuration des masses. Nous avons maintenant à parler d'un des résultats les plus remarquables de cette même affinité, qui consiste dans l'arrangement régulier des molécules de certains corps, sous un aspect géométrique.

C'est à la Chimie qu'appartient le développement des circonstances qui déterminent ce phénomène, où les molécules, séparées d'abord les unes des autres par l'interposition d'un liquide, se rapprochent ensuite, et se réunissent en vertu de leurs attractions mutuelles, à mesure que les molécules du liquide les

abandonnent en s'évaporant, ou par une cause quelconque. On a donné à cette opération le nom de *cristallisation*, et celui de *cristaux* aux corps réguliers qui en sont les produits.

La formation des sels, qui a lieu tous les jours sous nos yeux, par l'intermède des dissolvans qu'emploie le chimiste, n'est autre chose qu'une imitation de ce qui se passe dans l'immense laboratoire de la nature, et de la manière dont s'est opérée la production de tous ces cristaux de différentes espèces qui tapissent certaines cavités du globe, ou qui se trouvent engagés dans certaines terres.

104. Ici se présente une différence très marquée entre les minéraux et les êtres organiques. Le végétal, par exemple, tire son origine d'un germe que la nutrition développe, en lui conservant sa forme, et l'empreinte de cette forme se transmet ensuite, par la voie de la reproduction, aux individus dont la succession propage l'espèce. Tous ont leurs fleurs composées de parties égales en nombre, et semblables par leur figure et par leur arrangement; les mêmes rapports existent dans les positions respectives des feuilles, dans leurs contours arrondis ou anguleux, unis ou dentelés. Les diversités ne tiennent qu'à des nuances légères et fugitives, en sorte qu'on peut dire que qui a vu un individu, a vu l'espèce entière.

Mais le minéral n'est qu'un assemblage de molécules similaires, réunies par l'affinité; son accroissement se fait par la juxtaposition de nouvelles molécules qui s'appliquent à sa surface, et sa configuration, qui dépend uniquement de l'arrangement des molécules, peut varier par l'effet de diverses circonstances. De là cette multitude de formes différentes, et en même temps régulières et bien prononcées, qu'affectent souvent les cristaux d'une même substance. Ainsi la combinaison de la chaux avec l'acide carbonique, ou la chaux carbonatée, présente tantôt la forme d'un rhomboïde, c'est-à-dire, d'un parallélepède terminé par six rhombes égaux et semblables, tantôt celle d'un prisme hexaèdre régulier; ici c'est un dodécaèdre terminé par douze triangles scalènes; ailleurs c'est encore un dodécaèdre, mais dont les faces sont des pentagones, etc.

105. Toutes ces différentes formes qu'un même minéral est susceptible de prendre, et qui s'éloignent quelquefois totalement les unes des autres par leur aspect, se tiennent cependant par un lien commun, et quoiqu'il ne nous ait pas encore été donné jusqu'ici de dévoiler les lois auxquelles l'Être suprême a soumis les forces qui les produisent, nous connaissons du moins celles que suivent, dans leur arrangement, les molécules qui concourent à les déterminer. Nous allons exposer succinctement la théorie de ces lois, dont la considération est du ressort de la Physique.

### Des Formes primitives des Cristaux.

106. On avait remarqué depuis long-temps qu'un grand nombre de minéraux, surtout parmi ceux qui ont des formes régulières, sont composés de lames susceptibles d'être séparées les unes des autres, en sorte que les fragmens détachés de ces corps par la percussion, ont leurs faces planes, lisses, et plus ou moins éclatantes.

107. Nous avons donné le nom de *division mécanique* à l'opération par laquelle on parvient à faire ainsi l'anatomie d'un cristal, en saisissant, à l'aide d'un instrument tranchant, tel qu'une lame d'acier, les joints naturels de ses lames composantes; et cette opération, exécutée sur tous les minéraux qui s'y prêtent, conduit à un résultat général, qui est comme la clef de la théorie des lois relatives à leur structure. Il consiste en ce que, si l'on divise les différens cristaux originaires d'une même substance par des coupes qui se correspondent sur toutes les parties semblablement situées, on parvient à en extraire un solide régulier, qui est constant pour tous ces cristaux, même pour ceux dont les formes contrastent le plus fortement. Deux ou trois exemples suffiront pour faire concevoir ce résultat.

108. Soit  $abef$  (*fig. 5*), le prisme hexaèdre régulier, qui est une des variétés de la chaux carbonatée; on trouvera que parmi les six arêtes  $in$ ,  $nc$ ,  $cb$ , etc., de la base supérieure, il y en a trois qui se prêtent à la division mécanique. Soit  $in$

une de ces dernières arêtes ; la division mécanique se fera suivant un plan *psut*, incliné de  $135^{\text{d}}$ , tant sur la base *abcnih*, que sur le pan *inéf*. Les deux arêtes *bc*, *ah*, admettront des divisions analogues à la précédente, sans qu'il soit possible d'en opérer de semblables sur les trois arêtes intermédiaires *cn*, *ab*, *ih*.

Ce sera tout le contraire par rapport à la base inférieure *gfedrk*; car les arêtes de cette base qui admettront des divisions, seront opposées aux arêtes non divisibles de l'autre base; c'est-à-dire, que ce seront les arêtes *dc*, *gf*, *kr*. Le plan *lqyz* représente la section faite sur cette dernière arête. On aura donc six plans mis à découvert par les sections; et si l'on continue de diviser toujours parallèlement à ces sections, jusqu'à ce que toutes les faces du prisme hexaèdre aient disparu, on arrivera à un rhomboïde, qui en est comme le noyau, et que la figure représente sous son rapport de position avec ce prisme. Le grand angle EAI de l'une quelconque des faces de ce rhomboïde, tel que le donne le calcul, est de  $101^{\text{d}} 32' 15''$  (1).

Tout autre cristal de la même espèce, divisé mécaniquement, donnera un résultat analogue. Il ne s'agit que de trouver le sens des coupes qui mènent au rhomboïde central. Ainsi, pour obtenir tout d'un coup le noyau du dodécaèdre à triangles scalènes (*fig. 6*), on fera passer un premier plan par les deux lignes EO, OI, un second par les lignes IK, KC, un troisième par les lignes GH, HE, et déjà la moitié supérieure du noyau se trouvera à découvert; trois autres sections faites l'une sur les lignes OI, IK, l'autre sur les lignes KC, GH, la dernière sur les lignes HE, EO, achèveront de dégager le noyau. Voyez la *figure 7*, qui représente ce noyau inscrit dans le dodécaèdre.

109. Parmi les variétés de la même substance, on observe plusieurs rhomboïdes très différens du noyau par la mesure de leurs angles. Mais chacun de ces rhomboïdes en renferme un

---

(1) Nous avons inséré, dans le *Traité de Cristallographie*, un article spécialement destiné à motiver le rapport dont cette mesure a été déduite.

autre qui est encore semblable au noyau. Par exemple, le rhomboïde que l'on voit *fig.* 8, et dans lequel l'angle du sommet est aigu, et a pour mesure  $75^{\text{d}} 31' 20''$ , se sous-divise par des plans qui interceptent les arêtes terminales; savoir, d'une part *ns*, *us*, *ts*, et d'une autre part *n's'*, *u's'*, *t's'*, en faisant des angles égaux avec les faces qu'ils entament. Le résultat est le rhomboïde obtus *AA'*, qui a les mêmes angles que celui qu'on retire du prisme hexaèdre régulier, et qui est tellement situé à l'égard du rhomboïde circonscrit, que ses faces sont parallèles aux arêtes de celui-ci, comme cela doit être d'après ce qui a été dit. Cette modification d'une forme qui semble se servir de déguisement à elle-même, a peut-être quelque chose de plus surprenant encore que les diversités qui rendent d'autres formes comme étrangères par rapport à leur noyau.

110. Si l'on prend un cristal d'une autre espèce, le noyau se trouvera changé; si c'est encore un rhomboïde, il aura des angles différens. Dans telle espèce ce sera un cube, dans telle autre ce sera un prisme droit à bases rhombes, etc. Nous appelons *formes primitives*, celles de ces solides inscrits chacun dans tous les cristaux qui appartiennent à une même espèce; et *formes secondaires*, celles qui diffèrent de la forme primitive. Cette dernière est aussi quelquefois immédiatement produite par la cristallisation.

111. Les formes primitives observées, sont au nombre de cinq, en général; savoir, le tétraèdre, qui dans ce cas est toujours régulier; le parallélépipède, qui est tantôt rhomboïdal, tantôt cubique, etc.; l'octaèdre, dont la surface est composée de triangles qui sont, suivant les espèces, équilatéraux, isocèles ou scalènes; le prisme hexaèdre régulier; et le dodécaèdre dont la surface est composée de douze rhombes égaux et semblables, inclinés entre eux sous des angles de  $120^{\text{d}}$ . Le prisme hexaèdre régulier qui paraît ici parmi les formes primitives, devient, comme nous l'avons vu (108), forme secondaire, relativement à la chaux carbonatée; et ce n'est pas le seul exemple de cette faculté qu'a un même solide de se doubler en quelque sorte par la variété de ses fonctions.

## Des Formes des Molécules intégrantes.

112. Nous nous sommes arrêtés jusqu'ici à la considération du noyau, parce que ce résultat de la division mécanique étant comme une quantité constante, relativement à tous les cristaux d'une même espèce, devient une donnée commode pour la théorie, qui, en partant de cette constante, n'a plus qu'à déterminer les quantités variables, c'est-à-dire les diverses manières dont s'arrangent les molécules situées dans les parties qui servent d'enveloppe au noyau.

113. Mais avant de passer aux lois de cet arrangement, nous devons faire connaître les molécules dont il s'agit; et c'est par la sous-division du noyau parallèlement à ses différentes faces, et quelquefois dans d'autres sens encore, que l'on parvient à cette connaissance.

Supposons d'abord que le noyau soit un parallélépipède qui n'ait pas d'autres joints naturels que ceux qui sont parallèles à ses faces, et choisissons pour exemple le rhomboïde de la chaux carbonatée. La sous-division de ce rhomboïde, par des plans toujours plus rapprochés entre eux, donnera des rhomboïdes semblables à lui, et qui iront en diminuant successivement de volume; et si l'on continue cette division par la pensée au-delà du terme où les petits solides seraient devenus insensibles à l'œil, on sera conduit à des rhomboïdes d'un tel degré de ténuité, que l'on ne pourrait plus les diviser ultérieurement sans les analyser, c'est-à-dire, sans rompre l'union des principes chimiques qui les composent. Ces rhomboïdes situés, en quelque sorte, sur la limite de la division mécanique, sont ce que nous appelons les *molécules intégrantes* de la chaux carbonatée, pour les distinguer des molécules élémentaires de la même substance, qui sont, d'une part, celles de la chaux, et d'une autre part, celles de l'acide carbonique.

114. Prenons pour second exemple le dodécaèdre à plans rhombes (*fig. 9*), qui ne peut être non plus sous-divisé que parallèlement à ses faces. Nous disons que dans ce cas la mo-

lécule intégrante sera un tétraèdre. Pour le prouver, nous remarquerons que l'une quelconque des arêtes du dodécaèdre est parallèle à deux faces opposées de ce solide. Ainsi l'arête *ol* est parallèle aux faces *rsyx*, *puzh*; l'arête *pu* est parallèle aux faces *olrs*, *ahzq*, et ainsi des autres; d'une autre part, l'une quelconque des petites diagonales d'un des rhombes est aussi parallèle à deux faces opposées : par exemple, la petite diagonale qui passe par les points *o*, *t*, est parallèle aux faces *rsyx*, *puzh*; donc si l'on sous-divise le dodécaèdre parallèlement à ses différentes faces en faisant passer, pour plus de simplicité, les plans coupans par le centre, ces plans, pris trois à trois, passeront toujours par une petite diagonale telle que *ot*, et par deux arêtes contiguës à cette diagonale, telles que *os*, *ts*, ou bien *ou*, *tu*, c'est-à-dire, que ces plans intercepteront deux triangles isocèles *ost*, *out*, sur la surface de chaque rhombe *ostu*; mais ils passent en même temps par le centre : donc ils détacheront des tétraèdres, dont le nombre sera de 24, c'est-à-dire, double de celui des faces. La *fig. 10* représente séparément le tétraèdre, qui a pour face extérieure le triangle *ost* (*fig. 9*), et l'on démontre que les quatre faces de chaque tétraèdre sont des triangles isocèles, égaux et semblables : c'est une suite de l'égalité et de la similitude qui existent entre les rhombes de la forme primitive elle-même.

115 Le prisme hexaèdre régulier, que nous choisirons pour troisième exemple, n'admet de même de sous-divisions que dans des sens parallèles à ses différentes faces; et il suffit de jeter un coup-d'œil sur la *fig. 11*, où l'on a tracé sur l'hexagone régulier qui représente la base du prisme, des lignes indicatives des sous-divisions, pour concevoir que la forme de la molécule est, dans ce cas, un prisme triangulaire équilatéral.

116. Considérons enfin une des formes primitives dont la sous-division ne se borne pas au parallélisme avec les faces. Tel est le prisme droit rhomboïdal représenté *fig. 12*, qui appartient à une substance nommée *staurotide* (croisette), que l'on trouve dans le département du Finistère, où ses cristaux se

croisent communément deux à deux. Ce prisme, outre les divisions parallèles aux pans M, M, et à la base P, en admet d'autres parallèles à un plan qui passerait par la petite diagonale AA, et par celle de la base opposée; d'où il suit que les molécules intégrantes sont encore ici des prismes triangulaires, mais qui ont pour bases des triangles isocèles.

Nous ne parlerons point de la division des autres formes primitives, parce que les bornes que nous sommes obligés de nous prescrire ici ne nous permettent pas d'entrer dans les détails nécessaires pour lever une difficulté qui provient de ce que cette division paraît tendre vers des molécules de deux formes différentes. Il nous suffira d'observer que l'on peut, au moyen d'une hypothèse très admissible, en ramener le résultat à une seule forme de molécule qui est le tétraèdre, et que d'ailleurs la difficulté dont il s'agit, quand même elle subsisterait tout entière, ne toucherait point au fond de la théorie.

117. Maintenant, pour mieux faire ressortir ce qu'a de remarquable la conséquence qui se tire de la sous-division des formes primitives, relativement au nombre et aux formes des molécules intégrantes, supposons qu'il s'agisse de déterminer en général les trois solides géométriques les plus simples. Comme il faut au moins quatre plans pour circonscrire un espace, il est évident que les solides demandés seront successivement terminés par quatre, cinq et six plans; et en prenant, dans chaque espèce de solide, le plus simple, on aura d'abord la pyramide triangulaire ou le tétraèdre, en suite le prisme triangulaire, et enfin le parallélépipède. Or telles sont les trois figures élémentaires qui donnent naissance à cette grande diversité de cristaux que la nature offre à notre observation. On reconnaît ici ce que nous pourrions appeler sa devise familière, *économie et simplicité dans les moyens, richesse et variété inépuisables dans les effets*.

Les trois formes dont il s'agit sont diversifiées dans les différents minéraux par des mesures d'angles, et par des dimensions respectives particulières que la théorie détermine; et c'est en grande partie sur ces différences qu'est fondée la distinction des espèces minérales.

118. Mais une considération sur laquelle nous ne saurions trop appuyer, c'est que dans toute la série des cristaux que la théorie ramène à une même forme primitive, à l'aide des lois dont nous parlerons bientôt, la forme de la molécule est invariable relativement à la mesure de ses angles et à ses dimensions respectives; et cette constance, qui est démontrée par des faits sur lesquels il suffit d'ouvrir les yeux, et par des calculs étroitement liés avec ces faits, subsiste au milieu de toutes les diversités qui modifient la composition d'une substance. Que dans une même série de cristaux, celui-ci soit limpide et sans couleur, que celui-là renferme un principe colorant, qu'un troisième donne, par l'analyse, une certaine quantité soit de fer, soit d'une matière quelconque dont les autres cristaux n'offrent pas la moindre trace; qu'il y ait même un des principes communs à tous les individus, qui se trouve en excès dans quelques-uns, toutes ces variations, quelle qu'en soit la cause, n'effleureront pas même la forme géométrique de la molécule intégrante: c'est comme un point fixe autour duquel tout le reste semble osciller. Si donc il y a ici un problème à résoudre, ce n'est pas celui qui consiste à expliquer comment la constance des molécules peut s'accorder avec les changemens qui interviennent dans la composition, mais celui dont le but serait de concilier ces changemens eux-mêmes avec l'immuabilité que l'on ne peut se dispenser d'accorder à la forme des molécules.

119. Les divisions que nous avons considérées dans le noyau, s'étendent également à toute la matière enveloppante; d'où il suit que le cristal entier n'est autre chose qu'un assemblage de molécules intégrantes, semblables à celles dont le noyau lui-même est formé. Nous supposons que ces molécules sont les mêmes qui étaient suspendues dans le liquide où s'est opérée la cristallisation, quoique nous n'en soyons pas physiquement certains, puisque celles-ci échappent à nos yeux par leur extrême ténuité; mais dans l'étude de la nature, nous ne pouvons faire plus sagement que d'adopter ce principe, *que les choses sont censées telles en elles-mêmes qu'elles s'offrent à nos observa-*

*tions*. Les derniers résultats sensibles de la division mécanique des minéraux, s'ils ne nous donnent pas la figure des véritables molécules intégrantes des cristaux, méritent d'autant mieux de les remplacer dans nos conceptions, qu'en les prenant pour données, nous parvenons à représenter fidèlement les faits que nous offre la nature, et à en établir la liaison et la dépendance mutuelle.

La théorie qui concerne cet objet, consiste à rechercher les lois que suivent les molécules dans leur arrangement, pour produire ces espèces d'enveloppes régulières qui déguisent une même forme primitive de tant de manières différentes.

### Des Lois auxquelles est soumise la structure des Cristaux.

120. Si l'on considère attentivement les figures des lames qui recouvrent successivement le noyau d'un cristal, et que nous appelons *lames de superposition*, on s'aperçoit qu'en partant de ce noyau elles vont en décroissant progressivement, tantôt de tous les côtés à la fois, tantôt dans certaines parties seulement. Mais la quantité dont chaque lame est dépassée par celle qui la précède, ne peut provenir que du retranchement d'une certaine somme de molécules intégrantes qui manquent à la première pour qu'elle soit de niveau avec la seconde; et parce que les bords des lames décroissantes sont constamment des lignes droites parallèles les unes aux autres sur les différentes lames, il en résulte que les différences dont nous avons parlé sont mesurées par des soustractions d'une ou plusieurs rangées de molécules intégrantes. Voici donc l'énoncé du problème qui se présente à résoudre : Étant donné un cristal secondaire, et la figure de son noyau et de ses molécules intégrantes étant pareillement donné; supposant de plus que chacune des lames qui sont ajoutées au noyau soit dépassée par la précédente, dans certaines parties, d'une quantité égale à une, deux, trois rangées, etc., de molécules; déterminer parmi ces différentes lois de décroissement, celles d'où résulte une forme semblable

à la proposée, par le nombre, la figure, la disposition de ses faces, et par la mesure de ses angles plans et solides.

Ces sortes de problèmes ne peuvent être résolus qu'à l'aide du calcul; mais pour faire concevoir la manière d'agir des lois dont il sert à déterminer les résultats, nous allons construire, par la méthode de synthèse, quelques formes secondaires, en rendant, pour ainsi dire, palpable la superposition et les variations des lames décroissantes sur-ajoutées au noyau.

### *Décroissemens sur les bords.*

121. Commençons par un exemple très élémentaire tiré du dodécaèdre à plans rhombes (*fig. 13*), que nous avons déjà vu (111) au rang des formes primitives, mais que nous considérons ici comme forme secondaire, dont le noyau est un cube. Pour extraire ce noyau, il suffit d'enlever successivement les six angles solides, tels que *s*, *r*, *t*, etc., composés chacun de quatre plans, par des coupes dirigées dans le sens des petites diagonales. Ces coupes mettront à découvert six carrés *AEOI*, *EOO'E'*, *IOO'I'*, etc., qui seront les faces du cube primitif.

Ce cube étant un assemblage de molécules intégrantes de la même forme, il faudra que chacune des pyramides qui reposent sur ses faces, soit elle-même composée de cubes égaux entre eux, et à ceux qui forment le noyau. Or cette condition sera remplie, si la première lame, située à la base de l'une quelconque des six pyramides, a vers chacun de ses bords une rangée de cubes de moins que dans le cas où elle couvrirait entièrement la face du noyau sur laquelle repose la pyramide, et si chacune des autres lames est de même dépassée par chaque bord de la précédente, d'une quantité égale à une rangée; car il est bien évident que, dans ce cas, toutes les lames seront uniquement composées de cubes. Cet assortiment est représenté par la *fig. 14*, où l'on voit que la dernière lame se réduit à un simple cube (1).

---

(1) On n'a placé ici que trois des pyramides sur-ajoutées au noyau; il est facile de suppléer les autres par la pensée.

Cette figure a été tracée dans l'hypothèse où le noyau aurait 17 molécules sur chacun de ses bords; et, comme les lames de superposition diminuent d'une rangée vers chacun de leurs bords opposés, il en résulte que les longueurs de ces bords sont successivement comme les nombres 15, 13, 11, 9, 7, 5, 5, 1, ce qui fait huit lames pour chaque pyramide. Les faces triangulaires  $Osl$ ,  $OzI$ , etc., de ces pyramides, sont produites par les bords décroissans des lames de superposition qui se trouvent évidemment sur un même plan; en sorte qu'elles sont alternativement rentrantes et saillantes.

Or il y a six pyramides, et par conséquent vingt-quatre triangles. Mais parce que le décroissement est uniforme dans toute l'étendue des triangles adjacens sur les pyramides voisines, tels que  $Osl$ ,  $OzI$ , il en résulte que les triangles, pris deux à deux, forment un rhombe.

La surface du solide sera donc composée de douze rhombes égaux et semblables, c'est-à-dire, que ce solide aura la même forme que celui qui est l'objet du problème. L'angle obtus de chaque rhombe a pour mesure  $109^{\text{d}}28' 16''$  (1), et l'inclinaison mutuelle de deux rhombes quelconques, adjacens entre eux, est de  $120^{\text{d}}$ .

Maintenant si, à cette espèce de maçonnerie grossière, mais qui a l'avantage de parler à l'œil, nous substituons l'architecture infiniment délicate de la nature, il faudra concevoir le noyau comme étant composé d'un nombre incomparablement plus grand de molécules d'une extrême ténuité; alors le nombre des lames de superposition étant lui-même considérablement augmenté, tandis que les épaisseurs de ces lames seront devenues imperceptibles, les cannelures que forment ces lames par les rentrées et saillies alternatives de leurs bords, échapperont aussi à nos sens; et c'est ce qui a lieu dans les polyèdres que la cristallisation a élaborés à l'aise, sans être ni pressée, ni troublée dans sa marche.

---

(1) C'est une suite de ce que le rapport entre la grande diagonale de chaque rhombe et la petite, est celui de  $\sqrt{2}$  à 1.

Pour énoncer le résultat qui vient d'être décrit, nous disons que le dodécaèdre est produit en vertu d'un décroissement par une seule rangée, parallèlement à tous les bords du noyau cubique.

122. Si l'on imagine que les lames de superposition décroissent par deux, trois rangées, ou davantage, et toujours parallèlement aux différens bords du cube primitif, alors les pyramides étant plus surbaissées, leurs faces ne pourront plus se trouver deux à deux sur un même plan; en sorte que la surface du solide secondaire sera composée de 24 triangles distincts.

123. Nous appelons *décroissemens en largeur*, ceux où chaque lame n'ayant que l'épaisseur d'une molécule, comme dans le cas que nous venons de citer, est dépassée par la précédente, d'une quantité égale à 2, 3 rangées, ou davantage. Les *décroissemens en hauteur* sont ceux qui présentent l'effet inverse, c'est-à-dire, que chaque lame n'étant dépassée par celle qui la précède que d'une quantité égale à une rangée, peut avoir une hauteur double, ou triple, ou quadruple, etc., de l'épaisseur d'une molécule. La limite de ces deux espèces de décroissemens a lieu lorsque la différence en largeur et la dimension en hauteur sont l'une et l'autre égales à l'unité, comme dans le dodécaèdre à plans rhombes originaire du cube (121).

124. Le dodécaèdre du fer sulfuré (pyrite ferrugineuse), dont la surface est composée de 12 pentagones égaux et semblables, ainsi qu'on le voit (*fig.* 15), nous offre une combinaison des deux espèces de décroissemens dont nous venons de parler. Chaque pentagone, tel que  $tO_sO'n$ , a quatre côtés égaux, savoir :  $O_t$ ,  $O_s$ ,  $O's$ ,  $O'n$ ; le cinquième  $tn$ , que nous considérons comme la base du pentagone, est plus long que les autres. Le dodécaèdre dont il s'agit ici a encore pour noyau un cube, que l'on parviendrait à extraire en faisant passer des plans coupans par les diagonales  $OI$ ,  $OE$ ,  $AE$ ,  $AI$ , etc. (*fig.* 16), qui interceptent les angles opposés aux bases; d'où l'on voit que les portions sur-ajoutées au noyau, au lieu d'être des pyramides, comme dans le dodécaèdre à plans rhombes, sont des espèces de coins, qui ont pour faces extérieures deux

trapèzes, tels que  $OIqp$ ,  $AEpq$ , et deux triangles isocèles  $EpO$ ,  $AqI$ .

Chacune de ces parties additionnelles, par exemple celle que nous venons d'indiquer, résulte de deux décroissements, l'un par deux rangées en largeur, parallèlement à deux bords opposés  $OI$ ,  $AE$ , de la face correspondante  $AEOI$  du noyau, l'autre par deux rangées en hauteur, parallèlement aux deux autres bords  $EO$ ,  $AI$  de la même face : de plus, chaque décroissement agit sur les différentes faces du cube, suivant trois directions perpendiculaires entre elles. Ainsi le décroissement par deux rangées en largeur ayant lieu sur la face  $AEOI$ , parallèlement à  $OI$  et  $AE$ , comme nous l'avons dit, agit sur la face  $OII'O'$ , parallèlement à  $OO'$  et  $II'$ , et sur la face  $EOO'E'$ , parallèlement à  $EO$  et  $O'E'$ , et dans les mêmes sens sur les faces opposées. La marche du décroissement en hauteur, par des directions qui se croisent aussi à angle droit, se présente d'elle-même, d'après ce qui vient d'être dit.

En considérant attentivement la *fig.* 17, où l'on a rendu sensible à l'œil la distinction des lames de superposition et des molécules dont elles sont l'assemblage, on y voit que le progrès du décroissement en largeur, qui contribue, par exemple, à la formation de la partie additionnelle  $EOIqp$ , et qui a lieu parallèlement à l'arête  $OI$  et à son opposée, étant plus rapide que celui du décroissement en hauteur, qui se fait parallèlement à l'arête  $EO$  et à son opposée, les deux faces qui naissent du premier doivent être plus inclinées que celles qui sont produites par le second; en sorte que chaque pile de lames décroissantes ne se termine plus en pointe, mais en arête  $pq$  : de plus, chaque trapèze, tel que  $Opgl$  (*fig.* 16 et 17), qui résulte du décroissement en largeur, étant sur le même plan que le triangle  $OqI$ , par une suite de ce que le décroissement en hauteur qui détermine celui-ci n'est que la répétition en sens contraire du décroissement en largeur, l'ensemble des deux figures forme un pentagone  $pOqIq$ ; d'où il suit que le solide secondaire est terminé par douze pentagones égaux et semblables, à cause de la figure régulière du noyau, et de la symétrie des décroissements.

Si l'on suppose que les décroissemens agissent suivant deux autres lois, dont l'une soit toujours l'inverse de celle qui se combine avec elle, de manière qu'il y ait trois ou quatre rangées, etc., soustraites en largeur et autant en hauteur, le résultat sera encore un dodécaèdre à douze pentagones égaux et semblables; et il est bien évident que tous ces dodécaèdres différencieront, soit entre eux, soit avec le précédent, par la mesure de leurs angles. Pour que l'existence de la loi dont nous avons fait dépendre celui-ci, soit démontrée, il faut que l'inclinaison (1) de chaque pentagone, tel que  $\angle OsO'n$ , sur le pentagone  $\angle IsI'n$ , qui a la même base  $in$ , mesurée sur le dodécaèdre de la nature, soit égale à celle que détermine le calcul, en prenant pour donnée la loi dont il s'agit, et qui est de  $126^{\text{d}} 52' 12''$  (2) : or le gonomètre donne sensiblement  $127^{\text{d}}$ ; d'où l'on doit conclure que la première mesure est la limite à laquelle l'instrument atteindrait lui-même, sans les petites imperfections qui ne lui permettent d'offrir autre chose que des approximations. Ce que nous disons ici a également lieu pour toutes les autres applications de la théorie : toujours quelque loi de décroissement lui fournit un résultat, dont l'accord avec celui de l'observation est aussi satisfaisant qu'on puisse le désirer.

125. On a pris le solide, dont nous venons d'expliquer la structure, pour un dodécaèdre régulier semblable à celui de la Géométrie, parce qu'on était porté à supposer aux cristaux les formes qui paraissent les plus simples et les plus régulières, lorsqu'on ne considère dans le polyèdre que son aspect, et comme le fantôme d'un corps physique; mais la théorie démontre que l'existence du dodécaèdre régulier n'est possible en

(1) On conçoit aisément que cette inclinaison que nous choisissons de préférence, détermine tous les autres angles.

(2) Pour trouver cette inclinaison, il ne s'agit que de résoudre un triangle  $abc$  (fig. 18), dans lequel le côté  $ab$  soit au côté  $bc$ , comme la distance entre le bord d'une lame et celui de la suivante, donnée par le décroissement en largeur, est à l'épaisseur de chaque lame, c'est-à-dire, comme 2 : 1. L'angle  $acb$  sera la moitié de l'inclinaison cherchée.

vertu d'aucune loi de décroissement. La raison en est que le rapport de la quantité, dont chaque lame est dépassée par la suivante dans le sens de la largeur, avec l'épaisseur de la même lame, doit toujours être représenté par des nombres rationnels; ce qui a lieu effectivement dans le dodécaèdre du fer sulfuré, où ce rapport est celui de 2 à 1 : au contraire, le rapport entre les deux dimensions correspondantes qui ont lieu dans le dodécaèdre régulier, est exprimé en nombres irrationnels, c'est-à-dire, qu'il représente une chose impossible (1). Mais le défaut de symétrie qui existe à l'extérieur dans le dodécaèdre du fer sulfuré, cache un caractère de simplicité, qui consiste en ce que la molécule étant le cube; dont la figure est remarquable par sa perfection, la loi de décroissement est en même temps celle qui donne le dodécaèdre à l'aide du moindre nombre possible de rangées soustraites; ainsi il est vrai de dire que c'est là le dodécaèdre régulier de la Minéralogie.

126. Nous terminerons ce qui regarde les décroissemens sur les bords, par un exemple tiré du dodécaèdre à faces triangulaires scalènes (*pl. I, fig. 6*), qui est, comme nous l'avons vu (108), une des variétés de la chaux carbonatée. Ici le noyau est un rhomboïde, dont l'axe, c'est-à-dire, la ligne qui passe par les deux angles solides A, A' (*fig. 7*), composés chacun de trois angles obtus égaux, doit être situé verticalement, pour que ce rhomboïde s'offre à l'œil sous son véritable aspect; il en résulte que la symétrie n'exige plus, comme par rapport au cube, que les décroissemens qui agissent sur l'un quelconque EO des bords de l'une des faces, telle que AEOI, se répètent sur le bord opposé AI, parce que celui-ci, qui est contigu à l'un des sommets, a en quelque sorte une manière d'être différente de l'autre. Il suffit que tout ce qui se passe à l'égard du

---

(1) Ce rapport, tel que le donnent les formules trigonométriques, est celui de  $\sqrt{5} + 1$  à 2, le même que celui de  $\sqrt{3 + \sqrt{5}}$  à  $\sqrt{2}$ , auquel on parvient par les formules relatives à la théorie de la structure des cristaux, et la mesure de l'angle formé par deux faces adjacentes est de  $116^{\circ} 33' 54''$ , au lieu de  $126^{\circ} 52' 12''$ .

bord EO, ait également lieu par rapport aux cinq autres OI, IK, KG, CH, HE, semblablement situés. On juge, à la seule inspection de la figure, que ces six bords qui sont communs au noyau et au cristal secondaire, servent de lignes de départ à autant de décroissemens, dont l'effet est de produire des deux côtés du même bord, tel que EO, deux triangles EsO, Es'O; ce qui fait en tout douze triangles, six vers chaque sommet.

Or le calcul démontre que, dans le cas présent, les décroissemens se font par deux rangées en largeur, ainsi qu'on le voit *pl. II, fig. 19*, où l'on s'est borné à tracer l'espèce de pyramide supérieure ajoutée au noyau. Les saillies et rentrées alternatives que forment les lames de superposition vers leurs bords décroissans, étant nulles pour nos sens, dans le cristal produit par la nature, la ligne Es représente une des arêtes contiguës au sommet, telle que nous la voyons sur ce même cristal; en sorte que la différence entre le sommet géométrique *s* et le sommet physique *s'*, s'évanouit aussi, à cause de son extrême petitesse.

127. Tandis que les lames de superposition décroissent vers leurs bords inférieurs, elles prennent, au contraire, des accroissemens vers leurs bords supérieurs, en se recouvrant mutuellement de ce même côté; et c'est un principe général, que les portions des lames situées hors de la portée des décroissemens s'étendent comme elles feraient si le noyau, en conservant sa forme, augmentait simplement de volume. Mais la théorie fait abstraction de ces variations subsidiaires, pour ne considérer que l'effet immédiat du décroissement, qui seul détermine tout le reste.

128. Un résultat qui a lieu généralement pour tous les dodécaèdres produits en vertu de la même loi, quels que soient les angles primitifs, consiste en ce que l'axe de chacun de ces dodécaèdres est triple de l'axe du noyau, et en ce que le rapport des solidités est le même que celui des axes: de plus, on trouve, à l'aide du calcul, que dans le dodécaèdre particulier dont il s'agit ici, le grand angle OEs (*pl. I, fig. 7*) de chacune des faces est rigoureusement égal à l'angle obtus EAI du noyau, c'est-à-dire, de  $101^{\text{d}} 52' 15''$ , et que l'incidence mutuelle de deux faces

voisines OIs, KIs, sur le dodécaèdre, à l'endroit d'une des arêtes les plus saillantes Is, est égale à celle de deux faces pareillement adjacentes EAIO, GAIK, vers un même sommet du noyau, c'est-à-dire, de  $104^{\text{d}} 28' 40''$ . C'est ce qui a suggéré le nom de *métastatique* que nous avons donné à cette variété, et qui indique comme le transport ou la *métastase* des angles du noyau sur le cristal secondaire. Les solutions des problèmes relatifs à la structure des cristaux, ont servi à dévoiler une multitude de semblables propriétés, et de résultats d'une géométrie qui paraîtrait mériter d'être étudiée, quand même elle ne porterait que sur de simples spéculations. Mais cette étude présente un double intérêt, lorsque ces propriétés, dont elle offre le développement, ont un fondement réel dans la géométrie de la nature.

### *Décroissemens sur les Angles.*

129. Indépendamment des décroissemens qui ont lieu parallèlement aux bords des faces du noyau, il s'en fait aussi dont les directions sont parallèles aux diagonales; et comme ils ont des angles pour termes de départ, nous les appelons *décroissemens sur les angles*.

Soit OII'O' (*fig. 20*) une des faces d'un noyau cubique, subdivisée en une multitude de petits carrés qui seront les bases d'autant de molécules. On peut considérer des rangées ou des files de molécules, non-seulement dans le sens des arêtes, comme la rangée alignée suivant  $aa'$ , mais aussi dans le sens des diagonales, comme les rangées, dont l'une est désignée par  $a, b, c, d, e, f$ , etc., l'autre par  $n, t, l, m, p, o, r, s$ , une troisième par  $q, v, k, u, x, y, z$ ; toute la différence consiste en ce qu'ici les molécules d'une même rangée ne se touchent que par une arête, au lieu que celles qui composent les rangées parallèles aux bords se touchent par une de leurs faces. Nous nous bornerons à un seul exemple de décroissemens sur les angles.

130. La *fig. 21*, (*pl. II*), représente un octaèdre régulier qui a

pour noyau un cube, dont les angles solides, comme on le voit, répondent aux centres des faces de l'octaèdre : dans ce cas, les lames de superposition décroissent par une rangée sur tous les angles des faces du noyau cubique; il en résulte qu'à l'égard de l'angle  $I'$  (*fig. 20*), que nous choisissons pour exemple, le cube qui répond à  $i$  est soustrait sur la première lame; que sur la seconde il y a soustraction des deux cubes, qui répondent à  $s, s'$ ; sur la troisième, de ceux qui répondent à  $z, h, z'$ , et ainsi de suite; en sorte que les bords situés de ce même côté, sur les différentes lames, sont alignés successivement comme  $BB', DD', GG'$ , etc.

Mais d'après le principe (127), que partout où le décroissement n'agit pas, le cristal s'accroît, au contraire, comme si le noyau ne faisait lui-même qu'augmenter de volume, les lames de superposition s'étendent vers les parties situées entre leurs bords décroissans, de manière à s'envelopper mutuellement, jusqu'à ce que, les bords décroissans sur une même lame venant à se toucher, il ne reste plus que l'effet des décroissemens, qui continuent leur marche jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à leur terme.

Chacun des huit angles solides du cube deviendra donc le point du départ de trois décroissemens qui auront lieu sur les trois plans qui concourent à la formation de cet angle, d'où il suit qu'il y aura en tout 24 faces produites en vertu des décroissemens. Mais parce que les décroissemens ont lieu par une simple rangée, il arrive encore ici que les trois faces qui naissent autour d'un même angle solide sont de niveau, et ainsi les vingt-quatre faces se réduisent à huit, et, par une suite de la forme régulière du noyau, l'octaèdre secondaire est lui-même régulier. Cette structure est celle d'une variété du plomb sulfuré, connue vulgairement sous le nom de *galène*.

Dans le même cas, et en général dans tous ceux qui ont rapport aux décroissemens sur les angles, les faces du solide secondaire ne sont plus simplement sillonnées par des stries, comme lorsque les décroissemens se font sur les bords : elles sont hérissées d'une multitude de saillies, formées par les an-

gles solides extérieurs des molécules ; mais tous ces angles étant de niveau , et les molécules étant d'ailleurs imperceptibles , les faces du cristal paraissent former des plans lisses et continus.

La figure 22 représente l'assortiment des petits cubes qui concourent à produire une des faces  $smn$  (fig. 21) de l'octaèdre dont nous avons parlé. Le cube  $o$  (fig. 22) est situé à l'angle solide du noyau marqué de la même lettre (fig. 21). Les cubes dont les faces sont traversées diagonalement par les lignes  $bc$ ,  $cr$ ,  $rb$  (fig. 22), appartiennent aux trois premières lames de superposition qui reposent sur les trois faces du cube adjacentes à l'angle  $o$  ; ceux que traversent diagonalement les lignes  $ld$ ,  $dg$ ,  $gl$ , appartiennent aux trois lames suivantes. Passé ce terme , les bords décroissans se touchent , de manière que chaque lame prend la figure d'un carré , dont le côté contigu à la face  $smn$  est  $ku$ ,  $xy$ , ou  $hz$  ; et tout marche alors par des lames de cette même figure , qui vont en décroissant de tous les côtés à la fois jusqu'aux sommets  $s$ ,  $m$ ,  $n$ , de l'octaèdre , où ces lames se réduisent à un simple cube.

131. Les lois de décroissemens sont susceptibles de certaines modifications qui offrent des moyens termes entre celles dont nous avons parlé ; mais ce n'est point ici le lieu de les faire connaître , parce que notre but n'a été que d'exposer les principes généraux de la théorie , et de donner une idée des résultats les plus ordinaires auxquels s'étendent les applications de ses méthodes.

### *Fécondité des lois de Décroissemens.*

132. Nous nous sommes bornés à la considération des formes qui ne dépendent que d'une seule loi de décroissement , et que nous appelons *formes secondaires simples*. Mais la cristallisation nous offre très souvent des formes que nous nommons *composées* , et dont les faces sont produites par le concours de diverses lois de décroissement ; et lorsque quelqu'une de ces lois n'atteint pas sa limite , et que son effet reste comme interrompu , le cristal secondaire présente des faces parallèles à

celles du noyau, interposées entre les facettes qui sont dues aux décroissemens.

Que de combinaisons renfermées dans les nombreuses modifications de ces lois, qui, tour à tour séparées sur différens corps, et offrant dans le même corps l'assemblage de plusieurs formes, agissent tantôt de préférence sur certains bords ou sur certains angles, tantôt sur les uns et les autres à la fois, se multiplient également par la diversité de leurs mesures et par celle de leurs termes de départ; tantôt enfin masquent entièrement le noyau, et tantôt laissent subsister son empreinte, et font servir les positions constantes de ses faces à de nouvelles variations! Et si l'on suppose que le nombre de rangées soustraites soit lui-même très variable, et qu'il puisse y avoir des décroissemens par vingt, trente, quarante rangées ou davantage, l'imagination sera effrayée de l'immense quantité de corps réguliers dont une seule substance pourrait peupler le monde souterrain; mais la force qui produit les soustractions paraît avoir une action très limitée, et jusques ici nous n'avons point trouvé de lois dont la mesure excédât six rangées. Telle est cependant la fécondité qui s'allie avec cette simplicité, qu'en se bornant aux décroissemens ordinaires par une, deux, trois et quatre rangées sur les bords et sur les angles d'un rhomboïde, on démontre que cette espèce de noyau est susceptible de produire huit millions trois cent quatre-vingt-huit mille six cent quatre variétés de formes différentes, tandis que le nombre de celles qui ont été observées jusqu'à présent, ne s'étend guère au-delà de cent-soixante, relativement à la chaux carbonatée, qui est comme le Protée des minéraux.

### *Généralité de la Théorie.*

133. Nous n'entrerons ici dans aucuns détails sur la structure des formes secondaires, dont la molécule est un tétraèdre ou un prisme triangulaire; mais nous ne croyons pouvoir mieux terminer cet article, que par l'exposé d'un résultat qui sert à lier cette structure avec celle des formes originaires du paralléle-

pipède. La liaison dont il s'agit consiste en ce que les molécules tétraédres, ou prismatiques triangulaires, sont toujours tellement assorties dans l'intérieur de la forme primitive et des cristaux secondaires, qu'en les prenant par petits groupes de deux, quatre ou six, elles composent des parallélépipèdes; en sorte que les rangées soustraites par l'effet des décroissemens, ne sont autre chose que des sommes de ces parallélépipèdes.

134. Ainsi dans le prisme hexaèdre régulier, dont l'hexagone ABCDFG (*pl. I, fig. 11*), représente la base sous-divisée en triangles, qui sont les bases d'autant de molécules, il est évident que deux triangles quelconques, voisins l'un de l'autre, tels que *Api*, *AOi*, composent un rhombe; et que par conséquent les deux prismes auxquels ils appartiennent forment, par leur réunion, un prisme droit à bases rhombes, qui est une des espèces de parallélépipèdes.

Supposons une série de lames empilées sur l'hexagone ABCDFG, et qui subissent, par exemple, sur leurs différens bords, des soustractions, dont telle soit la mesure que ces mêmes bords soient alignés successivement comme les côtés des hexagones *ilmnrh*, *kuxyge*, etc.; l'effet sera le même que celui d'un décroissement par une rangée de petits parallélépipèdes, composés chacun de deux molécules. On conçoit que, dans le même cas, le résultat du décroissement est une pyramide droite hexaèdre qui repose par sa base sur l'hexagone ABCDFG.

135. Reprenons le dodécaèdre à plans rhombes (*fg. 9*), que nous avons vu (114) être un assemblage de tétraédres, dont les faces sont des triangles isocèles égaux et semblables. Si nous partageons les douze rhombes en quatre assortimens composés chacun de trois plans, tels que ceux qui se réunissent pour former l'un quelconque des quatre angles solides *o*, *x*, *z*, *g*, nous pourrions considérer chaque assortiment, par exemple, celui qui renferme les trois plans *olrs*, *outs*, *olpu*, comme appartenant à un rhomboïde qui aurait un de ses sommets situé extérieurement en *o*, et dont l'autre sommet, engagé dans le dodécaèdre, se confondrait avec son centre. Or il

est bien clair que , dans cette hypothèse , les vingt-quatre tétraèdres , dont le dodécaèdre est l'assemblage , se réunissent six à six pour former les quatre rhomboïdes qui ont leurs sommets extérieurs aux points *o*, *γ*, *z*, *g*. Par une suite nécessaire, si l'on suppose la division mécanique poussée jusqu'à sa limite, toutes les molécules tétraèdres qui répondent à cette limite, groupés de même six à six, donneront des rhomboïdes. Or c'est en faisant décroître les lames de superposition par une ou plusieurs rangées de ces rhomboïdes , que la théorie parvient à déterminer les formes secondaires des substances qui, comme le grenat , ont le dodécaèdre à plans rhombes pour forme primitive.

136. Nous avons donné le nom de *molécules soustractives* à ces parallélépipèdes composés de tétraèdres ou de prismes triangulaires, et dont les rangées mesurent la quantité du décroissement qu'éprouvent les lames de superposition. Le calcul n'a besoin que de ces parallélépipèdes pour arriver à son but; et l'espèce d'anatomie que subissent ensuite ces petits solides, lorsqu'on essaye de remonter jusqu'à la véritable forme de la molécule intégrante, est une affaire de pure observation, qui est étrangère à la théorie. Le parallélépipède représente ici l'unité; et peu importe qu'il y ait au-delà de cette unité, des fractions formées de ses sous-divisons. Au moyen de cette conformité entre les résultats donnés par les diverses formes de molécules intégrantes, la théorie a l'avantage de pouvoir généraliser son objet, en ramenant à un même élément cette multitude de formes qui, par leur diversité, semblaient peu susceptibles de concourir en un point commun.

### III. DU CALORIQUE.

137. **DANS** tout ce que nous avons dit jusqu'ici des corps solides, nous avons considéré leurs molécules comme réunies, d'une manière invariable, par la force de l'affinité, et nous n'avons fait attention qu'aux différentes modifications de figures qui résultaient de leur arrangement. Mais l'affinité elle-même,

ou plutôt l'adhérence qu'elle produit entre les molécules, est susceptible d'une infinité de variations dépendantes d'une cause qui en balance plus ou moins l'effet, et quelquefois finit par le détruire entièrement.

Cette cause qui réside dans tous les corps, tend continuellement à écarter leurs molécules, et suivant que son action l'emporte sur celle de l'affinité, ou est en équilibre avec elle, ou enfin lui est inférieure, le corps se dilate, ou conserve son volume, ou se resserre dans un plus petit espace. Les changements qu'elle opère dans les dimensions des corps, ordinairement assez légers pour échapper aux yeux, sont très remarquables dans certaines circonstances dont nous citerons des exemples. Mais son action se manifeste à nous par un effet d'un autre genre, qui a un rapport intime avec notre organisation. Lorsque cette action s'exerce avec plus d'énergie sur les corps qui nous environnent que sur le nôtre, il en résulte une rupture d'équilibre qui fait naître en nous la sensation connue sous le nom de *chaleur*. Tout le monde sait que celle-ci devient plus vive et va jusqu'à la douleur, lorsqu'on s'approche des corps embrasés où l'activité de la cause dont il s'agit s'annonce par la destruction même de ces corps. Les physiiciens ont donné à cette cause les noms de *feu*, de *matière de la chaleur*, ou même de *chaleur*; les chimistes modernes la désignent sous celui de *calorique*, que nous adopterons.

138. Le calorique n'est-il que l'effet d'un mouvement intestin en vertu duquel les molécules des corps soient sollicitées à s'écarter ou à se rapprocher les unes des autres, selon les circonstances? ou bien est-ce une matière réellement existante qui écarte les mêmes molécules, ou leur permette de se rapprocher, suivant que sa quantité augmente ou diminue dans les corps? Sans rien décider entre ces deux opinions, nous emploierons le langage qui est conforme à la seconde, en la regardant seulement comme une hypothèse plus propre à aider la conception des phénomènes, et plus commode pour les exprimer.

Nous en userons de même dans toutes les occasions semblables, et particulièrement lorsque nous traiterons de l'élec-

tricité et du magnétisme, en désignant par le mot de *fluide*, les deux principes composans du fluide, soit électrique, soit magnétique, non pas pour exprimer des êtres dont l'existence n'est pas suffisamment prouvée, mais pour donner, par la pensée, un sujet à l'action des forces connues qui concourent à la production des phénomènes. Du reste, nous ne perdrons pas de vue la différence que l'on doit mettre entre les véritables fluides que nous palpons, que nous coërçons dans des vases, et ces agens, sur l'existence desquels l'observation s'est tue jusqu'ici. Nous ne les plaçons point dans la nature, mais seulement dans la théorie, parce qu'ils ont l'avantage, quand ils sont bien choisis, de représenter fidèlement les résultats, d'en offrir une explication satisfaisante, et même de nous aider à les prévoir; en sorte que s'ils ne sont pas les véritables agens employés par la nature à la production des phénomènes, ils sont censés en tenir lieu et en être les équivalens.

Nous insistons sur cette remarque, parce qu'il nous paraît essentiel au progrès des sciences, de porter partout, dans leur étude, cette justesse et cette précision d'idées, cette méthode correcte et sévère qui met chaque chose à son véritable niveau, qui évite d'en faire dire à la nature plus qu'elle n'en a dit, et de confondre une hypothèse simplement explicative, avec une vue nette des objets qui ont un fondement réel. On peut comparer la Physique à un tableau qui, pour être heureusement exécuté, doit faire ressortir la nuance expressive qui sépare la certitude de la simple vraisemblance, et où l'on doit reconnaître tour à tour une main ferme et hardie dans les traits fortement prononcés, et une main sage et mesurée, dans ceux qui demandent à être adoucis. Revenons à l'objet dont nous avons commencé à nous occuper.

C'est à la Chimie qu'appartient encore le développement des effets qui dépendent de la manière dont le calorique agit dans la composition et dans la décomposition des corps. Nous le considérerons surtout dans son état ordinaire, et sous le point de vue de la Physique.

## 1. Des Principes sur lesquels est fondée la théorie du Calorique.

139. Dans l'hypothèse que nous avons admise, le calorique doit être considéré comme un fluide très subtil, éminemment élastique, qui pénètre tous les corps, dans l'intérieur desquels il est répandu plus ou moins abondamment. La quantité de ce fluide que renferme un corps, n'y jouit pas de toute sa force expansive naturelle, ainsi que nous l'expliquerons dans la suite; mais elle en conserve une partie plus ou moins considérable, en vertu de laquelle le calorique fait effort pour s'échapper du même corps, en sorte qu'il ne peut y être maintenu que par la résistance du calorique engagé dans les corps environnans, et qui a une tendance égale à s'en échapper. Si cette égalité cesse, par une surabondance de calorique dans quelqu'un des corps, celui-ci cède aux autres une partie de son fluide, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. La tendance du calorique à s'échapper ainsi d'un corps, a été désignée par le mot de *tension*, qui assimile l'état du calorique à celui d'un ressort bandé. C'est proprement dans la quantité de cette tension que consiste ce qu'on appelle la *température* d'un corps, et suivant que la tension augmente ou diminue, la température s'élève ou s'abaisse, ce que l'on exprime aussi dans un langage plus familier, en disant que le corps s'échauffe ou se refroidit.

140. Pour faciliter l'intelligence des détails relatifs à l'objet qui nous occupe, il ne sera pas inutile de donner ici, comme par anticipation, une idée du thermomètre. Cet instrument est composé d'un tube terminé en forme de boule, et rempli d'une liqueur dont les dilatations et les contractions font connaître les variations que subit la température des corps en contact avec le thermomètre. Il en résulte que la colonne de liqueur qui occupe le tube, s'allonge et se raccourcit à mesure que la température s'élève et s'abaisse. Les mouvemens de la colonne se mesurent à l'aide d'une graduation dans laquelle on distingue deux limites, dont l'une répond au point d'abaissement de

cette colonne, lorsque la température est celle de la glace fondante, et l'autre au point d'élevation de la même colonne, lorsque la température est celle de l'eau bouillante. Dans le thermomètre dit de *Réaumur*, et dans celui qu'on appelle *centigrade*, le zéro de l'échelle indique le terme de la glace fondante; mais dans le premier, l'intervalle compris entre ce terme et celui de l'eau bouillante, est divisé en 80 parties, et dans le second, en 100 parties. La sous-division est continuée dans l'un et l'autre thermomètre, au-dessous de zéro, en parties égales à celles qui sous-divisent l'intervalle entre les deux limites.

141. Nous venons de dire que les dilatations de la colonne de liquide renfermée dans le tube du thermomètre annoncent les élévations de la température, quoiqu'il y ait deux effets distincts et produits par deux actions différentes du calorique, ainsi que nous le ferons voir. Il en est de même des contractions du liquide à l'égard des abaissemens de la température. Mais ces effets étant proportionnels entre eux, dans un thermomètre dont la construction a été dirigée vers la plus grande perfection de cet instrument, la marche de la dilatation devient ici un terme de comparaison, qui nous sert à mesurer, en quelque sorte, de l'œil celle de la température.

142. Nous ne devons pas omettre que quand on emploie le même instrument comme indicateur de la température de l'air ou de quelqu'autre corps, on suppose sa masse assez petite, pour que la quantité de calorique qu'il cède ou qu'il enlève aux substances environnantes, puisse être négligée sans erreur sensible. Nous donnerons plus bas une description développée du thermomètre, jointe à la théorie de sa construction.

143. Dans l'exposé que nous venons de faire des connaissances préliminaires relatives à la théorie du calorique, nous sommes partis des deux effets les plus remarquables de ce fluide, la dilatation et l'élévation de température qu'il produit dans les corps, à mesure qu'il s'introduit entre leurs molécules. Mais le développement des phénomènes exige que nous considérions maintenant le calorique, tel qu'il est en lui-même, lorsqu'il

q..

n'obéit qu'à ses forces naturelles, et qu'il est dégagé des espèces d'entraves que son séjour dans l'intérieur des corps met à son action. Personne ne nous paraît avoir conçu plus heureusement ce sujet que M. Pierre Prevost, ni avoir mieux saisi les propriétés qu'il convenait d'attribuer ici au calorique, pour que la théorie qui en naîtrait fût d'accord avec l'observation (1). Nous nous conformerons, dans ce qui va suivre, aux principes de ce célèbre physicien, à quelques modifications près, qui ne tendent qu'à en simplifier les applications.

### *Calorique rayonnant.*

144. Telle est donc la manière dont le calorique, dans son état de liberté, exerce sa force expansive, que ses particules ont un mouvement rapide, qui se fait en ligne droite, tant qu'aucun obstacle ne l'arrête. Ces particules, en s'élançant comme à la file, laissent entre elles des intervalles incomparablement plus grands que leurs diamètres; d'où il arrive que quand différentes files se croisent, les molécules de chacune trouvent toujours un passage libre, pour traverser les routes suivies par les autres, en sorte que le mouvement général ne trouble point les mouvemens particuliers. Nous verrons dans la suite que ces propriétés du calorique lui sont communes avec la lumière, au moins dans l'opinion Newtonienne que nous avons adoptée.

D'après ces premières notions, on doit concevoir que, dans un espace quelconque, où le calorique est libre de se propager, il existe, à toutes les températures, une multitude innombrable de rayons du même fluide, qui se meuvent dans toutes les directions imaginables; d'où il résulte que chaque point de l'espace dont il s'agit, est comme un double centre, d'où partent et vers lequel tendent, de tous les côtés, des suites non interrompues de ces mêmes rayons.

---

(1) Recherches physico-mécaniques sur la chaleur. Paris, 1792. Mémoire sur l'équilibre du feu, Journ. de Phys., 1792, p. 314 et suiv.

145. Dans cet état, où le calorique abandonné à lui-même, s'élance comme la lumière, on lui donne le nom de *calorique rayonnant*. C'est sous cette forme, que l'on pourrait appeler sa forme naturelle, qu'il traverse continuellement l'air; et il la conserve, posé certaines conditions, à la rencontre des corps solides. Si la surface qui le reçoit est lisse et polie, surtout si c'est celle d'un miroir métallique, les rayons qui y arrivent obliquement, se relèvent, en faisant avec elle un angle égal à celui de leur incidence. Cette espèce de déviation, à laquelle on a donné le nom de *réflexion*, a lieu également, et suivant la même loi, par rapport à la lumière, ainsi que nous l'expliquerons, en parlant de ce dernier fluide.

Les propriétés du calorique rayonnant ont été en partie constatées, depuis long-temps, par Schéele, à l'aide de l'expérience, et l'on est étonné de la sagacité avec laquelle il les a aperçues, à une époque où ce sujet était presque entièrement neuf (1). Pour mieux étudier les caractères de ce fluide ainsi dégagé de toute contrainte, il avait choisi une des circonstances où les phénomènes qu'il produit se montrent d'une manière plus sensible, savoir, celle où il sort d'un poêle dans lequel le bois brûle avec activité, et dont on a laissé la porte ouverte. Le calorique dans cet état, ainsi que le remarque Schéele, s'élance, comme un torrent, à travers l'air environnant, et son émission a une si forte tendance pour se faire en ligne droite, que sa direction n'est point changée par le courant d'air qui se meut constamment vers la bouche du poêle, pour remplacer celui qui s'échappe, en vertu de la dilatation produite par la chaleur intérieure. En vain même agite-t-on fortement l'air situé devant la porte du poêle : la marche des rayons du calorique n'en est pas plus dérangée que celle des rayons solaires.

146. A cette première observation de Schéele, succède celle de la réflexion du calorique rayonnant, sur la surface des miroirs métalliques, suivant les mêmes lois que pour la lumière ;

---

(1) Traité chimique de l'air et du feu, traduit par Dietrich, 1781 ; p. 113 et suiv.

et si le miroir est concave, l'action du calorique se concentre à son foyer, en sorte qu'un morceau de soufre placé à ce foyer s'allume dans l'instant.

147. Tant que le calorique conserve sa forme rayonnante, soit qu'il se réfléchisse à la surface d'un corps, ou qu'il en traverse librement la masse, il n'affecte point la température de ce corps et n'en altère en aucune manière les dimensions. Schéele a encore observé cette permanence de la température, dans le cas de la réflexion. Son miroir concave de métal ne fut point échauffé, quoiqu'exposé à l'effluve abondant de calorique qui agissait avec tant d'énergie sur un corps placé à l'endroit du foyer. Mais si l'on enduisait la surface du miroir d'un peu de suie, en la passant au-dessus d'une chandelle allumée, le calorique qui tombait sur ce miroir, perdait sa forme rayonnante, et s'unissait au métal, qui s'échauffait bientôt jusqu'au point de ne pouvoir plus être manié impunément.

### *Calorique sensible et Calorique latent.*

148. Cette dernière observation nous présente le calorique sous un nouvel état auquel il passe, toutes les fois qu'il s'engage dans l'intérieur des corps. Il exerce alors sa force ordinairement de deux manières, comme nous l'avons déjà indiqué (137), l'une en échauffant les corps et en élevant leur température, l'autre, en leur faisant subir une augmentation de volume, à mesure qu'il écarte leurs molécules, en vertu de son élasticité.

149. Or la distinction de ces deux effets nous conduit à en admettre une dans la manière de concevoir la cause qui les produit. Elle consiste en ce qu'il y a toujours une partie de l'action du calorique, qui est employée uniquement à faire monter la température, et une autre qui n'intervient que pour dilater le volume, et qui échappe aux indications du thermomètre (1).

---

(1) Le fondement de cette distinction, qui est due au célèbre Laplace, se trouve dans un très beau Mémoire publié par ce savant, conjointement avec Lavoisier. Mémoires de l'Acad. des Sciences, 1780, p. 383.

Nous pouvons donc, pour plus de simplicité, considérer le calorique qui s'introduit dans un corps, comme étant composé de deux portions destinées à produire les deux actions dont nous venons de parler. Nous appellerons *calorique sensible* celle qui échauffe le corps, et *calorique latent* celle qui le dilate.

150. Pour mieux faire ressortir la distinction dont nous venons de parler, nous citerons ici, en prenant l'air pour exemple, quelques expériences sur lesquelles nous nous proposons de revenir, dans la suite, avec plus de détail.

Imaginons qu'une masse d'air étant d'abord resserrée de toutes parts, on augmente, à l'aide d'un moyen quelconque, l'espace qu'elle occupait, de manière, par exemple, que l'accroissement soit d'un dixième. Cet air s'étendra, pour remplir le vide, et, après la dilatation, sa température sera encore la même. Or il n'aura pu se dilater, en conservant ainsi sa température, sans enlever du calorique aux corps environnans, comme nous le ferons voir ailleurs. Mais ce calorique aura pris tout entier la forme de calorique latent, pour opérer la dilatation.

On peut aussi supposer que l'air, sans être soumis à l'influence des corps environnans, reçoive dès le premier instant une quantité de calorique égale à celle qu'il leur aurait dérobée. Cette quantité disparaîtra de même pendant la dilatation à laquelle son action sera employée tout entière, en sorte que la température finira encore par se retrouver au même degré qu'avant l'expérience.

Concevons au contraire qu'au lieu de permettre à l'air de s'étendre, on le tienne resserré dans l'espace primitif, et qu'en même temps on lui communique une certaine quantité de calorique additionnel. Toute cette quantité restera à l'état de calorique sensible, pour élever la température.

Imaginons enfin que l'on communique à l'air cette même quantité de calorique, plus celle qui avait servi à le dilater la première fois, et qu'ensuite on augmente encore d'un dixième l'espace dans lequel il était renfermé. Les deux effets qui avaient lieu séparément dans les expériences précédentes s'opéreront simultanément, c'est-à-dire que la quantité qui avait produit

la dilatation, en passant à l'état de calorique latent, agira encore ici de la même manière, tandis que l'autre, conservant la forme de calorique sensible, fera monter la température du même nombre de degrés. Or c'est ce qui a lieu, en général, à l'égard des corps dans l'intérieur desquels le calorique s'accumule de plus en plus.

Le phénomène prendra une marche inverse, si l'on suppose qu'une certaine quantité de calorique s'échappe de l'intérieur d'un corps. Celui-ci éprouvera alors un refroidissement accompagné d'une diminution de volume. Le premier effet sera dû au dégagement d'une portion de calorique sensible, et le second à celui de la portion correspondante de calorique latent.

On peut obtenir aussi les deux effets séparément, en faisant subir à l'air des variations qui présentent de même l'inverse de celles que nous avons citées; c'est ce qu'on verra par les résultats des expériences qui concernent cet objet, et dont l'exposé trouvera sa place dans un autre article.

151. Pour donner une idée encore plus juste de ce qui se passe dans les phénomènes dont nous venons de parler, nous ne devons pas omettre une différence relative à la marche des actions exercées par les deux parties qui sont censées sous-diviser la totalité du calorique qu'un corps reçoit dans son intérieur. Elle consiste en ce que la partie qui reste à l'état de calorique sensible est proportionnelle aux élévations de température dont elle est la cause, au lieu que la partie qui devient latente, et qui produit la dilatation, suit un rapport qui communément ne s'accorde pas avec les élévations de température, mais qui subit d'un instant à l'autre des inégalités, suivant le plus ou moins de facilité du corps pour se prêter à l'action de cette partie, à raison de la distance entre ses propres molécules, et des autres modifications susceptibles de varier avec la dilatation elle-même. Cette observation nous sera utile, lorsque nous traiterons du thermomètre.

*Équilibre du Calorique.*

152. Pendant le passage à l'équilibre de température entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, et que l'on suppose séparés, ces corps s'envoient continuellement l'un à l'autre des quantités de calorique rayonnant, qui tendent vers l'égalité; et c'est au terme où elle a lieu, que l'équilibre se trouve établi. De plus, une partie des rayons envoyés par chaque corps est émise de son intérieur, et une partie de ceux qu'il reçoit s'y introduit; et c'est de l'une et de l'autre partie que dépendent les variations de la température et du volume. Le reste des rayons envoyés ou reçus provient des réflexions qui ont lieu à la surface, et n'a, comme nous l'avons déjà dit, aucune influence sur la température; sur quoi nous remarquerons que les surfaces qui sont ternes et inégales conservent néanmoins la propriété de réfléchir, jusqu'à un certain point, le calorique rayonnant, dont l'analogie avec la lumière se soutient encore dans ce cas.

155. L'émission et l'absorption du calorique comparées soit entre elles, soit avec la réflexion du même fluide, nous fournissent deux principes sur lesquels repose, en grande partie, l'explication des phénomènes dans lesquels les corps sont placés hors du contact. L'un consiste en ce que le pouvoir d'émettre le calorique interne, que nous nommerons *le pouvoir émissif*, et celui d'absorber le calorique qui vient du dehors, ou *le pouvoir absorbant*, s'accroissent et diminuent par des degrés égaux dans un même corps. Si l'un est doublé ou triplé, par l'effet de quelque circonstance, l'autre le sera pareillement. Le second principe, est que le pouvoir réfléchissant, à mesure qu'il varie relativement à un même corps, détermine une égale variation en sens contraire dans le pouvoir d'émettre ou d'absorber le calorique; autant l'un augmente, autant l'autre diminue, et réciproquement; en sorte que tout ce qu'un corps, que l'on suppose avoir reçu un nouveau degré de poli, réfléchit

de plus qu'auparavant, sur une quantité donnée de calorique, est la mesure de ce qu'il émet ou absorbe de moins.

154. Mais pour procéder par degrés, dans le développement des phénomènes, concevons d'abord deux corps A et B dont le pouvoir réfléchissant soit nul, en sorte que tout le calorique rayonnant qu'ils lancent l'un vers l'autre, provienne de leur intérieur. Concevons de plus que ces corps étant en présence l'un de l'autre, la température de A soit plus élevée que celle de B. Ils s'enverront, comme par échange, une portion de leur calorique, sous forme rayonnante. Mais comme A est plus chaud que B, il lui en enverra davantage dans un temps donné, qu'il n'en recevra de lui; en sorte que la quantité de calorique perdue par B étant plus que compensée, au lieu que, relativement au corps A, il n'y aura point compensation, la température de B s'élèvera, tandis que celle de A s'abaissera. A mesure que les échanges se multiplieront, la différence entre les deux températures diminuera, et au terme où les quantités échangées seront devenues égales, il y aura égalité entre les températures elles-mêmes, et alors chaque corps continuera d'envoyer à l'autre autant de calorique qu'il en recevra, et cette uniformité d'échanges persévérera, tant que le système restera à la même température.

155. Imaginons, pour fixer nos idées, que la quantité de calorique rayonnant que chaque corps reçoit ou envoie, dans cet état d'équilibre, étant composée de quatre cents rayons, la surface de A acquière tout-à-coup la faculté de réfléchir à l'extérieur deux cents rayons, parmi les quatre cents qui lui arrivent. Le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant se trouveront diminués d'autant (153), en sorte qu'au lieu de quatre cents rayons qui étaient émis ou absorbés par le corps A, dans un temps donné, il n'y en aura plus que deux cents. Ainsi les deux corps continueront de s'envoyer l'un à l'autre quatre cents rayons; mais à l'égard de B, tout sera émis ou absorbé, et par rapport à A, une moitié sera réfléchiée, et l'autre sera émise ou absorbée, d'où l'on voit que l'uniformité de température continuera d'avoir lieu dans chacun des deux corps.

Supposons enfin que B acquière à son tour un pouvoir réfléchissant, mais qui soit seulement une fois moindre que celui de A. Il sera facile d'en conclure que parmi les quatre cents rayons envoyés ou reçus par B, trois cents seront soumis à l'émission ou à l'absorption, et les cent autres à la réflexion, tandis que les choses se passeront encore de même par rapport au corps A; c'est-à-dire, qu'il émettra ou absorbera deux cents rayons, et en réfléchira deux cents. De cette manière, la répartition qui se fait, entre la surface et l'intérieur de chaque corps, de la quantité de calorique que ce corps reçoit ou envoie continuellement, satisfait en même temps, au rapport entre les pouvoirs réfléchissans, et à la condition d'une température constante.

156. Il existe un autre mode de passage à l'état d'équilibre, où le calorique sensible conserve sa forme. C'est celui qui a lieu entre plusieurs corps en contact les uns avec les autres, par des températures différentes. Alors une portion du calorique renfermé dans les corps plus chauds, s'introduit immédiatement dans ceux qui sont plus froids, et s'y répand de proche en proche, avec plus ou moins de difficulté, avec plus ou moins de lenteur, jusqu'à ce qu'il y ait partout uniformité de température.

### *Influence de la capacité de Calorique.*

157. Reprenons maintenant le cas où les corps en commerce de calorique sont séparés les uns des autres, et examinons de plus près la marche du phénomène, pendant les momens qui précèdent l'équilibre. D'une part, les réflexions qui ont lieu à la surface des corps dépendent du rapport entre les pouvoirs réfléchissans. D'une autre part, l'effet du calorique qui s'engage dans l'intérieur des corps est soumis à l'influence de la nature particulière de chaque corps, ce qui apporte de grandes variations dans les quantités de calorique qui doivent être cédées ou dérobées par les différens corps, pour que l'égalité de température s'établisse. Pour mieux faire conce-

voir en quoi consiste cette influence, supposons d'abord un corps A, placé à distance, entre deux autres corps B et C, égaux en masse, et qui aient une même température, mais plus basse que celle du corps A. Si les trois corps sont homogènes, B et C, au moment de l'équilibre, auront reçu de A des accroissemens égaux de calorique interne, et le rapport entre la partie employée à déterminer l'élévation de température et celle qui produira la dilatation, sera le même de part et d'autre.

L'égalité aura encore lieu, dans le cas où B et C seulement seraient homogènes.

158. Il en sera tout autrement, si les trois corps sont hétérogènes, ou même si l'un des corps B et C diffère de l'autre par sa nature. Alors la condition de l'équilibre exigera que le corps A ait cédé aux deux autres des quantités inégales de calorique, et celle que chacun de ces derniers corps aura acquise sera plus ou moins considérable, suivant que ce corps, en vertu de sa nature particulière, de sa contexture et des autres circonstances, aura besoin d'employer plus ou moins de calorique à son élévation de température et à la dilatation qui en est la suite. On conçoit, par exemple, que la portion de calorique requise pour la dilatation devra être plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, si l'affinité qui détermine la cohésion des molécules du corps oppose plus de résistance à leur écartement. C'est cette disposition à s'emparer de tout le calorique nécessaire pour produire le double effet dont nous venons de parler, que nous nommons en général *capacité de calorique*.

Ainsi, dans l'hypothèse où B aurait une capacité plus grande que celle de C, elle exigerait que le calorique fût plus accumulé dans l'intérieur du même corps, pour que le résidu de la force expansive naturelle de ce fluide fût égal à celui de la force du calorique de C, qui serait moins abondant, mais en même temps moins captivé. De là vient que si un thermomètre appliqué au corps B restait stationnaire, il le serait également, lorsqu'ensuite on le présenterait au corps C, parce que les tensions du calorique étant égales dans les deux corps, le ther-

momètre, à son tour, ne pourrait se trouver en équilibre de tension avec le corps B, sans y être aussi avec le corps C.

159. Les choses ont lieu d'une manière analogue dans le passage à l'état d'équilibre entre des corps de différentes natures, en contact les uns avec les autres. Les quantités de calorique cédées par les corps plus chauds à ceux qui le sont moins, dépendent, toutes choses égales d'ailleurs, des capacités de calorique. Nous n'en dirons pas davantage, pour le moment, sur cette propriété, dont la notion trouvait ici naturellement sa place. Mais ce sujet est assez important pour qu'il soit nécessaire de le reprendre dans la suite, et d'en faire la matière d'un article séparé.

#### *Influence de la Faculté conductrice.*

160. Une dernière cause, qui ne doit pas non plus être omise, influe sur la durée du passage des corps à l'équilibre thermométrique. Cette cause est la faculté conductrice du calorique, c'est-à-dire la facilité ou la promptitude plus ou moins grande avec laquelle une même quantité de calorique se propage dans l'intérieur des corps de diverse nature. Il en résulte que si l'on suppose deux corps également chauds, qui aient une même capacité de calorique, mais qui diffèrent par leur faculté conductrice, et si l'on place ces corps au milieu de deux masses d'air plus chaudes ou plus froides du même nombre de degrés, ils emploieront des temps inégaux pour arriver à l'équilibre de température soit entre eux, soit avec l'air environnant, en sorte que le moment de cet équilibre se trouvera retardé relativement au corps dont la faculté conductrice sera moindre.

161. On a observé que les métaux sont, en général, de très bons conducteurs du calorique, tandis que le verre, la résine et autres substances semblables ne possèdent que faiblement la faculté de le conduire. L'artiste qui souffle une boule à l'extrémité d'un tube de verre, tient impunément ce tube à une distance assez petite de la partie qui est dans un état d'incandes-

cence, tandis qu'il lui serait impossible de supporter la chaleur qu'acquerrait, dans le même cas, un tube de fer ou de quelqu'autre métal. Tout le monde sait qu'un bâton de cire à cacheter, réduit à une petite portion de sa longueur, peut être employé au même usage, sans exiger d'autre précaution que de laisser un intervalle de quelques millimètres entre la main qui le tient et la partie fondue. Le progrès de la chaleur, dans ce cas, s'étend à peine plus loin que celui de la fusion, ou même de l'inflammation.

162. Les mêmes causes qui troublent ou rétablissent l'équilibre thermométrique entre les divers corps renfermés dans un même espace, agissent pour déterminer les sensations variées que nous éprouvons, suivant les différentes températures des corps qui sont à notre portée. Une substance qui est en contact avec notre main, lui cède une portion de son calorique, qui dépend, toutes choses égales d'ailleurs, du rapport entre les capacités de calorique, et à l'occasion de la sensation qui en résulte, nous disons de cette substance qu'elle est chaude. Au contraire, une substance que nous touchons, et dont la température est plus basse que celle de notre main, lui enlève une portion de son calorique ; et à l'occasion de la sensation qu'excite en nous cette privation de calorique, nous disons que la substance est froide. Ainsi la température de notre corps est à notre égard la limite du chaud et du froid ; mais au fond, il n'y a ici qu'une différence du plus au moins, entre deux modifications qui nous paraissent opposées, d'après le témoignage de nos sens. Aussi, à proportion que la limite varie, c'est-à-dire que la température de notre corps s'élève et s'abaisse, nous jugeons froide la même substance qui nous avait paru chaude dans une autre circonstance, et réciproquement.

On sait encore que nous trouvons les caves froides pendant l'été, et chaudes pendant l'hiver. Le contraste de ces deux sensations provient de ce que la température des souterrains dont il s'agit étant à peu près constante, son degré est intermédiaire entre ceux auxquels répond la température de notre corps dans les deux saisons.

## 2. Application de la Théorie précédente à divers Phénomènes.

Nous avons déjà exposé plusieurs faits qui paraissent ne pouvoir être expliqués d'une manière plus heureuse, que par le rayonnement du calorique, dans l'hypothèse d'une matière productrice de la chaleur. Mais ce sujet exige de nouveaux développemens relatifs à de nouvelles expériences, pour motiver, en quelque sorte, l'admission d'un rayonnement réciproque et d'une espèce de commerce non interrompu du même fluide, entre les divers corps situés en présence les uns des autres; pour montrer comment son action se modifie, à l'aide d'un simple changement dans le poli et l'éclat des surfaces, et comment enfin tous les mouvemens de cet agent invisible sont décelés par le thermomètre qui leur sert comme de témoin. Ce sont autant d'inductions qui vont découler, comme d'elles-mêmes, d'une suite de phénomènes très dignes d'attention, dont la liaison intime avec les principes établis précédemment, en fera sentir à la fois la justesse et la fécondité.

Dans le nombre des savans qui ont contribué à étendre la sphère de nos connaissances, relativement à cet objet, il en est deux, M. le comte de Rumford et M. Leslie, que nous aurons principalement occasion de citer. Le premier s'est rendu doublement célèbre par une suite d'expériences ingénieuses, dont les résultats intéressans lui assignent un rang distingué parmi les physiciens, et dont les applications utiles le placent parmi les bienfaiteurs de l'humanité (1). Le travail de l'autre, indépendamment de la beauté et de la variété des faits, est remarquable par la profondeur que l'auteur a mise dans sa manière d'en étudier la marche, et d'en développer les conséquences (2).

---

(1) Voyez entre autres l'ouvrage de ce savant, qui a pour titre : *Mémoires sur la Chaleur*, Paris, an XIII (1804).

(2) *An Experimental Inquiry into the nature and propagation of heat*. London, 1804.

Il règne presque partout entre les faits auxquels ces deux physiciens sont parvenus, sans s'être concertés, un accord bien précieux dans des recherches aussi délicates. La divergence n'a lieu que par rapport aux théories qu'ils ont adoptées, et dont nous donnerons dans la suite une idée, d'après laquelle on pourra les comparer, soit entre elles, soit avec celle qui nous a paru mériter la préférence.

### *Appareils destinés pour les Expériences.*

163. Commençons par faire connaître les principaux instrumens employés par les deux physiciens. M. de Rumford en a imaginé un qu'il nomme *thermoscope*, et qui consiste dans un tube de verre AB (*fig. 23*) recourbé vers ses deux extrémités, dont chacune est renflée en forme de boule M ou N. L'intérieur du tube est rempli d'air, à l'exception d'un petit espace occupé par une bulle *g* d'alkohol teint en rouge, de manière que quand la température de l'appareil est uniforme, la bulle doit se trouver au milieu de la partie AB du tube, laquelle est maintenue par un support, dans une position horizontale. M. de Rumford donne à cette bulle le nom d'*index*.

Les choses étant dans cet état, si l'on place vis-à-vis d'une des boules, telle que M, un corps dont la température soit plus élevée que celle du thermoscope, le calorique rayonnant que ce corps envoie à l'instrument étant plus abondant que celui qu'il en reçoit par échange, l'air renfermé dans la boule M s'échauffera, et son élasticité se trouvant augmentée, l'index sera chassé vers la partie occupée par l'autre boule N. Le contraire arrivera, si la température du corps soumis à l'expérience est plus basse que celle du thermoscope. Telle est la sensibilité de cet instrument, que quand il est à la température de 10 ou 12 degrés de Réaumur, si l'on tient la main ouverte, à la distance d'un mètre, ou trois pieds, d'une des boules, le calorique émané de cette main suffit pour faire avancer l'index de plusieurs millimètres du côté opposé.

Les corps que l'on présentait à l'instrument, dans les expé-

riences ordinaires, étaient des vases cylindriques de laiton, dont la surface avait un beau poli. On les remplissait, suivant les circonstances, d'eau plus ou moins chaude ou de glace, dont la température était indiquée par un thermomètre plongé dans cette eau, et on les disposait de manière que leurs bases étaient tournées vers les boules du thermoscope.

164. Dans l'appareil de M. Leslie, le calorique qui produit les phénomènes est réfléchi par la surface d'un miroir de fer blanc, d'une figure parabolique ou elliptique, auquel l'auteur donne le nom de *réflecteur*. Les corps d'où émane le calorique, et qui font la même fonction que les cylindres dont se sert M. de Rumford, sont des vases cubiques de fer-blanc, destinés aussi à contenir de l'eau plus ou moins chaude, dans laquelle on plonge de même un thermomètre ordinaire qui en fait connaître la température. M. Leslie laisse à l'une des faces latérales du cube son poli et son éclat. Il colle une feuille de papier sur la face opposée, ou il peint cette face avec du noir de fumée. La garniture des deux autres faces varie aussi, suivant le but que l'on se propose. On place le vase cubique à une certaine distance du réflecteur, de manière qu'ayant son centre situé sur l'axe de ce réflecteur, il tourne vers sa concavité la face qui est le sujet de l'expérience.

Pour mesurer l'action du calorique, M. Leslie emploie, au lieu du thermoscope décrit ci-dessus, un thermomètre particulier dont le tube est courbé sous la forme de la lettre U, et dont les deux branches sont terminées par deux boules égales. L'auteur donne à l'une de ces boules, le nom de *boule focale*, parce que, dans les expériences, elle occupe toujours le foyer du réflecteur. Lorsque cette boule est échauffée, l'air intérieur, en se dilatant, pousse de haut en bas une colonne d'acide sulfurique teint en rouge avec du carmin, qui passe, en partie, de la branche adjacente dans l'autre branche, où son mouvement est indiqué par une graduation appliquée à cette dernière branche. Chaque degré de l'échelle est un millième de l'intervalle compris entre le terme de la congélation et celui de l'eau bouillante. L'auteur appelle cet instrument

*thermomètre différentiel*, parce que le mouvement de la liqueur dépend de la différence d'élasticité entre les quantités d'air renfermées dans les deux boules, et dont l'une est soumise à l'influence du foyer, tandis que l'autre reste à la température du lieu.

Entrons maintenant dans le détail des expériences, en remontant jusqu'à celles qui ont précédé les travaux des deux savans dont nous venons de parler, et essayons de ramener à un petit nombre de points fixes cette grande diversité de résultats que les unes et les autres ont offerte.

### *Effets de la réflexion du Calorique.*

165. Le calorique est susceptible de subir une réflexion semblable à celle de la lumière. Nous avons déjà cité (146) une expérience de Schéele, dans laquelle il s'est servi d'un miroir concave de métal, pour prouver cette propriété du calorique. Saussure et Pictet en ont confirmé depuis l'existence, à l'aide d'un appareil plus susceptible de se prêter à des observations variées.

Ces deux savans ayant fait rougir fortement un boulet de fer de 54 millimètres, ou 2 pouces, de diamètre, le laissèrent refroidir au point qu'il n'était plus lumineux, même dans l'obscurité. Ils avaient préalablement disposé deux miroirs concaves, l'un vis-à-vis de l'autre, à environ quatre mètres ou douze pieds de distance; ils fixèrent le boulet au foyer de l'un, tandis qu'ils tenaient un thermomètre d'air au foyer de l'autre. La chambre où se faisait l'expérience était exactement fermée, et toutes les précautions avaient été prises pour écarter tout ce qui aurait pu occasionner des variations accidentelles dans la température de l'air. A peine le boulet eut-il été placé à l'un des foyers, que le thermomètre qui occupait l'autre, et qui auparavant marquait 4 degrés au-dessus de zéro, commença à monter, et parvint, en six minutes, à 14 degrés  $\frac{1}{2}$ , tandis qu'un second thermomètre suspendu hors du foyer, à la même

distance et du boulet et de l'observateur, ne monta qu'à 6 degrés; d'où il résulte que, dans cette expérience, la réflexion du calorique rayonnant a élevé la température de 8 degrés  $\frac{1}{2}$ . Dans la vue d'écarter encore mieux le soupçon que ce phénomène fût l'effet d'une lumière imperceptible pour l'œil, Pictet a répété l'expérience, en substituant au boulet de fer un matras rempli d'eau bouillante, et le thermomètre situé à l'autre foyer a indiqué une élévation de température de plus d'un degré (1).

Pour expliquer ces résultats, supprimons d'abord les miroirs par la pensée; le boulet et le thermomètre feront directement entre eux des échanges continuels de calorique, qui, étant à l'avantage du thermomètre, élèveront sa température. Replaçons maintenant les miroirs; de nouveaux échanges auront lieu, à l'aide des rayons qui, en partant de chacun des deux corps, iront frapper la surface du miroir voisin, et réfléchis parallèlement à l'axe vers l'autre miroir, convergeront, après une seconde réflexion, vers le foyer de celui-ci. Or il est facile de voir que l'effet de cette double réflexion ajouté à celui qui provenait des échanges directs, devait accélérer très sensiblement l'élévation de température dans le thermomètre.

166. Ces expériences ont été suivies d'une autre qui a présenté un de ces faits inattendus, capables de séduire l'observateur, s'il ne laissait le temps à la méditation de prendre la place de la surprise. L'appareil ayant été disposé comme précédemment, on plaça un thermomètre d'air au foyer d'un des miroirs, et un matras plein de neige au foyer de l'autre; à l'instant le thermomètre descendit de plusieurs degrés, et remonta ensuite, aussitôt qu'on eut enlevé le matras: celui-ci ayant été remis au foyer du même miroir, on versa de l'acide nitrique sur la neige, et l'augmentation de froid qui en résulta fit descendre le thermomètre de cinq ou six degrés (2).

(1) Saussure, Voyage dans les Alpes, n° 926.

(2) Essais de Physique, par Pictet, Genève, 1790, p. 81 et suiv. On trouve aussi dans cet ouvrage les détails relatifs aux expériences précédentes.

Ce phénomène qui paraît indiquer, au premier aperçu, une émission réelle de rayons frigorifiques transmis du matras rempli de neige au thermomètre, à l'aide d'une double réflexion sur la surface des miroirs, n'est cependant qu'une espèce d'inversion des effets que nous avons déjà expliqués, d'après la seule considération du calorique rayonnant. Sans la présence des miroirs, déjà le thermomètre éprouverait un abaissement marqué de température, en perdant aux échanges qu'il ferait avec le matras. Mais de plus, il s'établit, par l'intermédiaire des miroirs, un grand nombre de nouveaux points de communication entre le matras et le thermomètre, et cette circonstance détermine une succession d'échanges beaucoup plus nombreuse et plus rapide que celle qui aurait lieu, sans l'intervention des miroirs, entre le thermomètre et les corps environnans dont ces miroirs interceptent les actions. Et comme d'ailleurs la grande différence de température rend les échanges très désavantageux pour le thermomètre, il en résulte que, tout compensé, il doit subir un refroidissement très sensible. On a ici le même avantage, pour diminuer la chaleur du thermomètre, qu'on avait pour l'accroître, lorsqu'au lieu d'un corps plus froid que lui, on plaçait au foyer de l'autre miroir un corps plus chaud; seulement, dans l'expérience du matras, l'émission la plus abondante de calorique prend une route opposée à celle qu'elle suivait dans l'expérience du boulet; et c'est ce changement de direction qui en impose à l'imagination, en lui offrant une véritable réflexion du calorique, sous l'apparence d'un froid réfléchi (1).

---

(1) Dans cette explication, ainsi que dans la précédente, nous avons fait abstraction des échanges de calorique rayonnant, qui ont lieu directement entre les miroirs et les corps placés à leurs foyers, parce que ces échanges influent seulement sur les quantités de chaud ou de froid produites par les réflexions, et non sur la disposition des corps à subir l'une de ces affections plutôt que l'autre.

*Influence du Poli et de l'Éclat des Surfaces.*

167. Nous avons déjà parlé (147) de l'influence qu'ont le poli et l'éclat des surfaces, sur la quantité soit de calorique réfléchi, soit de celui qui est émis ou absorbé. Lorsqu'on se sert de l'appareil de M. de Rumford, le thermoscope reste stationnaire à égale distance entre deux cylindres également polis, dont la température est la même, soit lorsqu'elle surpasse celle de l'instrument, soit lorsqu'elle lui est inférieure (1). On conçoit aisément que cela doit être, puisque les échanges que les cylindres font, dans chaque cas, avec l'instrument, étant semblables, leurs effets doivent être les mêmes pour augmenter ou diminuer l'élasticité des deux masses d'air situées de part et d'autre de l'index, en sorte que celui-ci conserve son équilibre.

Maintenant si l'on noircit la base d'un des cylindres, lorsque la température du thermoscope est plus basse que celle de ces cylindres, que l'on suppose toujours également chauds et à égale distance des deux boules, l'index se rapproche de la boule tournée vers le cylindre à base polie (2). Mais si la température du thermoscope est plus élevée que celle des cylindres, l'index est chassé vers la boule qui regarde le cylindre noirci.

Pour saisir la raison de cette différence, il suffit de remarquer que la diminution qu'a subie le pouvoir réfléchissant du cylindre noir, a déterminé un accroissement proportionnel soit de pouvoir émissif, soit de pouvoir absorbant (153). Mais lorsque les cylindres sont plus chauds que le thermoscope, l'action du pouvoir émissif du cylindre noir est plus favorisée par la température de ce cylindre, que celle de son pouvoir absorbant ne l'est par la température du thermoscope; d'où il suit que les échanges entre les cylindres et l'instrument étant plus avantageux à ce dernier, dans la partie qui regarde le

---

(1) Mém. sur la Chal. p. 41.

(2) *Ibid.* p. 44.

cylindre noir, l'air devient en même temps plus chaud et plus élastique du même côté, et l'index s'avance du côté opposé. Si au contraire la température du thermoscope est plus élevée que celle des cylindres, on conçoit que c'est l'effet inverse qui doit avoir lieu. Alors le cylindre noir gagne plus aux échanges que le cylindre poli, et l'index est chassé du côté du cylindre noir, où l'air est moins échauffé, à raison des pertes plus grandes que l'instrument fait de ce même côté.

168. Les expériences de M. Leslie l'ont conduit à des résultats analogues. Ce savant ayant rempli d'eau bouillante le vase cubique de fer-blanc dont nous avons parlé (164), le disposa d'abord de manière que la face noire regardait le réflecteur. Bientôt le thermomètre différentiel monta à 100°. La face brillante fut ensuite tournée vers le réflecteur; le thermomètre différentiel descendit rapidement à 12° (1).

169. Les observations précédentes mettent en évidence la cause d'un fait observé depuis long-temps; savoir, que les habits noirs sont chauds par un soleil d'été, tandis qu'ils sont bien éloignés de l'être à l'ombre, surtout par un temps froid. Car lorsqu'étant vêtus de noir, nous nous trouvons exposés au soleil, notre corps est à peu près dans le même cas que le cylindre noirci, vis-à-vis d'un thermoscope plus chaud que lui, et dont la présence fait monter davantage la température de ce cylindre, que s'il était poli. Au contraire, sommes-nous exposés à l'ombre, surtout si la température de l'air est plus basse que celle de la peau? nous éprouvons un effet analogue à celui du cylindre noirci, vis-à-vis d'un thermoscope plus froid que lui, et avec lequel il fait des échanges plus désavantageux que s'il était lisse et brillant.

On sait que les surfaces blanches, à égalité de poli, réfléchissent plus de lumière que celles qui sont colorées. Ainsi, en étendant à la blancheur l'analogie qui existe d'ailleurs entre la réflexion du calorique et celle de la lumière, et en raisonnant des mêmes surfaces, à peu près comme de la base du

---

(1) An Inquiry, etc., pp. 17 et 18.

cylindre qui a conservé son éclat métallique, on en conclura que pendant l'hiver, les vêtemens blancs doivent être plus chauds que les autres, ce qui s'accorde avec un fait déjà connu par l'expérience; savoir, que ces mêmes vêtemens sont les plus frais que l'on puisse porter en été, surtout lorsqu'on est exposé aux ardeurs du soleil (1).

### *Influence des différentes Natures des Substances.*

170. La diversité de nature entre les substances influe aussi sur la quantité du rayonnement par réflexion et sur celle du calorique absorbé. Schéele avait déjà remarqué que quand on présentait à un effluve de calorique un miroir de verre, au lieu d'un miroir métallique, il retenait, au moins en grande partie, le calorique, sans lui permettre de s'échapper par la réflexion (2). M. Leslie ayant couvert de papier à écrire une des faces du vase cubique de son appareil, et une autre d'une lame de verre commun, l'effet du thermomètre différentiel qui n'était que de 12<sup>d</sup>, comme nous l'avons dit (168), lorsque le vase tournait sa face libre vers le réflecteur, monta à 98<sup>d</sup>, par l'influence de la face couverte de papier, et à 90<sup>d</sup> par celle de la face couverte de verre (3). La disposition du papier pour réfléchir le calorique étant beaucoup moindre que celle du métal, son pouvoir émissif qui variait en sens opposé, faisait croître d'autant la quantité de calorique que le réflecteur recevait du papier, et qui de là rayonnait vers la boule focale. D'une autre part, le verre dont le pouvoir réfléchissant surpassait peu celui du papier, et était très inférieur à celui du métal, agissait par émission un peu moins que le premier et beaucoup plus que le second.

171. On concevra, d'après les mêmes principes, pourquoi

(1) Mém. sur la Chaleur, pp. 125 et 126.

(2) Traité chimique de l'air et du feu. Paris, 1781, pp. 121 et 125.

(3) An Inquiry, etc., pp. 17 et 18.

le thermomètre différentiel n'indique qu'un léger effet, lorsqu'on enveloppe la boule focale d'une feuille d'étain, et cela dans le cas où la surface noire du vase cubique est tournée vers le réflecteur. L'effet n'est guère plus sensible lorsque la boule focale étant nue, on substitue au réflecteur métallique un miroir concave de glace (1). Dans cette dernière circonstance, la plus grande partie du calorique que le vase cubique lance vers la glace étant absorbée par celle-ci, est perdue pour le thermomètre différentiel.

172. M. Leslie a imaginé une manière piquante de faire contraster les résultats des expériences précédentes. Il prend deux lames de verre, et colle une feuille d'étain sur l'une des faces de chacune d'elles. Il les applique l'une sur l'autre en sorte que les faces étamées soient en contact, et les dispose verticalement, comme un écran, entre le vase cubique rempli d'eau chaude et le thermomètre différentiel. Au bout d'un instant, cet instrument indique 18<sup>d</sup> de chaleur acquise. L'auteur retourne ensuite les deux lames de verre, de manière que les deux faces étamées se trouvent en dehors. La liqueur du thermomètre descend alors vers le bas de l'échelle (2). Dans ce second cas, la feuille d'étain qui regarde le vase cubique, repousse, par la réflexion, une grande partie du calorique qu'elle reçoit; l'autre partie passe dans les lames de verre et y reste presque tout entière à l'état de calorique sensible, soit par une suite de la nature même du verre, soit parce que la feuille d'étain qui est du côté opposé a un pouvoir réfléchissant qui ne laisse que peu d'action au pouvoir émissif, en sorte que tout le calorique qui est sorti du vase cubique est à peu près perdu pour le miroir. Mais lorsque les faces étamées sont en contact, le calorique lancé par le vase cubique, après s'être introduit dans la lame de verre qui est tournée vers ce vase, se répand dans les feuilles d'étain, au moyen de la communi-

---

(1) An Inquiry, etc., pp. 19 et 20.

(2) *Ibid.*, p. 35.

cation qui se fait par le contact, et enfin pénètre la seconde lame de verre, d'où il s'en échappe assez pour produire, à l'aide du réflecteur, une action très sensible sur le thermomètre différentiel.

*Circonstance remarquable où le Thermoscope reste stationnaire.*

173. Un thermoscope placé à égale distance entre deux corps semblables, reste stationnaire, lorsque sa température est moyenne entre les températures de ces corps. Dans cette expérience, l'une des plus remarquables qu'ait faites M. de Rumford, deux cylindres de mêmes dimensions étaient situés de part et d'autre d'une même boule du thermoscope, de manière qu'ils tournaient leurs bases vers deux points opposés de cette boule. La température du thermoscope, ainsi que celle de l'air environnant, étant, par exemple, plus basse de  $30^{\text{d}}$  que celle de l'un des cylindres, et plus haute du même nombre de degrés que celle de l'autre cylindre, l'index demeurait sans mouvement entre les deux cylindres, dont néanmoins les températures variaient continuellement en approchant de l'égalité (1).

Pour apercevoir la raison de cet effet singulier, il faut d'abord considérer que le rapport est le même entre les capacités de calorique du thermoscope et de chacun des deux cylindres, ainsi qu'entre les pouvoirs réfléchissans, puisque les cylindres sont semblables par leur nature, par leur forme et par leur poli. Or les quantités de calorique que le thermoscope reçoit de chaque cylindre et lui envoie, dépendent, et de ce rapport et du nombre de degrés dont la température de chaque cylindre excède celle de l'instrument ou lui est inférieure; donc, puisque ce nombre est aussi le même de part et d'autre, il en résulte que si le thermoscope reçoit du corps chaud, dans un instant donné, mille particules pour dix qu'il lui envoie, il en enverra mille au cylindre froid, pour dix qu'il recevra.

---

(1) Mém. sur la Chaleur, p. 57.

Ainsi, le thermoscope regagnant continuellement d'un côté ce qu'il perd de l'autre, conservera constamment sa température; les échanges entre les deux cylindres se feront, pour ainsi dire, à son insu par son canal (1).

174. Maintenant si l'on noircit les deux cylindres, les températures étant les mêmes, l'index restera encore immobile. Car autant la perte que fait chaque cylindre de son poli et de son éclat diminue en lui le pouvoir réfléchissant, autant elle augmente le pouvoir émissif et à la fois le pouvoir absorbant. De là il suit que si le cylindre chaud lance de son intérieur, vers le thermoscope, deux cents rayons de plus, par exemple, dans le premier instant que quand il était poli, et qu'il reçoive du thermoscope quatre rayons de plus par absorption, le thermoscope lancera vers le corps froid deux cents rayons de plus pour être absorbés, et en recevra quatre de plus par émanation de l'intérieur. Donc, tout étant compensé, l'équilibre subsistera.

*Lois du Refroidissement des corps en général, et de la Propagation de la chaleur par l'intermède des corps solides.*

175. Si l'on partage en plusieurs instans égaux, tels que des minutes, l'intervalle de temps qu'un corps emploie à se refroidir d'un nombre donné de degrés, et si l'on prend successivement des nombres de minutes qui, en partant de l'origine du refroidissement, forment une progression arithmétique, les différences correspondantes entre la température du corps et celle de l'atmosphère environnante sont en progression géométrique. Cette loi a été indiquée par Newton dans son mémoire qui a pour titre : *Echelle des degrés de chaleur et de*

---

(1) M. de Rumford avait eu la précaution de disposer des écrans d'une manière convenable, pour préserver la boule opposée à celle qui était en expérience, de l'action des corps présentés à celle-ci, et de toute influence étrangère.

*froid* (1). Pour qu'elle existe, il suffit, ainsi que l'a remarqué M. Prevost (2), qu'à chaque instant un corps, que l'on imagine placé dans un espace absolument froid, perde, par le rayonnement, une partie de sa chaleur interne, qui ait toujours le même rapport avec ce qui lui en reste. Par exemple, si dans le premier instant il perd  $\frac{1}{10}$  de toute sa chaleur, il faudra que dans le second instant, il perde  $\frac{1}{10}$  des  $\frac{9}{10}$  qui lui restent, et ainsi de suite. Et si le corps, au lieu d'être situé dans un espace sans chaleur, se trouve plongé dans un milieu moins chaud que lui, mais sans cesse renouvelé, de manière à conserver constamment sa température, la même loi aura lieu pour l'excès de chaleur du corps dont il s'agit, sur la température du milieu environnant. Car comme la portion de la chaleur du corps égale à la chaleur du milieu, échange avec celle-ci des quantités égales, le corps est dans le même cas, que s'il occupait un espace froid, avec une chaleur mesurée par la différence entre sa véritable température et celle du milieu dans lequel il est plongé.

Krafft et Richmann avaient déjà démontré cette loi par des expériences directes (3). M. de Rumford en a depuis confirmé l'existence, à l'aide d'un appareil fort simple, qui consistait dans un vase cylindrique de laiton, garni extérieurement d'une enveloppe propre à contenir la chaleur. On remplissait le vase d'eau chaude, dans laquelle était plongé un thermomètre à mercure. La marche du refroidissement comparée à la durée des temps correspondans fit reconnaître cette loi dont nous avons parlé, et que l'on peut représenter par une logarithmique, ainsi que l'a fait M. de Rumford (4).

176. Les résultats qui viennent d'être exposés, et qui sont fondés, comme on l'a vu, sur des principes dont on est rede-

(1) Transact. Philos., avril 1701, n° 2. Newtonis Opusc., t. II, p. 419.

(2) Recherches physico-mécan. sur la Chaleur, p. 23.

(3) Nova Commentaria Acad. Petrop., t. I, p. 125.

(4) Mém. sur la Chaleur, p. 12.

vable à Newton, quelque importants qu'ils soient par eux-mêmes, n'ont cependant lieu, sans variation sensible, qu'entre certaines limites de chaleur. M. de Laroche a prouvé, par des expériences décisives, que quand la température des corps était très élevée, la perte de calorique qu'ils éprouvaient, pendant un instant donné, était beaucoup plus grande qu'elle ne devait l'être dans l'hypothèse où elle aurait continué de suivre le même rapport. Il paraît que Newton, ayant renfermé ses expériences dans les limites dont nous avons parlé, s'arrêta au terme où il crut en avoir assez vu pour être assuré que la loi dont ses résultats faisaient naître l'idée était une loi générale de la nature, et jugea qu'elle devait être semblable à elle-même dans tout ce qui se trouvait au-delà du même terme.

177. M. Delaroche n'avait présenté que des résultats d'observations isolées, qui ne se rattachaient à aucune loi. MM. Dulong et Petit, ayant repris le même sujet, ont trouvé que la série entière relative au progrès du refroidissement, par toutes les températures, pouvait être sous-divisée en plusieurs séries partielles, dans chacune desquelles les différences entre les rapports de deux termes consécutifs étaient assez légères, pour que la marche qu'y suivait le phénomène fût susceptible d'être représentée, au moins d'une manière approximative, par l'expression d'une loi constante (1).

Cette manière de voir les a conduits à déterminer, pour chaque série, le rapport entre les excès de température et les termes correspondans, et elle leur a offert ainsi l'avantage de pouvoir assimiler chaque portion de série à celle dont les extrêmes répondaient aux limites entre lesquelles étaient resserrés les résultats de Newton.

178. La loi qui avait servi comme de type à tout ce qui avait été fait sur le même sujet, reproduite sous une autre forme, dans la propagation de la chaleur, par l'intermédiaire des corps solides, a fourni à M. Biot une nouvelle applica-

---

(1) Annales de Chimie et de Physique, t. VII, 1817, pp. 113, 225 et 337.

tion de l'analyse mathématique à la Physique. Voici en quoi consiste l'appareil qu'il a employé.

Supposons une barre métallique mise en communication avec une source constante de chaleur, telle qu'un vase rempli d'eau chaude ou de plomb fondu, dont on entretient la température au même degré. La chaleur qui abonde dans cette source se communiquera, de proche en proche, aux différentes parties de la barre, et si l'on considère l'état d'un point quelconque, pendant cette communication, on doit concevoir que ce point reçoit de celui qui le précède une certaine quantité de calorique dont il communique une partie au point suivant, tandis qu'une autre partie se dissipe dans l'air, soit par le contact immédiat de ce fluide, soit par le rayonnement. Tant que la perte due à ces deux causes est moindre que la quantité de calorique reçu, la température des différens points de la barre s'élève continuellement, et il est facile de juger qu'elle est plus haute dans les points plus voisins de la source de chaleur, et plus basse dans ceux qui en sont plus éloignés, de manière qu'elle forme une série de termes décroissans, en allant de l'extrémité plongée dans la même source vers l'extrémité opposée. Or, à mesure que chaque point s'échauffe, sa disposition à recevoir de nouveau calorique diminue, et en même temps la quantité de calorique qu'il perd à chaque instant diffère toujours moins de celle qu'il reçoit, et lorsque les deux quantités sont devenues égales, la communication s'arrête et l'équilibre se trouve établi.

A ce terme, si l'on prend sur la barre métallique une suite de points dont les distances à la source de chaleur forment une progression arithmétique, les excès des températures correspondantes au-dessus de celle de l'air environnant sont en progression géométrique (1).

Pour déterminer cette loi par l'observation, on avait percé dans la barre métallique des trous éloignés les uns des autres

(1) On voit aisément que la première progression est croissante, tandis que la seconde est décroissante.

de quatre décimètres. Ces trous que l'on remplissait ensuite de mercure, recevaient des thermomètres dont chacun indiquait la température du point auquel il répondait. On avait eu soin d'entretenir un courant d'air dans le lieu de l'expérience, et d'observer d'ailleurs les variations de température qui pouvaient survenir. Telle était la longueur de la barre soumise à l'expérience, que quand cette barre avait atteint l'état d'équilibre, ses points les plus éloignés de la source de chaleur n'en avaient pas éprouvé sensiblement l'influence, en sorte que leur température était à peu près la même que celle de l'air environnant. Or en prenant d'une part les différences entre les températures des divers thermomètres et celle de l'air, et d'une autre part, les distances entre les mêmes thermomètres et la source de chaleur, on trouvait que les unes et les autres suivaient un rapport conforme à la loi que nous avons indiquée.

179. Le savant auteur de ces expériences en a fait le sujet d'un problème dont il a cherché la solution par la théorie. Il est parti du principe que, quand deux corps de températures différentes sont mis en contact, la portion de chaleur que le plus chaud communique au plus froid, dans un temps très court, est proportionnelle à leur différence de température. En combinant ce principe avec les diverses quantités qui entrent comme élémens dans la manière dont la chaleur se propage, il est parvenu à une loi représentée par une logarithmique dont les abscisses se rapporteraient aux distances successives entre les différens points de la barre et le foyer commun, et les ordonnées aux excès des températures des mêmes points sur celle de l'air environnant. Les résultats déduits de cette loi, à l'aide du calcul, ont offert une conformité satisfaisante avec ceux que l'observation avait donnés immédiatement.

*Influence de certains enduits, pour faire varier le progrès du Refroidissement.*

180. Si l'on applique sur la surface d'un corps un enduit d'une nature différente, et qu'ensuite on échauffe ce corps, il

est visible que la présence de l'enduit pourra influer plus ou moins sur le progrès du refroidissement que subira le corps dont il s'agit. M. de Rumford a fait, relativement à cet objet, une de ces expériences qui sont d'autant plus intéressantes qu'elles donnent la limite des phénomènes. Ayant pris un vase cylindrique de métal dont la surface était polie et brillante, il le remplit d'eau chaude, et observa le progrès du refroidissement. Il étendit ensuite sur la surface du cylindre une simple couche de vernis qu'il laissa sécher avant de remplir de nouveau le cylindre; et lorsqu'il l'eut fait, il remarqua une accélération dans le refroidissement. Il ajouta une seconde couche, et quand elle fut sèche, il répéta l'expérience; le refroidissement alors fut plus rapide que la première fois; deux nouvelles couches l'accéléchèrent encore; mais cette accélération avait lieu par des différences décroissantes, et lorsqu'on eut ajouté quatre autres couches, ce qui faisait huit en tout, le refroidissement se ralentit, quoiqu'il s'opérât toujours plus promptement que quand la surface du métal était nue (1).

Voici comment on peut expliquer ce phénomène. Le vernis étendu sur la surface du cylindre la rend moins réfléchissante, en affaiblissant son poli et son éclat, et parce que le pouvoir émissif s'accroît à proportion, une partie du calorique que le vase retenait auparavant dans son intérieur s'échappe par le rayonnement, ce qui favorise le progrès du refroidissement. Mais une autre cause contribue à ce refroidissement; savoir, la perte que le cylindre fait de son calorique, au moyen de sa communication immédiate avec l'air environnant; et la facilité avec laquelle ce dernier effet s'opère, dépend de la faculté conductrice du calorique. Or comme le vernis, qui participe de la nature des substances résineuses, possède cette qualité dans un degré beaucoup moins marqué que le cylindre, qui est un corps métallique, sa présence, en même temps qu'elle affaiblit la faculté conductrice de celui-ci, diminue sa disposition à céder de son calorique à l'air en contact avec lui, et

---

(1) Mém. sur la Chaleur, p. 20.

cela d'autant plus que l'enduit devient plus épais. D'une autre part, la cause qui accélère le refroidissement, savoir, la diminution du poli, reste à peu près la même, à mesure que l'on applique de nouvelles couches, tandis que l'effet de la cause retardatrice, savoir, l'affaiblissement de la faculté conductrice du calorique, va toujours en augmentant, en sorte que cet effet, après avoir balancé de plus en plus celui de l'autre cause, finit par devenir prépondérant; et alors la perte que le cylindre fait par le rayonnement étant plus que compensée par la circonstance d'une communication moins facile, le refroidissement, après avoir subi une accélération qui devenait toujours moins sensible à chaque expérience, prend une marche rétrograde et se ralentit.

*Influence de l'agitation de l'air sur la durée du  
Refroidissement*

181. M. Leslie, en plaçant le phénomène dans des circonstances différentes, est parvenu à un résultat non moins curieux. Il avait remarqué que le mouvement plus ou moins rapide de l'air environnant avait une influence très marquée pour faire varier le progrès du refroidissement, et que cette influence dépendait beaucoup des qualités et du poli des surfaces. D'après cette observation, il prit deux globes creux de métal, d'un égal diamètre, dont l'un avait son éclat naturel, et l'autre était couvert d'une couche de noir de fumée. Il les remplit d'eau chaude, et les exposa en plein air à l'action du vent. Il avait choisi le déclin du jour pour faire cette expérience, parce qu'à cet instant la lumière qui nous vient du ciel étant très faible, la chaleur qui accompagne toujours ce fluide ne peut avoir qu'un effet insensible pour modifier les résultats. La température de l'eau renfermée dans les deux globes, indiquée par des thermomètres que l'on y avait plongés, était, au commencement de l'expérience, plus haute de 20<sup>d</sup> que celle de l'atmosphère, et l'on observa avec soin le temps que chaque globe mit à se refroidir, jusqu'à ce que la différence fût diminuée de

moitié, en sorte que la température eût baissé de  $10^{\circ}$ ; à un léger vent frais, le temps fut de  $44'$  pour le globe brillant et de  $35'$  pour le globe noir; à une bise assez forte, les temps furent de  $23'$  et de  $20' \frac{1}{4}$ ; à un vent violent, ils furent de  $9' \frac{1}{2}$  et  $9'$  (1). Ainsi, d'une part, les temps du refroidissement diminuaient à mesure que l'air était plus agité, et d'une autre part leur rapport approchait toujours davantage de sa limite qui était l'unité.

La cause de ce phénomène dépend de la différence entre les facultés conductrices exercées par le métal et par le noir de fumée, jointe à celle qui existe entre les pouvoirs émissifs de l'un et l'autre. Le premier possède la faculté conductrice à un plus haut degré, d'où il suit que, toutes choses égales d'ailleurs, le globe dont la surface est brillante tend à communiquer plus de calorique à l'air par le simple contact, que le globe dont la surface est noircie. Mais l'excès de perte qui en résulte pour le globe brillant, est beaucoup moins sensible dans un air tranquille, parce que l'air est peu disposé par lui-même à recevoir et à propager le calorique; d'une autre part, le même globe dont le pouvoir émissif est faible, n'abandonne qu'avec lenteur son calorique par le rayonnement, et l'espèce d'économie qui en résulte devient alors prédominante, pour rendre le refroidissement de ce globe plus tardif que celui du globe noir, qui se prête, à la vérité, plus difficilement à la communication par le contact, mais qui, en même temps, exerce avec beaucoup plus d'énergie son pouvoir émissif.

Il en est tout autrement, lorsque l'air étant agité, renouvelle continuellement ses points de contact avec les surfaces des deux globes, surtout si le renouvellement est rapide. Dans ce cas, l'effet de la faculté conductrice du globe brillant subit elle-même une accélération, qui allant toujours en croissant, avec l'agitation de l'air, amène par degrés les vitesses relatives du refroidissement à un terme très voisin de l'égalité.

---

(1) *Atmosphere*, etc., p. 271.

*Exposé succinct des Théories de MM. de Rumford  
et Leslie.*

182. Les savans célèbres dont la sagacité et l'adresse dans l'art d'interroger la nature les ont conduits à la découverte des faits qui viennent d'être exposés, en envisagent la théorie, ainsi que nous l'avons déjà annoncé, sous des points de vue tout différens. La chaleur, suivant M. de Rumford, n'est pas le résultat de l'action d'un fluide, mais d'un mouvement vibratoire, qui agite les molécules de tous les corps, et dont la vitesse est plus ou moins accélérée, suivant les circonstances (1).

Ce mouvement se communique, à distance, par l'intermède de l'éther, c'est-à-dire d'un fluide très subtil, éminemment élastique, qui pénètre tous les corps, et remplit tout l'espace intermédiaire. Les vibrations qui affectent les molécules des mêmes corps, excitent dans l'éther des ondulations analogues à celles que les corps sonores font naître dans l'air, et qui, susceptibles de se propager dans toutes les directions, produisent les changemens de température qui troublent ou rétablissent l'équilibre thermométrique entre les corps placés dans la sphère de ces ondulations. Si un corps chaud se trouve en présence d'un corps froid, les vibrations plus rapides des molécules du premier, transmises par l'éther à celles du second, accélèrent leurs vibrations, et par un effet contraire, les vibrations plus lentes des molécules du corps froid, auxquelles l'éther sert aussi de véhicule, ralentissent les vibrations des molécules du corps chaud; et les températures parviennent à l'égalité, lorsque les vibrations de part et d'autre sont devenues isochrones.

---

(1) Parmi les difficultés que M. de Rumford oppose à l'existence d'un fluide calorifique, une des plus concluantes, dans l'opinion de ce célèbre physicien, savoir, celle qui se tire de la grande quantité de chaleur que développe la compression des métaux, a été solidement résolue par Berthollet, *Statique chimique*, t. I, p. 247 et suiv.

L'auteur, pour se prêter au langage reçu, donne le nom de *rayons* aux mouvemens rectilignes à l'aide desquels les vibrations se propagent, et il appelle *rayons calorifiques* les mouvemens dont l'action est accélératrice, et *rayons frigorigiques* ceux qui exercent une action retardatrice. Il suit de là que les mêmes rayons qui sont calorifiques, en allant d'un corps chaud à un corps froid, peuvent devenir frigorigiques, en allant du premier corps à un autre qui serait plus chaud. Les expressions de *calorifique* et de *frigorigique* ne doivent pas être prises dans un sens absolu, mais sont relatives aux différens états des corps qui servent comme de sujets aux mouvemens excités par les vibrations.

Dans la même hypothèse, l'augmentation ou la diminution de volume que subit un corps, à mesure qu'il s'échauffe ou se refroidit, provient de ce que l'espace que parcourent ses molécules, et qui mesure l'étendue des vibrations, s'accroît ou diminue en même temps que la vitesse, en sorte que le volume qui est déterminé par l'ensemble des espaces parcourus se dilate ou se resserre à proportion.

183. M. Leslie voit au contraire dans les phénomènes des preuves irrécusables de l'existence d'une matière productrice de la chaleur (1), susceptible de dilater les corps, et d'en élever la température. Il n'admet pas la théorie du calorique rayonnant (2), et il pense que c'est l'air qui sert de véhicule à la chaleur, ou de moyen de communication entre les corps qui agissent les uns sur les autres, à raison de leur diversité de température. Les particules d'air voisines d'une surface chaude étant elles-mêmes subitement échauffées, acquièrent une force expansive, dont l'action se propage par une espèce de mouvement ondulatoire. Le même effet se répète à chaque instant, et la masse d'air adjacente au corps chaud, sans être sensiblement déplacée, éprouve seulement une légère fluctuation, à la faveur de laquelle la chaleur est transportée de la même manière que

(1) An Inquiry, p. 27.

(2) *Ibid.* p. 43.

le son. L'auteur explique l'action contraire des surfaces froides, en supposant qu'alors l'air voisin éprouve un mouvement de contraction qui produit un abaissement de température (1).

Pour rendre raison de la variété qui existe entre les corps, relativement au pouvoir d'émettre la chaleur, M. Leslie, après avoir remarqué qu'il n'existe point de contact immédiat dans la nature, pense que l'intervalle qui sépare la surface de chaque corps de celle de la masse d'air voisine, augmente ou diminue suivant les différentes qualités des corps. Plus cet intervalle est étroit, et plus les espèces de pulsations que subit l'air sont rapides, et acquièrent d'énergie pour opérer la décharge d'un corps chaud. Ainsi, l'on doit concevoir que la distance entre l'air et le verre est moindre qu'entre l'air et un métal poli, et de là vient que la surface du verre agissant sur l'air par une impression plus vive que celle qui provient de la surface d'un métal poli, la décharge se fait aussi plus promptement et avec plus d'énergie, par l'intermède de la surface vitreuse que de la surface métallique (2). Vient-on à rayer celle-ci et à la rendre raboteuse; ce changement d'état produit entre l'air et les parties saillantes de la même surface un rapprochement plus exact que celui qui avait lieu auparavant, et l'accélération qui en résulte dans le mouvement du fluide environnant en détermine une dans la décharge elle-même (3).

184. Les théories dont nous venons de tracer une esquisse, diffèrent également, soit l'une de l'autre, soit de celle que nous avons adoptée. Chacun des deux auteurs regarde la sienne comme une conséquence immédiate et nécessaire des faits. Mais s'il est vrai de dire que, dans l'état actuel de nos connaissances, rien n'est susceptible d'être ici démontré que les faits eux-mêmes, ce qui est déjà un avantage très précieux, et si, dans l'ignorance où nous sommes sur la véritable nature et sur la manière d'agir de la chaleur, la préférence doit être

(1) *An Inquiry*, p. 222.

(2) *Ibid.* p. 247.

(3) *Ibid.* p. 249.

pour l'hypothèse qui offre à l'esprit des conceptions plus nettes, et dont il s'accommode plus facilement, nous sommes portés à croire que nous avons bien choisi. Le double rayonnement du calorique par émission, et les échanges réels qui en résultent entre les corps, ont quelque chose de plus intelligible que les actions réciproques des rayons calorifiques et frigorifiques, admises par M. de Rumford. Dans le passage à l'état d'équilibre, entre un corps chaud et un corps froid, l'accélération que subissent les molécules de ce dernier corps est produite par la combinaison d'un mouvement plus rapide, savoir, celui que l'éther a reçu du corps chaud, avec un mouvement moins rapide, savoir, celui des molécules du corps froid; et la diminution de vitesse qui a lieu dans les vibrations des molécules du corps chaud, dépend d'une combinaison dont les élémens sont les mêmes, excepté que le mouvement moins rapide est celui de l'éther. Pour que l'explication ne laissât rien à désirer, il resterait à concilier ici la diversité des effets avec la similitude des causes.

Dans l'hypothèse du savant physicien anglais, on a peine à se faire une juste idée de la manière dont la chaleur, qui est l'effet d'un fluide réel, se propage à l'aide des vibrations imprimées à un autre fluide, qui est l'air atmosphérique, et peut-être que l'auteur ne s'exprime pas sur ce sujet avec toute la clarté que l'on pourrait désirer. On sait d'ailleurs que partout où il existe un corps plus chaud que l'air, il se forme deux courans de ce fluide, dont l'un reflue vers les parties supérieures du lieu, tandis que l'autre arrive par le bas pour remplacer le premier. Or, tandis que la chaleur se répand de bas en haut à l'aide de ce double mouvement de l'air, elle continue de se propager en ligne droite dans toutes les directions (145), et cette complication, qui n'est point favorable à la théorie de M. Leslie, n'a plus rien qui embarrasse, si l'on suppose que la chaleur ascendante soit due à la communication par le contact, et que celle qui se répand dans tous les sens soit l'effet du rayonnement. La propagation de la chaleur dans le vide n'est pas moins difficile à concilier avec la même opinion.

Enfin, lorsque l'on considère que le pouvoir de renvoyer le calorique, sans l'absorber, augmente et diminue en général avec le poli des surfaces, on est comme entraîné par l'idée qu'il en est de l'agent qui produit cet effet, comme de la lumière qui se réfléchit avec plus d'abondance sur les surfaces unies et brillantes. Les nombreuses analogies qui existent entre deux êtres que plusieurs physiciens regardent même comme identiques, sollicitent pour l'un et l'autre une théorie semblable; et celle de la lumière envisagée, d'après Newton, comme un fluide rayonnant, est si satisfaisante, qu'elle paraît faite en même temps pour servir comme de type à l'explication de cette belle suite de phénomènes que MM. Leslie et de Rumford nous ont dévoilés.

### *Formation de la Rosée.*

185. La théorie du calorique rayonnant a reçu, depuis plusieurs années, une extension importante par l'application qui en a été faite à la formation de la rosée, et dont les physiciens n'avaient pas conçu une juste idée, pour avoir méconnu le véritable rôle que joue ce fluide dans sa production.

Parmi les diverses opinions qui ont été émises sur la cause de ce phénomène, celle qui paraissait se présenter le plus naturellement, l'assimilait à la pluie, en la faisant dépendre immédiatement d'un refroidissement de l'atmosphère, qui déterminait la précipitation d'une partie de l'humidité dont elle était chargée. Mais cette explication avait contre elle plusieurs observations, dont une des plus anciennes avait été faite par Aristote; savoir, que la rosée ne se déposait que pendant les nuits calmes et sereines. On avait aussi observé que les métaux polis avaient moins d'aptitude que les autres corps à se couvrir de rosée. Une autre circonstance, qui aurait mérité également de fixer l'attention des physiciens, est que la surface du sol et les plantes qui y croissent, n'acquièrent, sous un ciel serein, qu'une température inférieure à celle de l'air qui les baigne. Mais on avait supposé que leur refroidissement était

un effet de la rosée qui s'était déposée à leur surface. On ignorait que ces corps étaient déjà plus froids que l'air environnant, avant même que la rosée les eût mouillés.

186. C'est à M. le docteur Wells, savant physicien anglais, que l'on est redevable d'une théorie qui ramène toutes les circonstances du phénomène à une explication non moins ingénieuse que satisfaisante (1). Ce savant a été conduit par une suite d'expériences faites avec beaucoup de soin et de précision, à reconnaître que l'abaissement de la température au-dessous de celle de l'air environnant, précède l'apparition de la rosée. De cette observation et de plusieurs autres que nous avons citées, il tire la conséquence que la véritable cause de la rosée est le rayonnement du calorique. Ce rayonnement étant réciproque entre les différens corps situés dans un même espace, si les échanges qui en résultent sont inégaux, la température de chaque corps s'abaissera ou s'élèvera à proportion de la quantité plus ou moins abondante de son rayonnement dans un instant donné. Or, elle est plus grande dans les plantes que dans l'air environnant, d'où il suit qu'en refroidissant l'air qui les baigne, elles le déterminent à abandonner une portion de l'humidité qu'il renferme, et qui se dépose à leur surface. Les métaux polis rayonnent beaucoup plus faiblement que les plantes ; aussi n'ont-ils presque aucune aptitude à se charger de rosée lorsqu'ils se trouvent placés dans des circonstances analogues à celles qui ont lieu naturellement pour les plantes. Ce défaut d'aptitude varie suivant les différens métaux. Il est plus marqué dans l'or, l'argent, le cuivre et l'étain, que dans le platine, le fer, l'acier et le zinc.

187. De plus, la propriété conductrice du calorique, qui est considérable dans les métaux, les fait participer promptement à la chaleur terrestre, et s'oppose à leur refroidissement pendant la nuit, ce qui offre une nouvelle cause de leur

---

(1) Essai sur la rosée, et sur divers phénomènes qui ont rapport avec elle, par Charles-William Wells, traduit de l'anglais sur la seconde édition, par S.-Aug. Tordeux. Paris, 1817. Voyez aussi les Annales de Chimie et de Physique, t. VI, p. 133 et suiv.

résistance à la formation de la rosée. Le platine, qui est de tous le moins conducteur, est celui qui s'en humecte davantage.

On voit en même temps pourquoi en général la rosée ne se dépose en grande quantité que pendant les nuits calmes et sereines. C'est qu'alors les parties supérieures de l'herbe envoient leur calorique rayonnant vers un espace libre dont elles ne reçoivent rien ou presque rien en échange; au lieu que si des nuages flottent dans cet espace, la perte que l'herbe fait de son calorique par le rayonnement, est compensée plus ou moins par le rayonnement en sens contraire de la surface inférieure de ces nuages, ce qui diminue d'autant la quantité de rosée que reçoivent les plantes.

188. C'est par une raison semblable qu'un abri interposé entre les corps et le ciel ralentit leur refroidissement, parce que sa surface, en regard avec ces corps, les préserve, par son rayonnement, d'une partie de la perte qu'ils auraient faite en restant exposés à l'air libre. Les abris qu'emploient les jardiniers dans la vue d'empêcher les plantes délicates de périr, en les garantissant de l'action du froid qui règne dans l'atmosphère, remplissent leur destination par une cause différente. Leur utilité a sa source dans leur surface tournée du côté des plantes, qui, en rayonnant vers elle, s'opposent à l'abaissement de leur température.

189. Il résulte de ce qui a été dit plus haut, que la rosée doit continuer de se former tant que la nuit reste calme et sereine. On voit par là le peu de fondement de l'opinion qu'elle ne se montre que le soir et le matin. Un corps en est bientôt humecté à quelque heure de la nuit qu'on l'expose à l'air sous un ciel pur.

190. Les vents qui s'élèvent pendant la formation de la rosée, en arrêtent ou en retardent les progrès. Les nouvelles couches qu'ils amènent étant plus chaudes que la masse d'air qu'elles remplacent, cèdent aux corps terrestres soumis à leur influence une quantité de calorique plus grande que ce qu'ils en reçoivent, ce qui affaiblit la tendance de ces corps vers la rosée. A cette action des vents, s'en joint une autre, dont nous

parlerons dans la suite, et qui dépend de la faculté qu'ont leurs courans de favoriser et d'accélérer l'évaporation.

191. Lorsque le refroidissement de l'herbe et des autres corps se fait avec rapidité, la rosée se congèle à leur surface, et passe à l'état de gelée blanche.

L'eau ayant, d'après les observations de M. Leslie, un pouvoir rayonnant supérieur peut-être à celui de toutes les autres substances connues, l'action de ce pouvoir accélère la conversion de la rosée en glace.

192. On explique, à l'aide des mêmes principes, la formation artificielle de la glace, qui a lieu au Bengale pendant les nuits d'hiver, et par une température au-dessus de zéro. Les fabricans de glace pratiquent dans une plaine découverte des excavations d'une figure carrée, dont ils couvrent le fond de cannes à sucre et de tiges de maïs. Ces substances ne possédant qu'à un faible degré la faculté conductrice du calorique, empêchent celui qui s'échappe du sol de se transmettre à l'eau douce bouillie renfermée dans de petites terrines d'environ un pouce et un quart (33 millimètres) de profondeur, auxquelles les mêmes substances servent de support. On a observé que les nuits calmes et sereines étaient celles où l'opération réussissait le mieux, et que les nuages et les vents nuisaient au contraire à la formation de la glace.

193. On voit ce qui caractérise la théorie de M. Wells, c'est qu'indépendamment de ce qu'elle s'accorde avec l'état du ciel et les autres circonstances qui, dans l'hypothèse à laquelle elle se rapporte, doivent favoriser la production de la rosée, elle fait dépendre le refroidissement qui la détermine du calorique rayonnant lancé par les corps destinés à recevoir cette rosée, et dont telle est l'abondance qu'ils perdent plus que l'air environnant aux échanges qu'ils font avec lui. Il en résulte que le refroidissement dont il s'agit est la cause et non pas une suite de la formation de la rosée, ainsi qu'on l'avait cru. Cette inversion dans la marche du phénomène l'isole de ceux près desquels l'analogie semblait le placer, et lui assigne un rang tout particulier, indiqué par la nouvelle forme sous laquelle s'y présente le calorique.

### 3. Du Calorique spécifique.

194. Nous n'avons aucun moyen pour évaluer la quantité absolue de calorique que renferme un corps; nous ne pouvons même, dans l'état actuel de la Physique, déterminer les rapports entre les quantités absolues de calorique des différens corps, comme nous déterminons ceux qui existent entre les densités de ces corps, quoiqu'il n'y en ait aucun dont la densité absolue nous soit connue. Nous sommes réduits à comparer entre elles les augmentations de calorique reçues par divers corps, dont la température s'est élevée d'un égal nombre de degrés.

195. Pour nous faire une idée des résultats auxquels on parvient à l'aide de cette comparaison, concevons que l'on mêle ensemble un kilogramme, ou deux livres d'eau à la température de 34 degrés au-dessus de zéro, avec un kilogramme de mercure à la température de zéro; l'eau cédera au mercure une portion de son calorique, jusqu'à ce qu'il y ait équilibre, c'est-à-dire, jusqu'à ce que la température des différentes parties du mélange soit parvenue à l'uniformité; or, à ce terme, un thermomètre plongé dans le mélange, indiquerait une température de 33 degrés. Nous en concluerons que l'eau a perdu la quantité de calorique nécessaire pour élever sa température d'un degré, et que cette même quantité de calorique est capable d'élever de 33 degrés la température du mercure; d'où il suit que la quantité requise pour élever celle-ci d'un degré, n'est que la 33<sup>e</sup> partie de celle qui produirait le même effet par rapport à l'eau. Cependant cette dernière conséquence part de la supposition tacite, qui n'est pas tout-à-fait exacte, que la portion de calorique reçue par un corps dont la température monte d'un degré, soit constamment la même, quelque place qu'occupe ce degré sur l'échelle du thermomètre.

196. On a appelé *chaleurs spécifiques*, ces quantités de calorique capables de produire, dans des corps égaux en masse, des élévations égales de température, en prenant un degré du

thermomètre pour terme de comparaison. Elles dépendent de la capacité de calorique des différens corps, et l'on pourrait dire qu'elles sont à peu près, à l'égard de cette dernière, ce que sont les pesanteurs spécifiques par rapport au poids.

197. Il suit de là que les quantités de calorique dont il s'agit, se composent de la partie qui agit comme calorique sensible, et de celle qui fait la fonction de calorique latent. L'expérience ne sépare pas ces deux parties l'une de l'autre, et ainsi, lorsqu'on définit le calorique spécifique, celui qui est employé à élever la température des corps d'un nombre donné de degrés, on doit sous-entendre, dans la définition, la partie qui n'intervient que pour produire la dilatation, ce dernier effet étant une condition liée à l'élévation de température.

Dans l'exemple que nous avons cité, si l'on représente par l'unité la quantité de calorique capable de faire monter d'un degré la température de l'eau commune, on aura pour la quantité de calorique correspondante, relativement au mercure, 0,0303, et l'on pourra, de cette manière, déterminer en unités et en parties de l'unité les caloriques spécifiques des différens corps rapportés à celui de l'eau, qui servira ici de mesure commune, comme dans la comparaison des densités.

### *Du Calorimètre.*

198. La méthode de Crawford, et de plusieurs autres physiciens, pour déterminer le calorique spécifique relatif à différentes substances, était semblable à celle dont nous avons parlé (195), en prenant l'eau et le mercure pour objets de comparaison; on avait alors égard au calorique spécifique particulier du vase dont on se servait, et on ramenait le résultat à l'hypothèse où son influence aurait été nulle. Mais il eût fallu encore tenir compte du calorique dérobé par l'air et par les autres corps environnans, et, d'ailleurs, il était souvent difficile de s'assurer si toutes les parties du mélange avaient la même température. Ces inconvéniens disparaissent dans le calorimètre imaginé par Lavoisier et Laplace, et qui réunit

au mérite de la précision, celui d'être seul applicable aux cas où les substances exercent une action chimique les unes sur les autres.

199. L'usage de cet instrument est fondé sur une observation que nous nous bornerons ici à indiquer, pour y revenir ensuite, lorsqu'elle se présentera à sa véritable place. Elle consiste en ce que, si l'on mêle une masse d'eau chauffée à 60<sup>d</sup> de Réaumur, avec une masse égale de glace, la totalité, après la fonte de la glace, se trouvera à la température de zéro, c'est-à-dire, à celle qu'avait la glace avant l'expérience. Dans ce cas, la quantité de calorique qui élevait la température de l'eau liquide, et dont la glace s'est emparée à mesure qu'elle se fondait, est tellement masquée, qu'elle n'a plus d'action sur le thermomètre.

Il résulte de ce qui vient d'être dit, que cette même quantité de calorique nécessaire pour fondre, par exemple, un kilogramme de glace, est la mesure de celle qui serait capable d'élever la température d'un kilogramme d'eau, depuis zéro jusqu'à 60<sup>d</sup>. Donc si un kilogramme d'une autre substance ne fond qu'un demi-kilogramme de glace, en passant de la température de 60<sup>d</sup> à celle de zéro, nous en concluons que sa chaleur spécifique est à celle de l'eau, comme  $\frac{1}{2}$  ou 0,5 est à l'unité. Si elle ne fond qu'un quart de kilogramme, le rapport sera celui de 0,25 à 1; et ainsi l'unité, dans le cas dont il s'agit ici, représentera la quantité de calorique qui, relativement à un kilogramme d'eau, répond à l'intervalle entre zéro et 60<sup>d</sup> au-dessus.

200. Cela posé, si l'on divise la quantité de glace qu'un corps quelconque a fondu en se refroidissant jusqu'à zéro, par le produit de la masse du corps rapportée au kilogramme, et du nombre de degrés auquel s'élevait la température primitive, on aura d'abord la quantité de glace qu'un kilogramme du même corps est susceptible de fondre, par un abaissement d'un simple degré de température. Multipliant ensuite le résultat par 60, on aura la quantité de glace qui aurait été fondue, si la température était descendue de 60<sup>d</sup> à zéro, ce qui donnera

en même temps la chaleur spécifique du corps rapportée à celle de l'eau, prise pour unité.

L'instrument est une espèce de cage, dont l'intérieur est partagé en trois cavités renfermées l'une dans l'autre. La cavité intérieure, ou la plus voisine du centre, est formée d'un grillage de fer sur lequel repose le corps dont on veut connaître la chaleur spécifique; la suivante, ou la cavité moyenne, est destinée à contenir de la glace pilée qui doit environner la cavité intérieure, et être fondue par la chaleur du corps soumis à l'expérience; la troisième, ou la cavité extérieure, reçoit une autre quantité de glace dont l'effet est d'arrêter la chaleur de l'air et des corps environnans. Au moment de l'expérience, la température de la glace doit être à zéro; et il est bon que celle de l'appartement ne soit pas au-dessous de ce terme. La quantité d'eau produite par la fonte de la glace renfermée dans la cavité moyenne s'écoule, à l'aide d'un robinet, dans un vase situé sous la machine; et l'on est bien sûr que cette eau provient uniquement de la chaleur perdue par le corps soumis à l'expérience, puisque la glace qui est dans la même cavité se trouve garantie par celle qui l'environne, de l'impression de toute chaleur étrangère. L'air et les corps voisins ne peuvent agir que sur la couche de glace située à l'extérieur, et l'eau qui, dans ce cas, est le produit de leur action, coule le long d'un tuyau qui la reçoit séparément.

201. Rendons sensible, par un exemple, la manière de soumettre au calcul le résultat de l'observation. Supposons qu'un corps du poids de  $7^{\text{kil}},7$ , échauffé à  $78^{\text{d}}$  au-dessus de zéro, ait fondu  $1^{\text{kil}},1$  de glace, en passant à la température de zéro; si l'on divise  $1,1$  par le produit de  $7,7$  et de  $78$ , on aura  $0^{\text{kil}},0018$  pour la quantité de glace qu'un kilogramme du même corps serait capable de fondre, en se refroidissant d'un degré. Ce résultat multiplié par  $60$ , donnera  $0,1080$  pour la chaleur spécifique du corps rapportée à celle de l'eau.

Si le corps est lui-même un liquide, on le renfermera dans un vase dont on aura déterminé la chaleur spécifique. On soustraira de la quantité de glace fondue la partie que le vase

a dû produire, ce qui donnera la quantité obtenue par le refroidissement du liquide; et du reste l'opération sera la même que pour les corps solides.

#### 4. Des Effets du Calorique, pour produire dans les Corps un changement d'état.

202. Les molécules d'un corps que nous supposons à l'état de solidité, obéissent à la force d'affinité, qui produit leur adhérence mutuelle. Mais cette adhérence est plus ou moins affaiblie par la force élastique du calorique interposé entre les molécules, et qui tend à les écarter les unes des autres. Ainsi elles sont continuellement sollicitées par deux forces contraires, dont les actions se balancent : à ces deux forces il s'en joint une troisième, savoir, la pression des fluides environnans, qui s'oppose à l'effet du calorique pour écarter les molécules. Mais l'influence de cette dernière force n'est sensible que dans certaines circonstances que nous ferons bientôt connaître.

203. Tant que la force élastique du calorique écarte assez peu les molécules du corps, pour que leur distance respective soit beaucoup plus petite que le rayon de leur sphère d'activité sensible (73), la partie de l'affinité qui n'a pas été détruite maintient le corps à l'état de solidité.

Pour mieux concevoir cet effet, imaginons qu'un corps solide reçoive tout-à-coup une certaine quantité de calorique, dont la partie destinée à produire la dilatation soit beaucoup moindre que celle qui serait nécessaire pour écarter les molécules à la distance mesurée par le rayon de la sphère d'activité sensible. Pendant l'augmentation de volume qui en résultera, l'élasticité du calorique et l'affinité diminueront en même temps, l'une par un effet semblable au débandement d'un ressort, l'autre par l'augmentation de distance. Or, comme nous supposons que le corps ne reçoit aucune nouvelle quantité de calorique, il y aura un terme où la dilatation s'arrêtera, et il est visible qu'à ce terme, la force élastique du calorique et la force d'affinité se trouveront en équilibre. Et puisque la pre-

mière était prépondérante pendant la dilatation, il en résulte qu'elle a diminué dans un plus grand rapport que l'affinité. Donc si à ce même terme, où le corps est toujours à l'état de solidité, une puissance quelconque agissait pour séparer davantage les molécules, elle éprouverait de la part de l'affinité une résistance qui ne serait pas balancée par l'élasticité du calorique, puisque celle-ci perdrait plus que l'affinité. Il suit de là qu'un corps doit rester dans l'état de solidité, tant que l'accumulation du calorique qui le dilate n'excède pas un certain degré. Il faut même que le décroissement de la force du calorique suive dans ce cas une loi beaucoup plus rapide que celui de la force d'affinité, puisqu'on ne peut ordinairement vaincre l'adhérence mutuelle des molécules d'un corps solide, qu'en employant un effort plus ou moins considérable.

Ainsi, à mesure qu'un corps solide reçoit des quantités additionnelles de calorique, il passe par divers degrés de dilatation, dont chacun est de même relatif à un équilibre que l'on ne peut rompre, jusqu'à opérer la division de ce corps, que par une force dirimante supérieure à la tendance de l'affinité, pour s'opposer à l'écartement des molécules (1).

### *Conversion des Solides en Liquides.*

204. Ce que nous venons de dire suppose que les accroissements de calorique reçus par un corps solide n'excèdent pas une certaine limite. Mais lorsque ce fluide s'est accumulé au point de lutter avec assez d'avantage contre la force d'affinité, pour que les molécules du corps puissent se mouvoir librement en tous sens, et céder à la plus légère pression, ce corps devient liquide.

Pour mieux concevoir ce passage à l'état de liquidité, il faut observer que les molécules des corps ont certaines faces, par lesquelles elles s'attirent de préférence, lorsque rien ne s'y

---

(1) On voit ici dans quel sens il faut entendre ce qui a été dit par Lavoisier, qu'un corps dilaté par la force du calorique reste à l'état de solidité, tant que l'affinité est victorieuse.

oppose, et que l'on appelle *faces* ou *latus de plus grande affinité*. Tant qu'elles constituent un corps solide, elles tournent ces mêmes faces les unes vers les autres, et la force de l'adhérence qui les lie entre elles tient en partie à cette disposition respective. Or l'action du calorique parvenue à un certain degré d'accroissement et d'énergie, dérange l'assortiment dont il s'agit, et alors les molécules se présentant les unes aux autres sous des positions moins favorables à l'affinité, il en résulte dans l'action de cette force une diminution qui contribue, avec l'élasticité du calorique, à cette grande mobilité dont les molécules deviennent susceptibles lorsque leur ensemble prend la forme d'un liquide.

205. A ce terme il se présente un phénomène remarquable, qui consiste en ce que l'action du calorique sensible s'arrête tout-à-coup, pour ne laisser subsister que celle du calorique latent; ainsi les nouvelles quantités de calorique qui surviennent depuis l'instant où a commencé la liquéfaction, n'agissent que pour en favoriser le progrès, et sont nulles pour élever la température du corps qui les reçoit, en sorte qu'un thermomètre placé, par exemple, dans la glace qui commence à se résoudre en eau, reste stationnaire au degré de zéro, jusqu'à ce que cette glace soit entièrement fondue.

206. Ce repos du thermomètre au milieu d'une affluence continuelle de calorique, avait frappé depuis long-temps les observateurs, et c'était ce cas particulier, joint à un autre dont nous parlerons bientôt, qui avait suggéré l'idée de *chaleur latente*, qui a reçu une grande extension depuis que les phénomènes ont été mieux analysés.

### *Conversion des Liquides en Fluides élastiques.*

207. Continuons de prendre l'eau pour exemple, parce que les circonstances de la nouvelle transformation qui nous reste à décrire, se manifestent à son égard d'une manière très marquée. Quelle que soit la température de ce liquide, la force élastique du calorique interposé entre ses molécules l'emporte

tellement sur leur affinité réciproque, qu'elle tend à les écarter de plus en plus, et que la portion du même fluide qui agit sur les molécules situées près de la surface, fait effort pour les en séparer. Cet effort éprouve une résistance de la part de l'air environnant, qui exerce sa pression sur la surface de l'eau. Mais la résistance dont il s'agit ne fait en quelque sorte que gêner la force élastique du calorique, et en ralentir les effets. Car au milieu des petites agitations qui s'excitent dans l'air et dans l'eau elle-même, il arrive qu'un certain nombre de molécules aqueuses rencontrant les positions qui correspondent aux interstices dont l'air est criblé, s'y introduisent en se détachant de la surface de l'eau. Elles sont à l'instant suivies par d'autres, en sorte que toutes ces molécules aqueuses qui ont trouvé accès au milieu de l'air, y étant maintenues à de certaines distances les unes des autres par celles du calorique distribuées entre elles, prennent elles-mêmes la forme d'un fluide élastique. On dit alors de ces molécules, qu'elles sont converties en *vapeur*, et ce passage à un nouvel état porte le nom d'*évaporation*. Nous reviendrons dans la suite, avec plus de détail, sur les effets de la présence de l'air dans ce phénomène, et sur diverses autres circonstances qui nous serviront à en développer la théorie.

A mesure que l'eau reçoit de nouvelles quantités de calorique, l'évaporation devient plus abondante, et lorsque l'élévation de la température a fait croître la force élastique du calorique jusqu'à un certain terme, l'obstacle que l'air environnant opposait à la dilatation de l'eau étant entièrement vaincu, l'action du calorique, pour produire l'évaporation, sous la pression actuelle de l'atmosphère, est parvenue à son *maximum*.

208. Ici, le phénomène qui avait déjà eu lieu dans la conversion de la glace en eau liquide, se reproduit avec les mêmes circonstances, c'est-à-dire que pendant tout le temps que l'eau continue de passer à l'état élastique, les nouvelles quantités de calorique qui arrivent, n'exercent leur action que pour hâter le progrès de l'évaporation, et passent à l'état de calorique latent, sans avoir aucune influence sur la température; de là

vient qu'un thermomètre placé, soit dans le liquide qui fournit la vapeur, soit dans la vapeur elle-même, marque constamment 80<sup>d</sup> de Réaumur, ou 100<sup>d</sup> du thermomètre centigrade, sous la pression moyenne de l'atmosphère.

209. Le moment où l'évaporation arrive à ce degré qui fixe la température, s'annonce par l'ébullition du liquide, et le signe avant-coureur de celle-ci est la naissance d'une multitude de petites bulles qui partent du fond du vase, et se succèdent rapidement à travers le liquide. D'abord elles crèvent à une certaine hauteur, en produisant une espèce de frémissement connu de tout le monde; les suivantes s'élèvent davantage avant de disparaître; d'autres enfin arrivent à la surface, et alors de nouvelles bulles beaucoup plus volumineuses que les premières, se forment dans toute la masse du liquide; où elles excitent une grande agitation. Suivant les observations du célèbre Deluc, toutes ces bulles sont produites par le dégagement des particules d'air naturellement renfermées dans le liquide (1). On a désigné par le nom particulier de *vaporisation* ce dégagement rapide de vapeur qui a lieu au moment de l'ébullition, et comme la pression de l'atmosphère est totalement vaincue dans ce cas, on a étendu le même nom à toute formation de vapeur qui s'opère dans un espace vide d'air.

#### *Retour à l'état de Liquidité et à celui de Solidité.*

210. Concevons que l'eau, en suivant une marche rétrograde à l'égard de celle que nous venons de considérer, retourne de l'état élastique, à celui de liquidité, et de ce dernier à celui de solidité. Pendant qu'elle redeviendra liquide, le calorique qu'elle avait absorbé, en s'évaporant, et qu'elle tenait comme masqué, sous la forme de calorique latent, reparaitra tout entier sous celle de calorique sensible, et se communiquera aux corps environnans, en sorte qu'un thermomètre plongé dans cette eau restera encore fixe à 80<sup>d</sup>, en supposant que la pression soit la même.

---

(1) Introduction à la Physique terrestre, t. I, p. 426.

Pour que l'eau, en partant de ce terme ; retourne à l'état de solidité, il faudra d'abord qu'elle perde, par le refroidissement, tous les accroissemens de calorique qui avaient fait varier sa température et son volume, depuis l'instant du passage à l'état de liquidité. Pendant la congélation qui suivra, toute la quantité de calorique dont l'eau s'était emparée, en sortant du même état, et qui était restée sans effet sur le thermomètre, se développera et passera dans les corps environnans, de manière qu'un thermomètre plongé dans cette eau sera encore stationnaire au degré de zéro.

211. Nous avons déjà cité une expérience (188), dans laquelle, ayant mêlé un kilogramme, ou deux livres, de glace avec un kilogramme d'eau à  $60^{\circ}$ , on a deux kilogrammes d'eau à zéro, pour résultat du mélange, c'est-à-dire que la glace, en se fondant, absorbe et rend nulle pour le thermomètre une quantité de calorique mesurée par  $60^{\circ}$ , qu'elle enlève à l'eau chaude en contact avec elle. Maintenant, si l'on suppose que l'eau repasse à l'état de glace, elle remettra en activité une égale quantité de calorique, qui se répandra dans l'appareil, et de proche en proche dans les corps voisins.

212. Ce que nous avons dit de l'eau, prise pour exemple, s'applique également à tous les autres corps. Leur passage à un nouvel état détermine l'absorption d'une quantité de calorique qui perd son action sur le thermomètre, en allant de la solidité à la liquidité, et de celle-ci à la fluidité élastique; et si le passage se fait en sens contraire, il détermine le dégagement de la même quantité de calorique que le corps avait absorbée en sortant de l'état auquel il arrive. En général, toutes les variations produites par l'effet du calorique, pendant une succession d'états qui a lieu dans le même sens, se reproduisent dans un ordre inverse, lorsque les états eux-mêmes se succèdent en sens opposé.

La même inversion se retrouve, porportion gardée, dans toute la gradation de nuances qu'un corps parcourt, en allant d'un état à l'autre; toutes les petites quantités de calorique qui étaient devenues latentes entre deux nuances voisines,

redeviennent sensibles ou réciproquement, selon que la limite dont le corps se rapproche, en passant par ces nuances, est située d'un côté ou de l'autre.

*Diversité d'opinions sur le Calorique latent.*

213. On a envisagé le calorique latent sous deux points de vue différens. Suivant plusieurs physiciens, il se fixe dans le corps qui change d'état ou qui se dilate, et cet effet est analogue à ce qui se passe dans la cristallisation d'un sel, qui s'approprie une portion du dissolvant, en sorte que celle-ci, engagée dans le cristal, perd toutes ses apparences, et n'a plus rien de ce qui caractérise une substance humide. L'autre opinion est relative à l'idée que les physiciens qui l'ont émise avaient conçue de la capacité de calorique. Ils faisaient dépendre celle-ci d'une certaine force que les corps exerçaient pour contenir et captiver en quelque sorte le calorique engagé dans leur intérieur. Cette force avait d'autant plus d'énergie, que la capacité de calorique était plus considérable, et cette capacité se trouvait effectivement augmentée dans un corps qui avait passé de l'état de solide à celui de liquide, ou de ce dernier, à l'état de gaz ou de vapeur. Il en résultait que l'eau liquide, par exemple, exerçant une plus grande force sur chaque molécule de calorique, pour la coërcer, celle-ci perdait de sa tension, en sorte que la glace, en se fondant, avait besoin de recevoir un surcroît de calorique additionnel, pour que la tension totale du fluide fût encore la même, et qu'il n'y eût aucune variation dans la température. De là venait, dans l'opinion dont il s'agit, que la glace qui se résolvait en eau, absorbait une quantité de calorique mesurée par  $60^d$ , et qui formait comme le complément de celle qu'exigeait le nouvel état du corps.

La même considération s'appliquait à un corps qui se dilate, en conservant sa température. Ainsi, une masse d'air que l'on mettait en liberté de s'étendre dans un plus grand espace, enlevait aux corps environnans le surcroît de calorique destiné à compenser la perte que la quantité primitive faisait de sa tension, à mesure que l'air augmentait de volume.

214. La manière de voir que nous venons d'exposer ne diffère pas essentiellement de celle que nous avons adoptée. Mais cette dernière présente les phénomènes sous un point de vue plus net, en distinguant deux actions du calorique, dont l'une, par cela seul qu'elle produit, tantôt un changement d'état, et tantôt une dilatation, perd son influence sur le thermomètre, en sorte que l'autre action d'où dépend la température ne peut rester la même, qu'autant que la première reçoit d'ailleurs à proportion de ce qu'elle consomme.

### *Différences entre les Fluides élastiques.*

215. Les fluides élastiques, que les physiciens modernes appellent aussi simplement *fluides*, ont été distribués en deux ordres; l'un renferme ceux qui conservent leur élasticité, sous les plus fortes pressions et aux degrés les plus bas de refroidissement que nous puissions leur faire subir, aucun de ces deux moyens, dans l'état actuel des choses, n'étant capable de rapprocher leurs molécules à une distance moindre que le rayon de leur sphère d'affinité sensible. Ces mêmes molécules, ou plutôt celles du calorique interposées entre elles, sont comme autant de petits ressorts qui se bandent, lorsqu'une cause quelconque agit pour resserrer une masse de l'un de ces fluides dans un espace plus étroit que celui qu'elle occupait, et qui ensuite se rétablissent, lorsque la même cause cessant d'avoir lieu, la masse du fluide reprend, en se dilatant, la place qu'elle avait cédée. On a donné à ces fluides le nom de *fluides aëriiformes*, emprunté de celui de l'air atmosphérique, qui semble tenir le premier rang parmi eux. On les a nommés aussi *fluides élastiques permanens ou gaz*. Dans l'autre ordre sont compris les fluides élastiques qui perdent plus ou moins facilement leur état, par la compression ou par le refroidissement; de ce nombre sont ceux qui proviennent de l'eau commune, de l'alcool, de l'éther, etc., par l'intermède de la chaleur et que l'on a appelés *vapeurs* ou *fluides élastiques non permanens*.

*Considérations sur les Résultats qui précèdent.*

216. Il n'est peut-être pas indifférent de remarquer comment la théorie des actions qu'exerce le calorique, pour changer l'état d'un corps, met en regard des phénomènes que le commun des hommes ne rapproche pas, et que l'on a même distingués par le langage : telle est, par exemple, d'une part la conversion du fer solide en fer liquide, par l'action du feu, ou son retour au premier état, par le refroidissement; et d'une autre part, la fonte de l'eau glacée, ou le passage de l'eau liquide à l'état de glace. Ces phénomènes ne diffèrent que par les circonstances et par le plus ou moins de calorique employé à les produire; en sorte qu'il est vrai de dire que la liquéfaction du fer, par la chaleur, est le *dégel* du fer, et que son retour à l'état de consistance, par le refroidissement, est la *congélation* du fer. Le physicien s'accoutume ainsi à considérer sous un même aspect, et à rapprocher dans ses conceptions, des effets, dont l'un est l'image fidèle de l'autre.

217. Les résultats de l'action du calorique pour balancer l'affinité des molécules d'un corps solide, au point d'amener d'abord le passage à l'état de liquide, et d'entraîner enfin avec lui les molécules sous la forme de vapeurs, sont limités par l'observation à un certain nombre de substances. Mais ils ont reçu de la théorie une généralité à laquelle on ne pouvait se refuser, et on en a tiré la conséquence, que tous les corps de la nature sont susceptibles par eux-mêmes des trois états dont nous venons de parler, et qu'une grande partie de ces corps ne paraissent fixes, que faute de pouvoir acquérir ou perdre la quantité de calorique suffisante pour déterminer leur passage d'un état à l'autre. La plus grande différence qui puisse exister entre la température des climats où l'on ressent les plus vives ardeurs du soleil, et de ceux que la grande obliquité de ses rayons laisse exposés au froid le plus rigoureux, ne produit guère d'effets sensibles, que par rapport à l'eau, qui conserve constamment sa liquidité dans les régions voisines de l'équateur, et ne la perd que par intervalles dans nos climats, tandis

que vers le pôle, d'énormes glaçons ne peuvent échapper à l'action constante de la cause qui les a durcis, qu'en venant, comme des montagnes flottantes, se fondre dans les mers des régions tempérées.

218. La puissance de l'art a surpassé de beaucoup celle de la nature. Nous verrons, en parlant de l'eau, jusqu'à quel point on a poussé l'action d'un froid artificiel, au-delà de celui qui répond à la congélation de ce liquide. Mais c'est par les effets de la chaleur, pour reculer la limite opposée, que la plupart des passages à un nouvel état ont été déterminés. En concentrant l'action des rayons solaires dans le foyer d'un verre ardent, on a réussi à fondre des corps qui avaient résisté jusqu'alors à toute l'activité du feu de nos fourneaux, et à volatiliser l'or et différentes substances métalliques.

Il semblait que ce fût le dernier effort de l'art pour augmenter l'intensité de l'action du calorique. La chimie moderne a été encore plus loin, en substituant au feu céleste un feu ordinaire, auquel on fournit l'air vital, son aliment, dans l'état de pureté; au moyen de la flamme, animée par un courant de ce gaz, on a volatilisé les métaux plus promptement et plus facilement qu'au foyer de la lentille; et quelques-uns, tels que le cuivre, qui s'étaient seulement oxidés par ce dernier moyen, ont été volatilisés en entier. Plusieurs pierres très réfractaires ont été fondues, d'autres ont subi seulement un premier degré de ramollissement, et de ce nombre sont le quartz pur et une partie des pierres gemmes.

219. Ces limites sont cependant encore très éloignées de celles qu'il faudrait pouvoir atteindre, pour que les trois degrés de solidité, de liquidité et de fluidité pussent être réalisés à l'égard de chaque substance, par la simple absence du calorique ou par son accumulation. Mais lorsque l'affinité joint à ces moyens l'énergie de son action, elle détermine des changements d'état, relativement à des êtres qui n'en seraient pas susceptibles, s'ils restaient isolés; soit qu'elle enchaîne un fluide élastique dans une combinaison dont le terme est l'état de solidité, soit qu'elle associe un solide à un fluide élastique

qui l'entraîne avec lui, sous une forme semblable. Ainsi l'oxygène dont aucun degré de froid ne pourrait rapprocher assez les molécules, même pour les faire passer à la liquidité, se fixe en s'unissant aux fers et à divers métaux, et le charbon que le calorique seul n'amènerait pas non plus à l'état de liquide, acquiert la propriété élastique, en se combinant avec l'oxygène, pour produire l'acide carbonique.

### *Explications de divers Phénomènes particuliers.*

Parmi les phénomènes qui ont fourni au développement de la théorie précédente, il en est un, savoir, le passage des corps de l'état de liquidité à celui d'élasticité ou réciproquement, qui est susceptible d'être considéré sous de nouveaux rapports, que nous avons omis jusqu'ici de faire connaître, pour ne point rompre le fil des idées.

220. Nous avons vu que l'effet du calorique, pour convertir un liquide en fluide élastique, est balancé en partie par la pression de l'atmosphère, en sorte que le moment où le liquide entre en pleine ébullition, et où la température devient constante, n'a lieu que quand l'obstacle qui résulte de cette pression est entièrement vaincu (207). Il suit de là que si, après avoir placé sous un récipient le vase qui renferme le liquide, on diminue la pression, en supprimant une partie de l'air, au moyen de la machine pneumatique, l'ébullition du liquide et l'uniformité de température répondront à un degré plus bas que quand le liquide était exposé à l'air libre. Ce degré s'abaissera de plus en plus, à mesure que le vide approchera davantage d'être parfait; les expériences du célèbre Prony ont prouvé qu'on peut le pousser assez loin, pour déterminer le passage de l'eau au *maximum* de l'état élastique, par une température qui s'élève à peine au-dessus de zéro, tandis que ce liquide a besoin, comme nous l'avons dit (208), d'une chaleur mesurée par 80<sup>d</sup> de Réaumur, pour arriver au même état, sous la pression ordinaire de l'atmosphère. Par une suite du même principe, si on s'élève sur une montagne,

avec un vase rempli d'eau tiède, la colonne d'air devenant plus courte, à mesure que l'on arrive à une plus grande hauteur, la diminution de pression qui en résulte peut être assez sensible pour donner lieu à l'ébullition du liquide.

221. Si l'on suppose, au contraire, que la pression moyenne de l'atmosphère soit remplacée par une autre pression plus puissante, les nouvelles quantités de calorique qui s'introduiront dans l'eau déjà parvenue à la température de 80<sup>d</sup>, continueront de l'échauffer, jusqu'à ce que la force élastique du calorique devienne capable de surmonter l'obstacle qui lui résiste, et à ce terme, qui sera dans le cas présent celui de l'ébullition, la température se fixera au degré qu'elle aura atteint, pendant son élévation au-dessus de celui qui aurait eu lieu sous la pression ordinaire.

222. Par une suite des mêmes circonstances, lorsque l'eau qui s'évapore est renfermée dans un vase qui ne laisse aucune issue à la vapeur, celle-ci s'accumule dans la partie supérieure du vase, et exerce sur l'eau encore liquide une pression qui étant parvenue à un certain terme, s'oppose à l'effet de la force élastique du calorique pour amener le point de l'ébullition, en sorte que le calorique s'accumule à son tour, soit dans le liquide, soit dans la vapeur elle-même, et que la température continue de monter bien au-dessus de 80<sup>d</sup>.

223. C'est d'après ce principe qu'était construite la machine si connue sous le nom de *marmite de Papin*, et dont ce physicien a publié une description à Paris, en 1682, sous le nom de *machine propre à amollir les os pour en faire du bouillon*. Le couvercle de cette machine était arrêté par une forte vis de pression, et l'on prenait toutes les précautions nécessaires pour empêcher la vapeur de s'échapper. La chaleur qui se produit dans ce cas, est si forte, que l'eau devient capable non-seulement de dissoudre des os, et d'en extraire la gélatine, mais encore de fondre le plomb et même le cuivre, ainsi que l'ont observé différens physiciens.

224. Pour que l'eau une fois parvenue au terme de l'ébullition se maintienne à la même température, il faut qu'elle re-

goive sans cesse du dehors une nouvelle quantité de calorique égale à celle qui est devenue latente. Si cet accroissement de calorique vient à s'arrêter, l'évaporation continuera, mais par des degrés décroissans, et comme alors la vapeur emprunte à l'eau même située au-dessous d'elle le calorique nécessaire à sa formation, cette circonstance détermine, dans le liquide, un abaissement continuel de température.

Le même effet a lieu, proportion gardée, dans toutes les masses d'eau soumises à l'évaporation par la température ordinaire de l'atmosphère. La formation de la vapeur produit dans l'eau d'où s'échappe cette vapeur, un refroidissement plus ou moins marqué, dont se ressentent les corps environnans, auxquels le liquide enlève une partie de leur calorique, pour réparer ses pertes.

Ce qui vient d'être dit peut servir à rendre raison de plusieurs effets très connus.

225. Par exemple, si l'on enveloppe d'un linge la boule d'un thermomètre, et qu'on humecte ce linge avec de l'éther, en agitant le thermomètre dans l'air, pour renouveler les points de communication avec ce fluide, et faciliter l'évaporation, on parviendra à faire descendre très sensiblement la liqueur du thermomètre; de là encore la sensation de froid que l'on éprouve pendant l'évaporation d'une goutte de liqueur spiritueuse que l'on a versée sur la main. Il sera de même facile d'expliquer un fait qui présente une espèce de paradoxe, et qui a lieu, lorsqu'aux premiers rayons du soleil, c'est-à-dire à la renaissance de la chaleur, le thermomètre baisse pendant un instant. Cet effet provient de ce que la petite quantité de rosée dont le thermomètre est humecté, venant à s'évaporer par l'action du soleil, le thermomètre lui cède une portion de son calorique.

226. C'est sur les mêmes principes qu'est fondé un moyen très simple, que l'on pratique dans plusieurs pays, pour se procurer de l'eau fraîche pendant l'été, en faisant contribuer à l'abaissement de la température du liquide la chaleur même qui règne alors dans l'atmosphère. On verse l'eau dans des vases

de terre à embouchure étroite, dont la matière a été tellement préparée qu'elle reste très poreuse après avoir subi une légère cuisson. On place ces vases, autant qu'il est possible, dans un lieu où l'air soit renouvelé sans cesse. L'eau qui suinte à travers le tissu lâche du vase, s'évapore en arrivant à la surface ; de nouvelle eau lui succède, et la quantité de calorifique qui s'échappe continuellement, à la faveur de l'évaporation, n'étant pas compensée par celle qui arrive du dehors, l'eau parvient, en assez peu de temps, à un degré de refroidissement, qui en fait une boisson agréable (1).

*Congélation de l'eau, produite par une évaporation accélérée.*

227. Nous avons exposé, dans l'article précédent, la cause du refroidissement qu'éprouve l'eau placée sous le récipient de la machine pneumatique, pendant qu'on raréfie l'air qui presse la surface de cette eau. Ordinairement, on juge de la quantité de ce refroidissement, par celle dont est descendue en même temps vers le zéro, la liqueur d'un thermomètre plongé dans la même eau. M. Leslie a conçu l'idée d'une autre expérience beaucoup plus remarquable, dans laquelle l'effet de l'abaissement qu'a subi la température de l'eau, s'annonce de lui-même à l'œil, par la congélation de ce liquide. M. Leslie est parvenu à ce résultat, en profitant de la rapidité avec laquelle l'acide sulfurique concentré s'empare de la vapeur de l'eau, dont il est très avide. Voici en quoi consiste l'expérience de ce savant physicien. On prend deux capsules, l'une de verre, l'autre de laiton, montée sur trois supports, dont telle doit être la longueur, que quand on a placé la même capsule au-dessus de la première, il reste entre l'une et l'autre un espace libre. On les dispose toutes les deux sous le récipient, comme nous venons de le dire, après avoir versé de l'acide sulfurique concentré dans celle de verre, et de l'eau commune dans celle de laiton.

---

(1) Deluc, Introduction à la Physique terrestre, t. I, p. 332.

A mesure qu'ensuite on fait le vide, la vapeur qui se dégage de l'eau est aussitôt absorbée par l'acide, et ce double effet se renouvelant sans cesse, l'eau passe en un instant à l'état de glace.

### 5. Des Effets de la compression et de la dilatation sur le Calorique renfermé dans les corps.

228. Nous avons fixé jusqu'ici notre attention sur les circonstances dans lesquelles les variations que subit le volume d'un corps sont dues à l'accumulation du calorique dans l'intérieur de ce corps ou à son dégagement, en sorte que nous avons à considérer deux effets simultanés, savoir, la dilatation et l'élévation de température d'une part, et de l'autre la contraction et le refroidissement; et la théorie de ces effets nous a conduits à décomposer, par la pensée, l'action du calorique en deux actions distinctes, ou, si l'on veut, à sous-diviser le calorique lui-même en deux parties destinées à produire les effets dont il s'agit. Nous allons maintenant développer des phénomènes bornés à certains corps, et à certaines circonstances particulières, dans lesquelles la partie du calorique qui produit la dilatation, ou celle dont le dégagement occasionne la contraction, agit seule, en sorte qu'à la fin de l'un ou l'autre effet, la température se retrouve la même qu'auparavant. Examinons d'abord ce qui arrive, dans ces sortes de cas, à un fluide élastique, tel que l'air.

229. Supposons un thermomètre placé sous un récipient, au milieu d'une masse de ce fluide, en sorte que l'appareil et tous les corps environnans soient en équilibre de température avec elle. Si on dilate l'air, le thermomètre baisse à l'instant; si, au contraire, on comprime l'air, on voit le thermomètre monter. Dans le premier cas, l'air ayant besoin d'employer à sa dilatation une quantité de calorique qui, par là même deviendra latente, dérobe subitement au thermomètre et à l'appareil une portion de celui qu'ils contiennent. Mais bientôt après le calorique qui arrive des corps environnans, où il n'est

plus en équilibre avec celui de l'air renfermé sous le récipient, ramène et ce dernier fluide et le thermomètre à la température primitive, de manière que la liqueur de l'instrument, qui était d'abord descendue tout à coup, remonte au même degré. Dans le second cas, l'air développe, pendant la compression, une partie de son calorique latent, égale à celle dont il aurait ensuite besoin, pour reprendre, par la dilatation, son volume primitif, et il cède ce calorique au thermomètre et à l'appareil. Mais après la compression, le calorique qui avait été abandonné par l'air, se communiquant de proche en proche aux corps environnans, l'uniformité de température se rétablit, et la liqueur du thermomètre descend à son premier niveau.

230. Ordinairement les variations du thermomètre qui ont lieu dans l'un et l'autre cas, n'excèdent guères un ou deux degrés. Mais il est facile de concevoir que le changement qu'éprouve l'air répond à une différence de température qui n'est pas à beaucoup près représentée par le mouvement de la liqueur du thermomètre. Car cet instrument ne ferait ici la fonction de véritable thermomètre, qu'autant que sa masse serait comme infiniment petite, par rapport à celle de l'air (142), et que ce fluide ne pourrait d'ailleurs ni rien dérober aux corps environnans de leur calorique, ni rien leur céder de celui qui se serait dégagé de son intérieur. Mais la masse du thermomètre est au contraire beaucoup plus considérable que celle de l'air, et il en résulte que la température de cet air baisse moins, pendant la dilatation, que s'il n'avait aucune communication avec le thermomètre, parce que cet instrument lui restitue une portion du calorique qui de sensible est devenu latent; d'une autre part, la température de l'air s'élève moins, pendant la compression, que dans le cas où cet air serait indépendant du thermomètre, parce que celui-ci lui enlève une portion du calorique qui se dégage pour devenir sensible de latent qu'il était. Ainsi le thermomètre fait disparaître une partie du changement de température qu'il devrait indiquer tout entier; et l'indication pêche encore, en ce que le calorique cédé par l'appareil

reil à l'air qui se dilate, exerce sur cet instrument une influence étrangère, qui s'oppose à l'abaissement de la liqueur, ou en ce que l'influence du calorique enlevé par le même appareil à l'air comprimé, est perdue pour le thermomètre, dont la liqueur reste, par cela seul, au-dessus de sa véritable hauteur.

### *Explication de divers Phénomènes.*

231. Les physiiciens font depuis long-temps une expérience à l'aide de laquelle on peut suivre pour ainsi dire de l'œil, la marche du calorique dans la dilatation de l'air. Si après avoir comprimé ce fluide dans un récipient de verre qui renferme un baromètre, on ouvre le robinet destiné pour donner une issue à l'air, le mercure du baromètre descend rapidement; et si alors on ferme tout à coup le robinet, le mercure remonte lentement jusqu'à une certaine hauteur, où il reste stationnaire.

Ces effets proviennent de ce qu'au moment où l'on ouvre le robinet, l'air ne pouvant dérober instantanément à l'appareil et aux corps environnans la quantité de calorique nécessaire à sa dilatation, s'enlève à lui-même une partie de son calorique sensible; et comme sa température s'abaisse d'autant, la diminution de ressort qui en résulte occasionne un excès d'abaissement dans la colonne du baromètre. Mais dès que le robinet est fermé, l'air, en revenant à sa première température, recouvre une partie de son ressort, ce qui détermine la colonne de mercure à s'élever jusqu'à ce qu'il y ait équilibre (1).

232. On s'est servi pendant long-temps dans les mines de Schemnitz en Hongrie, d'une machine appelée *à eau et à air*, faisant l'office d'une pompe, dans laquelle on substituait au jeu du piston le ressort d'une masse d'air comprimée par une colonne d'eau de quarante à cinquante mètres de hauteur. Lorsqu'on voulait amuser ceux qui venaient visiter les mines, on ouvrait un robinet qui donnait une issue à l'air comprimé, et l'on présentait un bonnet de mineur à l'orifice du robinet: au même instant la surface de ce bonnet était couverte d'une espèce de glace très blanche, très compacte et semblable à de

---

(1) Baillet, Journ. des Mines, n° 76, p. 267.

la grêle (1). Dans ce cas, l'air qui s'échappait rapidement, en entraînant avec lui la vapeur aqueuse dont il s'était saturé dans l'intérieur de la pompe, éprouvait un haut degré de raréfaction. Devenu pour ainsi dire avide de calorique aux dépens de tout ce qui pouvait lui en fournir, et particulièrement de la vapeur en contact avec ses molécules, il en dérobait à cette vapeur une quantité assez considérable pour lui faire franchir tout d'un coup la distance entre l'état de fluidité élastique et celui de solidité, en sorte qu'elle se déposait en glace sur le premier corps que l'air rencontrait dans l'espace environnant.

233. Un autre fait qui est très curieux, prouve combien est considérable la quantité de calorique dont l'air se déssaisit lorsque son volume se resserre. On place un petit morceau d'amadou à l'extrémité inférieure et en dedans du tuyau d'une espèce de pompe qui sert à comprimer l'air : on abaisse ensuite le piston le plus promptement possible ; la chaleur qui se développe par la condensation de l'air est si active, que l'amadou s'embrase. Si l'on termine le corps de pompe par un fond mobile fait d'un morceau d'acier fortement vissé, au centre duquel est adaptée une lentille de verre qui permette de regarder dans l'intérieur, on voit, au premier coup de piston, un trait de lumière vive et brillante jaillir au milieu de l'air condensé (2).

234. On sait que la combustion du gaz oxigène et du gaz hydrogène, produite par l'étincelle électrique, donne lieu à la composition de l'eau. Le célèbre Biot annonça que l'effet d'une compression très rapide devait remplacer celui de l'électricité, en donnant lieu au dégagement d'une quantité abondante de calorique, qui ne pouvant se dissiper tout-à-coup, porterait son action sur les gaz, dont elle élèverait assez la température pour déterminer leur inflammation. Quoique M. Biot crût inutile de vérifier directement une assertion si étroitement liée avec les observations connues, l'expérience offrait par elle-même un si grand intérêt, que l'indiquer c'était contracter l'engagement de la faire. Il se servit d'une pompe de fusil à vent,

(1) Baillet, Journ. de Phys., pluviôse an VIII, p. 166.

(2) Bulletin des Sciences de la Société Philomat., prairial an XII, p. 209.

dont le fond était fermé par un morceau de glace très épais : ayant introduit dans l'intérieur de cette pompe un mélange des deux gaz, il donna un coup de piston ; aussitôt il parut une lumière extrêmement vive, accompagnée d'une violente détonation, qui était un indice certain de la combinaison des gaz. Cette expérience exige des précautions, pour prévenir les dangers auxquels elle expose ceux qui la font (1).

*Limites des Phénomènes par rapport aux Liquides  
et aux Solides.*

235. Les liquides n'étant pas sensiblement compressibles, il ne s'en dégage aucune chaleur appréciable, lorsqu'on les agite, ou que l'on essaie de resserrer leur volume dans un plus petit espace. La contraction, ainsi que la dilatation des mêmes substances, font toujours partie d'un phénomène composé, auquel l'élévation de température ou le refroidissement concourt avec l'une ou l'autre.

236. Il y a diverses manières de faire éprouver aux corps solides une diminution de volume, qui produit sur eux un effet analogue à celui que présentent, dans le même cas, les fluides élastiques. Lorsqu'on bat une barre de fer chaud, chaque coup de marteau, en rapprochant les molécules, fait sortir des jets de calorique rayonnant, qui deviennent sensibles, par l'impression de chaleur qu'ils excitent tout à l'entour.

La même chose a lieu, proportion gardée, par l'action du balancier, par celle des filières, et par les percussions répétées que subissent les métaux à froid, dans une multitude d'opérations relatives aux arts. Souvent même ces métaux en sortent avec une chaleur considérable due à la portion de calorique qui s'étant dégagée de l'intérieur, n'a pas encore eu le temps de se répandre dans les corps environnans, pour rétablir l'équilibre de température.

Le frottement, que l'on peut considérer comme une sorte

(1) Magasin encyclopédique, ou Journal des Sciences, des Lettres et des Arts, avril 1805, germinal (an XIII), p. 421.

d'écroutissement, produit de la chaleur par une cause semblable, en faisant subir aux parties sur lesquelles il agit, une condensation qui détermine un dégagement de calorique. Pour énoncer ces différens effets qui ont lieu dans un corps, soit lorsque le calorique dont il s'imbibe, pour ainsi dire, le dilate, soit lorsqu'une cause qui resserre son volume en exprime le calorique, on a appelé les corps des *éponges de chaleur*.

*Différence entre l'effet de la Compression et celui du Refroidissement.*

237. Un corps qui se contracte par le refroidissement, et un corps à l'égard duquel la diminution de volume est l'effet de la compression, perdent l'un et l'autre une certaine quantité de leur calorique qu'ils cèdent aux corps environnans. Mais le premier se dépouille à la fois de la partie de son calorique qui le maintenait à la température primitive, et de celle qu'exigeaient les dimensions du volume qui répondait à cette température, au lieu que l'autre corps développe seulement la partie relative à la différence de volume, en sorte qu'il conserve sa température. Il suit de là que si deux corps, en partant du même degré de température, ont éprouvé une égale diminution de volume, mais qui soit pour l'un l'effet de la compression, et pour l'autre celui du refroidissement, ce second corps a plus perdu de son calorique que le premier.

Soient, par exemple, deux masses égales d'air  $m$  et  $m'$ , l'une et l'autre à  $25^{\text{d}}$  au-dessus de zéro du thermomètre centigrade. Si l'on suppose que l'air  $m$  se refroidisse jusqu'à zéro, son volume se trouvera diminué d'environ  $\frac{1}{11}$ , ainsi qu'on le démontre d'après une règle que nous donnerons dans la suite. Comprimons l'air  $m'$ , jusqu'à ce que son volume soit aussi diminué de  $\frac{1}{11}$ , auquel cas, il restera à la même température de  $25^{\text{d}}$ . Donc il aura moins perdu que l'air  $m$ , qui est descendu à zéro. Concevons enfin que l'on communique à l'air  $m$  une quantité de calorique capable de faire remonter sa température à  $25^{\text{d}}$ , qui est aussi celle de l'air  $m'$ , et qu'en même temps une force quelconque le com-

prime de manière qu'il reste toujours resserré dans le même espace; alors tout sera égal de part et d'autre entre les deux masses d'air. Soit  $t$  la quantité de calorique communiquée à l'air  $m$ , et  $a$  la quantité qu'il avait perdue en se refroidissant jusqu'à zéro;  $a$  moins  $t$  représentera sa perte dans l'état actuel. Or cette perte est égale à celle que l'air  $m'$  a subie, d'où l'on voit encore que ce dernier air a moins perdu, en se resserrant de  $\frac{1}{11}$ , par l'effet de la compression, que l'air  $m$  en éprouvant une égale contraction, par l'effet du refroidissement.

Si l'on nomme  $d$  la quantité perdue par l'air  $m'$ ,  $d$  plus  $t$  désignera celle qui est sortie de l'air  $m$ . Dans cette expression,  $d$  représente une perte, commune aux deux masses d'air, d'une portion de calorique qui était latente, et  $t$  une perte particulière que l'air  $m$  a faite d'une portion de son calorique sensible. La quantité  $d$  est celle dont le dégagement se rapporte à la contraction des deux airs, et la quantité  $t$  celle dont la sortie a déterminé le refroidissement de l'air  $m$ .

238. Les corps solides, tels que les métaux, dont on resserre le volume, en les écrasant, sont dans le même cas que l'air  $m'$ . Ils ne perdent, pendant cette opération, que la quantité de calorique représentée par  $d$ , qui, comme nous l'avons vu, est très considérable, dans certaines circonstances, mais qui est inférieure à la quantité  $d$  plus  $t$ , qu'ils perdraient, en se contractant dans le même rapport par le refroidissement. Toute la différence entre les métaux et l'air, consiste en ce que les premiers, par une suite de leur ductilité, restent d'eux-mêmes dans l'état où l'écrasement les a mis, au lieu que l'air ne peut être maintenu dans son état de contraction, sans que la force qui l'y avait amené continue d'agir sur lui. L'affinité qui maintient les molécules métalliques dans leurs nouvelles positions, produit un effet semblable à celui de la compression qui détruit la tendance de l'air, pour reprendre son premier volume, en vertu de son élasticité.

## 6. De la Loi que suivent les Fluides élastiques dans la variation de leur volume, par l'effet de la Pression.

Les expériences qui ont ouvert la route pour arriver à la détermination de la loi que nous nous proposons de faire connaître, sont celles qui ont été faites depuis long-temps par Boyle et par Mariotte, et dans lesquelles ils ont employé l'air atmosphérique comme agent des phénomènes. Nous leur conservons ici le rang que leur assigne l'ordre des temps, parce que leurs résultats ont offert comme le type de ceux qu'ont obtenus depuis plusieurs physiciens, par des expériences dirigées vers le même but. Voici en quoi consistent celles dont nous avons parlé d'abord.

239. On prend un tube de verre recourbé, dont la branche la plus courte, qui doit être partout d'une égale épaisseur, est d'environ 32 centimètres ou 12 pouces de hauteur, et scellée hermétiquement à son extrémité. L'autre branche, qui est ouverte, doit avoir au moins 26 décimètres, ou huit pieds de hauteur. Le tout est fixé sur une planche qui porte une division adaptée aux deux tubes. On fait d'abord couler un peu de mercure dans la partie recourbée, pour avoir une ligne de niveau; et l'on compte le nombre de degrés compris entre cette ligne et l'extrémité supérieure de la branche la plus courte. Dans cet état de choses, l'air qui occupe cette branche fait équilibre, par son ressort, à la pression de la colonne d'air atmosphérique qui pèse dans l'autre branche, et dont la pression se transmet au moyen du mercure renfermé dans la courbure inférieure. Cette pression, ainsi que nous l'avons vu, est égale à celle d'une colonne de mercure d'environ 76 centimètres, ou 28 pouces de hauteur. On verse ensuite du mercure dans la branche la plus longue, et en même temps l'air se resserrant dans l'autre branche, par l'excès de pression qui en résulte, le mercure s'élève dans cette même branche jusqu'à ce qu'il y ait encore équilibre. On mesure alors, d'une part, la longueur de cette colonne d'air comprimé, et de l'autre, l'excès de la colonne de mercure renfermé dans la

branche la plus longue, sur celle qui occupe la plus courte. Supposons, pour plus de simplicité, que cet excès soit de 76 centimètres; on trouve que, dans ce cas, la colonne d'air comprimé est réduite à la moitié de la hauteur qu'elle avait avant qu'on eût introduit le mercure. Or cette colonne est chargée d'un poids double du premier, puisque l'on a ajouté une pression de 76 centimètres de mercure, à une égale pression exercée par l'air atmosphérique, et qui n'est pas censée avoir diminué; car on peut négliger la petite différence qui résulte de ce que les 76 centimètres qui terminent inférieurement cette colonne, sont actuellement occupés par le mercure. En général, si l'on prend le rapport entre la première pression due à la colonne de l'atmosphère, et une autre pression quelconque exercée par cette même colonne, et par le mercure surajouté, les espaces correspondans, occupés par l'air comprimé, seront dans le rapport inverse des pressions; d'où l'on voit que l'air se contracte, ainsi que nous l'avons dit, à proportion des poids qui le compriment. Si l'on retire ensuite du mercure à plusieurs reprises, l'air s'étendra par son ressort, et les espaces qu'il occupera successivement en sens contraire, suivront encore le rapport inverse des pressions.

*Résultat de Newton, qui s'applique à la théorie précédente.*

Une vue de Newton, relative aux effets de la compression des fluides élastiques, va nous servir à répandre un nouveau jour sur les circonstances qui accompagnent les phénomènes dont nous veuons de parler.

240. Des recherches dont nous parlerons dans la suite ont démontré que pour une même température, le ressort d'une quantité déterminée d'air ou de tout autre fluide élastique, est à très peu près, en raison inverse du volume; c'est-à-dire que si, en comprimant l'air, par exemple, on le réduit à la moitié de son volume, l'élasticité de ce fluide, ou la pression qu'il sera capable d'exercer sur une surface donnée, se trouvera doublée.

241. Concevons un volume d'air renfermé dans un espace

cubique, et supposons qu'on le resserre dans un nouveau cube dont le côté soit la moitié de celui du premier. Comme les molécules de l'air sont censées avoir de part et d'autre le même arrangement symétrique, il est visible que, dans le second cube, dont les faces ont une étendue quatre fois moindre que celles du premier, il y aura quatre fois plus de molécules d'air distribuées sur une partie déterminée de chaque face, et par conséquent quatre fois plus de ressorts qui agiront sur cette même partie; et puisque la pression, qui est en raison inverse du volume, est devenue huit fois plus grande, la force de chaque ressort sera doublée. D'une autre part, le côté du second cube étant la moitié de celui du premier cube, ou ce qui revient au même, la longueur de chaque rangée de molécules d'air étant devenue une fois plus petite, la distance entre deux molécules voisines sera diminuée de moitié, d'où il suit que les tensions des ressorts, dans les deux cubes, sont en raison inverse des distances entre les molécules de l'air. Tel est, en substance, le résultat de Newton (1).

242. Or nous savons que l'élasticité de l'air dépend du calorique, en sorte que nous pouvons considérer le calorique comme formant de petits ressorts bandés entre les molécules de l'air. Imaginons maintenant que les tensions de ces ressorts soient proportionnelles à la densité du calorique dont ils sont composés, ou au nombre de molécules de ce fluide qui occupent un espace donné. Sitout le calorique renfermé dans le premier cube avait passé dans le second, sa densité, et par conséquent la force de chaque ressort, ou celle que chaque molécule exerce sur les voisines, serait devenue huit fois plus grande; mais elle est seulement doublée: donc dans cette hypothèse, la compression aurait fait sortir de l'air les  $\frac{3}{4}$  ou les  $\frac{7}{8}$  du calorique qui s'y trouvait renfermé. A la vérité nous ignorons si la densité du calorique varie dans le même rapport que la force de ressort, quoique la vraisemblance soit en faveur de l'hypothèse où cela aurait lieu; mais il résulte du moins de ce que nous venons de dire, que dans un fluide élastique cou-

---

(1) *Philosophiæ naturalis Princip. mathem., sect. V, prop. 23, theoremata 17.*

densé, la quantité absolue de calorique est beaucoup moindre qu'avant la condensation, quoique le fluide renferme plus de calorique, à égalité de volume, ce qui s'accorde avec l'expérience.

243. Si l'on suppose, au contraire, que l'air se répande par la dilatation dans un nouveau cube dont le côté soit double du premier, on prouvera, par un raisonnement semblable, qu'il y aura quatre fois moins de molécules d'air, et par conséquent quatre fois moins de ressorts composés de calorique, qui répondront à une partie déterminée de la surface du second cube, et puisque la pression est devenue huit fois aussi petite, la force de chaque ressort se trouvera diminuée de moitié; en même temps la distance entrè les molécules voisines sera doublée, c'est-à-dire que les tensions des ressorts seront encore ici en raison inverse des distances entre les molécules de l'air.

Si les tensions des ressorts étaient proportionnelles aux densités du calorique, il est facile de voir que l'air dilaté dans un volume huit fois aussi grand, devrait renfermer quatre fois autant de calorique, pour que la force de chaque ressort fût la moitié de ce qu'elle était d'abord, d'où il suit que la quantité de calorique serait triple de la quantité primitive. Mais cette détermination n'étant encore qu'hypothétique quoique peut-être elle ne s'éloigne pas beaucoup de la vérité, tout ce que nous pouvons conclure certainement de ce qui précède, c'est qu'un fluide élastique dilaté, renferme une quantité de calorique beaucoup plus grande qu'avant la dilatation, quoiqu'à volume égal la quantité y soit plus petite.

## 7. Phénomènes qui dépendent de l'action du Calorique, pour faire varier le volume et le ressort du fluide qui en est l'agent.

Le sujet qui va nous occuper ne fera autre chose qu'offrir, sous une forme différente, le résultat de la loi de Mariotte, en faisant intervenir dans les phénomènes l'action du calorique; il a encore cela de commun avec celui-ci, de même qu'avec une grande partie de ceux qui appartiennent aux sciences naturelles, que les

connaissances à l'aide desquelles il a commencé à se développer , ont été puisées dans l'étude des corps qui s'offrant comme d'eux-mêmes à l'observation , semblaient se placer au premier rang , pour être interrogés par l'expérience. Ainsi , c'est en soumettant l'air atmosphérique à l'action de la chaleur , que l'on a d'abord reconnu la loi que suit ce fluide , en se dilatant entre certaines limites de température. Ce n'était encore , à cette époque , qu'une loi particulière , et comme inhérente à la physique de l'air ; mais depuis que la Chimie s'est enrichie par la découverte d'une multitude de substances invisibles , élastiques et à la fois susceptibles d'être coercées comme l'air , les physiiciens ont entrepris de considérer ces nouvelles espèces d'air sous le même point de vue ; et leurs recherches ont produit cet avantage précieux , dont on pourrait également citer des exemples dans beaucoup d'autres genres , que l'accord entre les résultats a servi à prouver la généralité des propriétés dont ils dépendent , et a conduit , par degrés , la science à ce point de hauteur d'où elle embrasse tous les phénomènes dans une même conception.

244. Le calorique qui , à mesure qu'il élève la température de l'air , augmente le volume de ce fluide , lorsqu'il a la faculté de s'étendre , ajoute à sa force de ressort , lorsque le volume reste fixe , c'est-à-dire , qu'alors l'air exerce un plus grand effort contre l'obstacle qui le captive. Or il est facile de voir que la nouvelle pression qu'il faut employer , pour empêcher une masse d'air échauffé de se dilater , donne la mesure de la dilatation qui aurait effectivement lieu , si l'air continuait d'être soumis à la pression primitive. Supposons , par exemple , que celle-ci soit égale à la pression moyenne de l'atmosphère , qui fait équilibre au poids d'une colonne de mercure de 28 pouces ou environ 76 centimètres. Supposons de plus que l'action d'une nouvelle chaleur augmente le ressort de l'air , au point que , pour le tenir resserré dans le même espace , il faille employer une pression double , ou de 152 centimètres de mercure. On en conclura que si l'air n'avait à soutenir que la pression de 76 centimètres , son volume se trouverait doublé , au terme où son ressort diminué par la dilatation ferait équilibre à cette même pression.

*Résultats d'Amontons.*

Les premiers résultats qui se présentent, relativement à cet objet, sont ceux d'Amontons, l'un des physiciens qui aient le mieux connu l'art de mettre la nature en action par l'expérience, et de la faire parler en même temps aux yeux et à l'esprit.

245. Voici le procédé employé par ce savant célèbre, pour mesurer l'augmentation de ressort que l'air éprouvait entre deux limites connues de chaleur. Il avait choisi pour la plus basse de ces limites, la température modérée qui règne pendant le printemps ou l'automne, et qui répond à 14<sup>d</sup> environ de Réaumur. L'autre limite était le degré de l'eau bouillante, et nous devons dire ici que c'était Amontons qui, le premier, avait observé le phénomène remarquable qu'offre ce liquide, en restant à la même température, dès qu'une fois il est parvenu à l'ébullition, quelque long-temps qu'on le laisse sur le feu, et quelle que soit l'activité de la chaleur. Mais on ne connaissait point alors le terme opposé, qui est celui de la glace fondante, et, au défaut de ce terme fixe, Amontons avait adopté la température moyenne entre les divers degrés de chaleur et de froid que l'on éprouve dans notre climat.

Son appareil consistait dans un tube de verre, dont la partie inférieure qui était recourbée se terminait par une boule. La branche ouverte, dont la longueur était d'environ 47 pouces ou 127 centimètres, avait un très petit diamètre, tandis que celui de la boule était, à proportion, très considérable. Amontons introduisait dans le tube une quantité de mercure suffisante pour remplir la courbure, en sorte que, quand le tube était situé verticalement, le mercure s'arrêtait d'une part dans la partie inférieure de la boule, et d'une autre part à la même hauteur dans le tube. Ce niveau dépendait de ce que l'air renfermé dans la boule était resté dans son état naturel, où il faisait équilibre, par son ressort, à la pression de l'atmosphère.

La température primitive étant, comme nous l'avons dit, d'environ 14<sup>d</sup> de Réaumur, on faisait prendre à la boule la chaleur

de l'eau bouillante. L'air intérieur acquérait alors un surcroît de ressort, qui déterminait une portion du mercure sur lequel s'exerçait sa pression, à passer dans le tube, où il s'élevait en colonne. Pendant ce mouvement, l'air s'étendait pour occuper l'espace quitté par le mercure; mais la quantité de sa dilatation pouvant être négligée, à cause de la grande capacité de la boule, son volume n'était pas censé avoir changé, en sorte que l'augmentation de ressort, mesurée par la colonne de mercure qui s'élevait au-dessus du niveau, se trouvait sensiblement proportionnelle à l'accroissement de la force élastique de l'air. Or cet air, au commencement de l'expérience, supportait la pression de l'atmosphère, qui représentait celle d'une colonne de mercure d'environ 28 pouces ou 753 millimètres de longueur. Mais après que l'air avait pris la chaleur de l'eau bouillante, le mercure classé dans le tube y occupait un espace d'environ 9 pouces  $\frac{1}{2}$  ou 252<sup>mm</sup>,6 au dessus du niveau, c'est-à-dire que la pression à laquelle l'air faisait équilibre, était alors de 37 pouces  $\frac{1}{3}$  ou de 1010<sup>mm</sup>,6. Amontons en avait conclu que, depuis la température moyenne jusqu'au degré de l'eau bouillante, le ressort de l'air, tendu d'abord par la pression moyenne de l'atmosphère, augmente d'environ un tiers.

Si, au lieu de ne laisser d'abord supporter à l'air renfermé dans la boule que la pression moyenne de l'atmosphère, on le chargeait en outre d'une colonne de mercure dont la longueur fût, par exemple, de 28 pouces, auquel cas la pression se trouvait doublée, et l'air intérieur occupait un espace une fois moindre que dans son état naturel (240), le ressort de ce fluide augmentait toujours suivant le même rapport, par la chaleur de l'eau bouillante, c'est-à-dire que, dans le cas présent, la pression primitive étant de 56 pouces, l'allongement de la colonne était de 18 pouces  $\frac{2}{3}$ .

246. Amontons conçut l'idée d'appliquer ce dernier résultat à la construction d'un thermomètre d'air, qui fût comparable, et au moyen duquel on pût transmettre, disait-il, à la postérité les observations que l'on aurait faites sur la température des différens climats, au lieu que jusqu'alors les divers instrumens de

ce genre n'avaient aucune relation entre eux, et n'offraient que des indications locales et isolées. Ce thermomètre avait plusieurs inconvéniens qui l'ont fait abandonner ; la température moyenne n'offrait pas une limite assez fixe ; il fallait de plus, en consultant l'instrument, avoir égard à la hauteur du baromètre, pour faire la correction qu'exigeait la variation de la colonne de mercure au-dessus ou au-dessous de 28 pouces. Enfin ce thermomètre devenait embarrassant par la grandeur de ses dimensions. Mais c'était le premier dont l'exécution eût été dirigée vers la véritable perfection de ce genre d'instrumens, et il renfermait un terme invariable de chaleur qui a passé dans la construction des thermomètres aujourd'hui en usage, comme nous le verrons bientôt.

247. Quelle que fût la masse d'air employée dans les expériences que nous avons citées, l'augmentation de ressort suivait toujours la même loi ; d'où résultait ce principe, que si des masses d'air inégales, qu'on suppose avoir la même température, sont chargées de poids égaux, leur force de ressort s'accroîtra également par des degrés égaux de chaleur, en sorte que, pour les maintenir dans le même espace, il faudra augmenter de la même quantité les poids qui les compriment.

L'expérience faisait voir encore que si des masses d'air égales étaient chargées de poids inégaux, à égalité de température, leur force élastique s'accroissait proportionnellement à ces mêmes poids, par une même augmentation de chaleur. Ainsi, une masse d'air qui, étant d'abord chargée de 30 pouces de mercure, au-dessus de la pression primitive, avait acquis un surcroît d'élasticité mesuré par 10 pouces de mercure, dans le passage de la température moyenne au degré de l'eau bouillante, en acquérait un égal à 20 pouces, lorsque la charge était de 60 pouces, en sorte que les poids comprimans devaient être augmentés dans le même rapport, pour que le volume ne subît aucun changement.

### *Résultats de Gay-Lussac et de Dalton.*

Le peu de fixité du terme moyen qu'Amontons avait pris dans le cours des saisons, jetait nécessairement de l'incertitude sur la conséquence qu'il avait déduite de ses observations. Plusieurs sa-

vans se sont occupés depuis du même objet, en prenant le degré de la glace fondante et celui de l'eau bouillante, pour limites de la température, et la pression moyenne de l'atmosphère, pour celle qui devait agir uniformément sur l'air; mais la grande diversité qui se trouve entre leurs résultats, faisait désirer que ce point de physique fût soumis à un examen plus rigoureux. Gay-Lussac a entrepris de remplir cette tâche, et, par une suite d'expériences faites avec beaucoup de soin et de précision, il est parvenu à déterminer non-seulement la dilatation de l'air atmosphérique, entre les deux limites dont nous avons parlé, mais même celle de divers autres gaz solubles et non solubles; et, ce qui ajoute un nouveau degré de mérite aux résultats qu'il a obtenus, c'est l'uniformité de la loi de dilatation à laquelle il a été conduit (1).

248. Avant d'exposer les résultats dont il s'agit, ce savant discute les différens moyens employés jusqu'alors pour arriver au même but, et il remarque que la cause qui a le plus contribué à les rendre fautifs, a été la présence de quelques gouttes d'eau qui étaient restées dans les appareils. Cette eau, en occupant, par sa vaporisation, un volume près de 1800 fois plus considérable que dans l'état de liquidité, déplaçait une grande partie de l'air renfermé avec elle dans le même ballon, en sorte que l'on attribuait à l'air une dilatation beaucoup trop forte, en supposant qu'il remplissait seul la capacité du ballon où la température était parvenue au degré de l'eau bouillante. Gay-Lussac a employé des procédés différens par rapport aux gaz insolubles et à ceux qui sont solubles.

249. Voici d'abord à quoi se réduit sa méthode, relativement aux premiers : on prend un ballon très sec, dans lequel on introduit le gaz dont on veut déterminer la dilatation; on fait ensuite chauffer ce ballon jusqu'au terme de l'eau bouillante, et quand la dilatation a produit tout son effet pour faire sortir une partie du gaz, on refroidit celui-ci au degré de la glace fondante,

---

(1) Annales de Chimie, par Guyton, Monge, Berthollet, etc., N<sup>o</sup> 148, p. 137 et suiv.

et on laisse entrer en même temps dans le ballon autant d'eau que le permet la présence du gaz qui y reste; sur quoi il est à remarquer que le gaz, dans ses différens états, doit toujours être ramené à l'équilibre avec la pression constante de l'atmosphère. Cela posé, le volume de l'eau qui s'est introduite dans le ballon, représente la quantité dont le gaz qui y reste est susceptible de se dilater, depuis le degré de la glace fondante, jusqu'à celui de l'eau bouillante. On pèse le ballon d'abord dans cet état, puis après l'avoir rempli d'eau, et enfin après l'avoir vidé. La différence entre le poids du ballon vide et celui du ballon plein d'eau, donne la capacité du ballon; et la différence entre le poids du ballon vide et celui du ballon contenant un volume d'eau égal à l'espace que le gaz a laissé libre en se contractant, donne la mesure de ce volume, après quoi il est facile de déterminer le rapport entre les volumes du gaz dans les deux températures extrêmes.

250. En opérant de cette manière, Gay-Lussac a trouvé que l'air atmosphérique se dilate depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante dans le rapport de 100 à 137,5, un peu plus fort que celui de 3 à 4; il en résulte que la dilatation, entre les mêmes limites, est de  $\frac{37,5}{100}$  ou de  $\frac{3}{8}$  du volume primitif. Le gaz hydrogène, le gaz oxygène et le gaz azote soumis aux mêmes expériences, ont donné des résultats absolument semblables.

251. Pour déterminer la dilatation des gaz solubles, Gay-Lussac a eu recours à un moyen aussi simple qu'ingénieux, en prenant pour terme de comparaison la dilatation d'un des gaz insolubles, qui avaient été l'objet des expériences précédentes. Son appareil était composé de deux tubes exactement gradués sur leur longueur et plongés verticalement dans un bain de mercure; l'un contenait de l'air atmosphérique, et l'autre le gaz qu'on voulait éprouver, et les deux fluides s'élevaient dans les tubes à la même hauteur. On portait cet appareil dans une étuve dont on élevait progressivement la température, et on voyait les deux gaz monter dans leurs tubes, de manière à correspondre toujours très exactement aux mêmes divisions, ce qui prouvait l'égalité des dilatations. Les fluides qui ont été l'objet de cette comparai-

son sont le gaz acide carbonique, le gaz acide hydrochlorique, le gaz sulfureux et le gaz nitreux. Cette uniformité dans la marche que suivaient les différents gaz en se dilatant, offrait déjà une forte raison d'analogie, pour penser que les vapeurs devaient être soumises à la même loi. Gay-Lussac s'est contenté, à cet égard, d'une seule expérience, qui devait servir plutôt d'exemple que de preuve. Il a choisi la vapeur de l'éther sulfuré; et en employant le même procédé que pour les gaz solubles, il a observé que le progrès de la dilatation était absolument égal de part et d'autre.

Ces résultats s'accordent avec ceux des expériences que Dalton avait entreprises vers le même temps en Angleterre, relativement au même objet, mais dont le chimiste français ne pouvait avoir eu connaissance, lorsqu'il fit part de son travail à l'Institut national des Sciences et Arts. Charles avait déjà obtenu, il y a environ quinze ans, des résultats semblables pour les gaz insolubles; mais ses expériences sur les gaz solubles lui avaient offert une dilatation particulière à chacun d'eux, et sous ce point de vue, ses résultats différaient beaucoup de ceux de Gay-Lussac.

Ainsi la dilatabilité des divers gaz et des vapeurs, par l'action de la chaleur, ne dépend en aucune manière de leur nature, mais seulement de leur état élastique. Jamais la Physique n'est plus intéressante que quand l'étude des phénomènes naturels la conduit à ces propriétés qui les généralisent, et nous les montrent tous renfermés dans un seul.

252. Pour rendre raison de cette uniformité de la loi à laquelle sont soumises les dilatations des gaz et des vapeurs, il suffit de considérer que les affinités qu'exerçaient entre elles les molécules de chacun de ces corps, dans l'état de liquidité, et qui balançaient diversement la force élastique du calorique, suivant les différentes natures des mêmes corps, sont entièrement détruites, en vertu du passage à l'état de fluidité. Il ne reste donc plus alors que la force élastique du calorique, qui, trouvant les molécules de tous les fluides pour ainsi dire également disposées à lui obéir, doit déterminer une marche uniforme dans les dilatations qui ont lieu entre les mêmes limites de température.

253. Dalton, en continuant ses expériences sur les fluides, est parvenu à un autre résultat non moins remarquable, en ce qu'il ramène encore à une même échelle les forces élastiques des divers fluides comparées entre elles, à des températures particulières pour chacun d'eux (1). Voici en quoi consiste ce résultat : si l'on prend pour terme commun la force qui fait équilibre à une pression donnée, telle que la pression moyenne de l'atmosphère, le rapport suivant lequel varie cette force, par des différences égales de température, est le même pour tous les fluides. Ainsi la vapeur aqueuse qui, à une température de  $100^{\text{d}}$  (C) (2), ( $80^{\text{d}}$  R.), ou au terme de l'ébullition de l'eau, est capable de soutenir une pression de  $76^{\text{cent.}}$  ( $28^{\text{po.}}$ ), perd la moitié de sa force, par une diminution de  $16^{\text{d}},6$  (C) ( $13^{\text{d}},3$  R.), dans sa température, et cette même force se trouve doublée, par un accroissement de température égal à  $22^{\text{d}},2$  (C), ( $17^{\text{d}},8$  R.). Or la vapeur de tout autre fluide perd également la moitié de sa force, en se refroidissant de  $16^{\text{d}},6$ , au-dessous du terme particulier de son ébullition, et acquiert une force double en s'échauffant de  $22^{\text{d}},2$ , au-dessus du même terme.

254. Choisissons un autre rapport, et faisons-en l'application à la vapeur de l'éther et à celle de l'eau. On sait que l'éther entre en ébullition à  $38^{\text{d}},8$  (C) ( $31^{\text{d}},4$  R.); c'est-à-dire, qu'alors sa vapeur soutient une pression de  $76^{\text{cent.}}$  ( $28^{\text{po.}}$ ); la même vapeur, refroidie jusqu'à  $16^{\text{d}},6$  (C) ( $13^{\text{d}},3$  R.), ne soutient plus qu'une pression de  $30^{\text{cent.}}$  Telle est aussi la pression que soutient la vapeur aqueuse, à  $77^{\text{d}},8$  (C) ( $62^{\text{d}},2$  R.); or, si l'on prend la différence entre  $16^{\text{d}},6$  et  $38^{\text{d}},8$ , qui indiquent, par rapport à l'éther, le terme de l'ébullition, on trouve qu'elle est de  $22^{\text{d}},2'$  comme celle qui existe entre  $77^{\text{d}},8$  et  $100^{\text{d}}$  qui répondent à la chaleur de l'eau bouillante.

D'une autre part, la vapeur de l'éther échauffée jusqu'à

(1) Bibliothèque britan., N° 160, vol. xx, p. 343 et suiv.

(2) Dans toutes les indications de température que nous donnons ici, la lettre C désigne le thermomètre centigrade, et la lettre R, le thermomètre de Réaumur.

63<sup>d</sup>,8(C)(51<sup>d</sup>,4 R.), fait équilibre à une pression de 16<sup>decim.</sup>, et la vapeur aqueuse a la même force, lorsque sa température est de 125<sup>d</sup>(C) (100<sup>d</sup> R.). Or, chacune de ces deux températures diffère de 25<sup>d</sup> de celle qui répond à l'ébullition du liquide auquel elle se rapporte, cette différence étant égale à 63<sup>d</sup>,8—38<sup>d</sup>,8 pour la vapeur de l'éther, et à 125<sup>d</sup>—100<sup>d</sup> pour la vapeur aqueuse. Ainsi l'on voit partout les divers fluides sur lesquels agit le calorique, s'assimiler entre eux dans leur manière d'obéir à son action, comme s'ils n'étaient qu'un même fluide pris dans différens états de densité. Les développemens qui vont suivre acheveront, par de nouveaux traits, de faire ressortir cette ressemblance.

255. Les recherches de M. Gay-Lussac, exposées ci-dessus, ne donnaient le rapport des dilatations que pour les deux limites qui répondent aux extrêmes de la température. Il restait à déterminer avec précision le coefficient qui représente la dilatation relative à chaque degré du thermomètre. Il était réservé au même physicien de compléter, par ce résultat important, une théorie que ses savantes recherches avaient avancée vers sa perfection. Ses dernières expériences ont prouvé, 1<sup>o</sup>. que tous les gaz se dilatent uniformément, dans l'intervalle de 0<sup>d</sup> à 100<sup>d</sup> du thermomètre centigrade; 2<sup>o</sup>. que la dilatation due à un même accroissement de température, est exactement la même soit pour tous les gaz, soit pour toutes les vapeurs, soit enfin pour tous les mélanges de gaz et de vapeurs; 3<sup>o</sup>. que cette dilatation commune est de 0,00375, pour chaque degré du thermomètre, le volume du gaz à 0<sup>o</sup> étant pris pour unité (1).

Ces résultats ont été confirmés par les nouvelles recherches de MM. Dulong et Petit, qui se sont assurés de plus que la même uniformité se soutenait dans les températures les plus élevées; en sorte qu'ils ont établi en principe, que tous les gaz se dilatent absolument de la même manière et de la même quantité pour des changemens égaux de température.

256. Si nous rapprochons maintenant dans une même vue les diverses méthodes exposées précédemment, il nous sera facile d'a-

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 1816, t. 1, p. 110.

percevoir les rapports qui en sont comme le lien commun. Les résultats d'Amontons, que nous avons cités en dernier lieu (1) conduisent à une conséquence qui n'en est que la traduction dans un langage différent; savoir, qu'à une température quelconque, mais constante, le volume d'un même gaz, sous diverses pressions est en raison inverse de ces pressions, ou, ce qui revient au même, la force élastique d'un même gaz, à différentes densités, est proportionnelle à ces densités; et parce que la force élastique d'un gaz s'accroît à proportion des poids dont on le charge, et que son volume varie en raison inverse de sa densité, on voit que le résultat qui vient d'être énoncé peut, à son tour, être exprimé de cette autre manière, qu'un gaz se contracte dans le rapport des poids qui le compriment; ce qui revient à la loi de Mariotte. La considération de cette loi, ainsi généralisée, est de la plus haute importance en Chimie, où l'on en fait continuellement usage, pour réduire à une même pression les volumes de divers gaz, observés sous des pressions différentes.

## 8. De la pesanteur spécifique des Fluides élastiques.

258. Les pesanteurs spécifiques des fluides élastiques, se rapportent ordinairement à celle de l'air, prise pour unité. Leur détermination revient donc à mesurer comparativement sous le même volume, le poids d'un gaz quelconque et celui de l'air atmosphérique. Cette opération est très délicate; elle exige des précautions infinies, à cause des variations continues que ces corps éprouvent dans leur constitution. On sait, en effet, que la température d'un gaz, la pression qu'il supporte, et la quantité de vapeur aqueuse qu'il renferme, sont autant de causes qui influent sur sa densité. On voit donc que, pour obtenir des résultats comparables entre eux, il faut opérer sur des gaz bien desséchés, sous une pression barométrique constante, et à un même degré de température. Pour effectuer la double pesée, on se sert d'un ballon de verre, de six livres au moins de capacité, et fermé par un

---

(1) Mémoire cité plus haut.

robinet. On y fait le vide à l'aide de la machine pneumatique, et après avoir fermé le robinet, on pèse le ballon dans cet état, à la balance ordinaire, en le suspendant par un fil à l'un des plateaux. Cela fait, on le remplit avec précaution d'air atmosphérique ou de gaz, puis on le pèse de nouveau. L'augmentation de poids qu'il éprouve est évidemment due au fluide élastique qu'il renferme. Lorsqu'on a déterminé de cette manière le poids d'un gaz quelconque et celui de l'air, à volume égal, le rapport entre ces poids fait connaître la pesanteur spécifique du gaz dont il s'agit. C'est ainsi qu'on a trouvé que le gaz oxygène et le gaz hydrogène, qui sont les éléments de l'eau, avaient pour pesanteurs spécifiques, le premier, 1,1036, et le second, 0,0732, et que celle de la vapeur aqueuse est 0,624. Le gaz azote qui entre dans la composition de l'air atmosphérique, a pour pesanteur spécifique 0,969, et le gaz acide carbonique, 1,5196.

### 9. Des Dilatations et Contractions de divers Corps solides, par les Variations de la température.

258. C'était une espèce d'axiome reçu depuis très long-temps, que la chaleur dilate les corps et que le froid les resserre. Mais il a fallu aux physiciens des connaissances amenées par les progrès que la science a faits dans ces derniers temps, pour traduire l'axiome dont il s'agit en cet autre langage, qui offre les deux phénomènes sous leur véritable point de vue : à mesure que le calorique s'accumule dans un corps, il en écarte les molécules, en luttant avec avantage contre leur affinité mutuelle, et à mesure qu'il abandonne un corps, l'affinité reprenant le dessus, rapproche les molécules. Ainsi nous devons nous représenter cette immense multitude de corps répandus dans la nature, comme ayant leurs molécules sollicitées par deux forces contraires, aux prises l'une avec l'autre, et dont chacune domine ou cède tour à tour, en sorte qu'au milieu des alternatives continuelles de la température, ces molécules font sans cesse des oscillations autour des centres de leurs sphères d'activité sensible. Les effets ordinaires de ces oscillations échappent à nos sens; mais il est des circon-

stances où l'une des deux forces prévaut tellement sur l'autre, que l'augmentation ou la diminution de volume qui en est la suite ne doit pas être négligée, surtout lorsque ces variations qui en elles-mêmes sont peu considérables, s'agrandissent dans les résultats des observations auxquelles est destiné un mécanisme ou un appareil, dont les pièces sont exposées, pendant ces variations elles-mêmes, à l'inconstance de la température.

259. On a cherché à déterminer particulièrement les dilata-tions et les contractions que cette cause fait éprouver à certaines substances d'un usage plus fréquent; ainsi l'on a trouvé que, pour chaque degré du thermomètre dit de Réaumur, le fer se dilate d'environ  $\frac{1}{75000}$  de chacune de ses dimensions, le cuivre de  $\frac{1}{43000}$ , le platine de  $\frac{1}{82000}$  et le verre de  $\frac{1}{100000}$ .

### *Règle d'un usage facile dans les Opérations relatives au même objet.*

260. Pour estimer la dilatation d'une des surfaces d'un solide, lorsque l'on connaît le rapport de dilatation de la substance dont il est composé, on multiplie la fraction qui représente ce rapport, par le nombre de degrés dont la température a été élevée, puis l'on prend le double du résultat; et pour évaluer la dilatation de tout le volume, on triple le même résultat; par exemple, si l'on a une masse de fer qui se soit dilatée, en passant d'une température de  $10^d$  du thermomètre dit de Réaumur, à celle de  $15^d$ , ce qui fait  $5^d$  d'élévation pour la température, on multiplie par 5 la fraction  $\frac{1}{75000}$ , qui exprime le rapport de dilatation du fer; et en triplant le résultat, on a  $\frac{1}{30000}$  ou  $\frac{1}{30000}$ , ce qui fait connaître que le corps s'est dilaté d'une quantité égale à  $\frac{1}{30000}$  de son volume. Les géomètres verront aisément que cette méthode se réduit à considérer le corps comme un parallélépipède, dont la solidité serait le produit des trois dimensions de ce corps, et à chercher ensuite l'accroissement de cette solidité, en faisant varier chaque dimension d'après la loi donnée de la dilatation, et en rejetant du résultat les quantités affectées des puissances qui passent le premier degré. L'erreur produite par cette omission est censée nulle par

rapport à ce genre de résultats (1). On suppose, dans ces évaluations, que les degrés de dilatation suivent sensiblement les variations de la température; supposition permise dans le cas présent, parce que les corps que l'on considère ont une température modérée, et sont encore loin de la fusion, où l'action du calorique acquiert une si grande prépondérance sur l'affinité, que la dilatation prend une marche beaucoup plus rapide que celle de la température.

Les savans distingués qui ont déterminé les nouvelles unités de mesure et de poids, ont senti combien il était intéressant d'appliquer cette méthode aux résultats de leurs opérations. Les règles de platine destinées à mesurer les bases de la chaîne de triangles d'où l'on a déduit la valeur de l'arc du méridien qui traverse la France, ont été employées à différens jours, par des températures différentes. Le cylindre de laiton qui a servi à fixer l'unité de poids (62), n'avait plus la même température quand on l'a pesé dans l'eau, que quand on a évalué sa solidité. La connaissance de la quantité dont le platine et le laiton se dilatent, pour chaque degré du thermomètre, a fourni les moyens de faire disparaître les petits écarts de la température, et d'arriver aux mêmes résultats que si l'observation eût procédé comme la théorie.

### *Pendule compensateur.*

261. On sait combien la dilatation et la condensation des métaux, par les variations de la température, nuisent à la régularité du mouvement des horloges, en augmentant ou en diminuant la

(1) Soient  $x, y, z$ , les trois dimensions du corps,  $\frac{1}{s}$  le rapport de dilatation pour un degré de température, et  $n$  le nombre de degrés dont la température s'est élevée. On supposera que les quantités  $x, y, z$  soient devenues, la première  $x + \frac{x}{s}$ , la seconde  $y + \frac{y}{s}$ , et la troisième  $z + \frac{z}{s}$ . Multipliant ces trois dernières quantités l'une par l'autre, et supprimant les fractions dont le dénominateur est  $s^2$  ou  $s^3$ , on aura  $xyz + \frac{3xyz}{s} - xyz$ , ou  $\frac{3xyz}{s}$ , pour la dilatation qui répond à un degré; donc la dilatation totale sera  $\frac{3nxyz}{s}$ .

longueur de la verge du pendule, dont les oscillations se trouvent, par là même, retardées ou accélérées. On est parvenu, par un mécanisme ingénieux, à tourner cette cause d'irrégularité contre elle-même, et à faire naître de ses anomalies la constance et l'uniformité. Ce mécanisme consiste, en général, à combiner avec la verge de fer du pendule, un autre corps métallique, qui est ordinairement de cuivre, et à disposer le tout, de manière que quand la verge de fer à laquelle est suspendue la lentille, s'allonge ou se raccourcit, le cuivre éprouvant de semblables variations en sens contraire, établisse une exacte compensation, dont l'effet soit de maintenir le centre d'oscillation constamment à la même hauteur.

*Autres Exemples de Dilatations ou de Contractions produites par les mêmes causes.*

262. L'influence du calorique sur les dimensions des corps se montre dans une multitude d'autres faits, dont l'observation nous est familière. Un changement un peu marqué de température altère le degré de tension des cordes dans les instrumens de musique, suivant un autre degré que celui qui a été réglé par l'accordeur, et il faut que, par une nouvelle opération, il rende aux sons cette justesse, sans laquelle il n'y a point d'harmonie.

263. On peut rendre la dilatabilité du verre très sensible à l'aide d'une expérience dont le résultat excite toujours la surprise de ceux qui la voient pour la première fois. On prend un tube de verre d'un petit diamètre, terminé par une boule de la grosseur d'une orange; on remplit la boule et une partie du tube d'une liqueur colorée, et l'on marque sur le tube l'endroit où elle s'arrête; on plonge la boule dans un vase rempli d'eau prête à bouillir, puis on la retire: au moment de l'immersion, la liqueur du tube descend précipitamment d'une quantité considérable; mais elle remonte un peu plus haut que la marque faite sur ce tube, dès que l'on a retiré la boule de l'eau chaude. Dans cette expérience, la chaleur qui se communique d'abord au verre en dilate

les parties, ce qui augmente la capacité de la boule, et fait descendre la liqueur; la boule retirée ensuite de l'eau chaude, et remise en contact avec l'air, se resserre, et la liqueur qui a déjà acquis une petite quantité de chaleur, s'élève un peu au-dessus de son premier niveau.

La matière des poteries que l'on fabrique pour nos usages, étant par elle-même un mauvais conducteur de la chaleur, surtout si son tissu est compact et serré, il en résulte un inconvénient qui devient plus ou moins sensible, lorsque nous exposons ces vases à l'action du calorique. Ce fluide, par une suite de la lenteur avec laquelle il se distribue, s'accumulant aux endroits qui lui offrent un plus libre accès, tend à y produire un écartement entre les molécules; et en supposant que par des précautions on évite les ruptures qui mettent un vase hors de service, il s'y fait, dès la première fois qu'on l'expose au feu, une multitude de petites gerçures, qui s'annoncent par une espèce de pétilllement, et qui deviennent apparentes à l'œil, en formant comme un réseau sur la surface du vernis dont le vase est enduit. Un tissu plus lâche et plus poreux obvierrait à cet inconvénient, mais le vase en deviendrait plus frêle; en sorte qu'on ne peut obtenir l'une de ces deux qualités, la solidité et la résistance à l'action du feu, qu'aux dépens de l'autre.

## 10. Du Thermomètre.

Les changemens de volume que subissent les liquides, suivant que la quantité de calorique augmente ou diminue dans l'intérieur de ces corps, ont donné naissance à un instrument précieux pour le physicien, qu'il dirige dans une multitude d'expériences, et qui est même devenu d'un usage presque général, par l'intérêt qu'ont tous les hommes à le consulter. Cet instrument est le thermomètre, qui sert à mesurer les degrés de la chaleur. Avant son invention, on n'avait que des indications incertaines et confuses sur les variations de la température; on se bornait à comparer entre eux les hivers les plus rigoureux et les étés les plus brûlans, d'après certains effets généraux qui offraient un rappro-

chement presque aussi vague que le sont par elles-mêmes les expressions de froid et de chaud. Le thermomètre nous a mis à portée de tenir un journal fidèle et détaillé des différentes saisons de chaque année, et des effets gradués de leur température.

### *Origine du Thermomètre.*

264. Cet instrument, dont on attribue la première idée à un hollandais nommé Drebbel, était d'abord très imparfait, comme le sont la plupart des inventions humaines à leur naissance. Il consistait en un tube de verre, terminé d'un côté par une boule, et ouvert à l'extrémité opposée. On le plongeait, par cette même extrémité, dans une liqueur colorée, puis, en appliquant la main sur la boule, pour échauffer et dilater l'air intérieur, on déterminait une portion de cet air à s'échapper à travers la liqueur; en sorte que, quand on retirait ensuite la main, l'air qui restait, venant à se condenser par le refroidissement, permettait à la liqueur de s'introduire jusqu'à une certaine hauteur par la pression de l'air extérieur. L'instrument se trouvait alors en état de servir, et c'était la dilatation de l'air intérieur, ou sa contraction, en vertu des variations de la température, qui, en faisant descendre la liqueur suspendue dans le tube, ou en la laissant remonter, indiquait ces mêmes variations. Mais il est aisé de sentir que cet instrument, dont la marche était compliquée à la fois des effets du thermomètre et de ceux du baromètre, ne pouvait donner que des indications équivoques.

### *Thermomètre de Florence.*

265. Bientôt les physiiciens s'occupèrent de perfectionner cette première ébauche, et d'amener l'instrument à n'être plus qu'un simple thermomètre. Tel était celui qu'on a nommé *thermomètre de Florence*, et qui consiste dans un tube de verre, terminé de même par une boule, mais que l'on scellait hermétiquement par le haut, après l'avoir rempli d'une liqueur colorée jusque vers le milieu de sa hauteur.

On appliquait ensuite ce tube sur une planche graduée, et l'on jugeait de la dilatation ou de la contraction de la liqueur par le nombre des degrés parcourus. Mais comme tout était arbitraire, et dans la construction de l'instrument, et dans les divisions de l'échelle, chaque instrument avait un langage qui ne pouvait être entendu que par celui qui le consultait; et deux instrumens, ainsi construits, ne pouvaient se servir mutuellement d'interprètes, ni mettre les observateurs à portée de juger si la chaleur avait été plus forte, ou le froid plus vif dans un lieu que dans l'autre.

*Conditions requises pour obtenir un bon Thermomètre.*

266. La perfection du thermomètre réside essentiellement dans la réunion de deux qualités, dont l'une est d'être comparable avec lui-même, dans les divers mouvemens de sa liqueur, et l'autre d'être comparable avec tous les thermomètres construits d'après les mêmes principes, situés dans des climats différens. Pour concevoir en quoi consiste la première qualité, il faut se rappeler que le calorique communiqué à un corps emploie une partie de ses molécules à élever la température de ce corps, et l'autre à le dilater (149). L'élévation de température dépend de la quantité dont la tension du calorique sensible a été augmentée : or on juge de cet accroissement de tension par la quantité de la dilatation qui est l'effet d'une autre partie du calorique, c'est-à-dire de celle qui est devenue latente. Il faut donc, pour que la quantité de la dilatation puisse donner la mesure de l'accroissement de tension, que la partie du calorique qui sert à dilater le corps soit proportionnelle à celle qui élève la température. C'est ce qui n'a pas lieu dans la plupart des corps, où le rapport entre la portion de calorique qui dilate et celle qui chauffe varie avec la dilatation elle-même; mais nous verrons qu'il existe des substances dans lesquelles les deux parties varient par des degrés sensiblement proportionnels au moins dans l'intervalle compris entre les limites des observations ordinaires.

Pour obtenir la seconde qualité, qui rend les divers thermomè-

tres comparables entre eux, il faut que les mouvemens de la liqueur se combinent tellement avec la graduation, dans chacun d'eux, que quand la température est la même, dans les différens lieux où nous les supposons placés, ils indiquent tous le même degré de leur échelle. C'est vers ce but que se sont dirigées d'abord les recherches des physiciens; celles qui ont rapport à la première qualité dont l'influence était alors méconnue ou négligée, tenaient à des procédés délicats, réservés pour le temps où la théorie du calorique, si délicate elle-même dans son ensemble, serait arrivée plus près de sa perfection. Avant de faire connaître la construction qui réunit l'une et l'autre qualité, nous en décrirons une qui répond à une époque mémorable dans l'histoire du thermomètre, et qui mérite d'être exposée, même après que l'on a trouvé encore mieux.

### *Thermomètre de Réaumur.*

267. Ce célèbre physicien, en imaginant son thermomètre, s'était proposé de remplir trois conditions : l'une, que la graduation partit d'un terme constant où il plaçait le zéro du thermomètre ; la seconde, que les degrés eussent un rapport déterminé avec la capacité, tant de la boule, que de la partie du tube située entre cette boule et le point de zéro ; la troisième, que l'alcool qu'il employait eût un degré connu de dilatabilité auquel on pût toujours l'amener. Il avait à choisir entre deux termes constans, qui dès lors avaient été remarqués, savoir, la chaleur de l'eau bouillante, et le froid produit par la congélation de l'eau. Il se décida en faveur du dernier comme étant celui qui semblait donner la limite naturelle entre le chaud et le froid, et il choisit, pour le déterminer l'instant de la congélation artificielle de l'eau, à l'aide d'un mélange de glace et de sel marin. On a substitué depuis à ce terme celui de la glace fondante, qui est pour le moins aussi fixe.

Réaumur se servait d'eau commune pour graduer son thermomètre. Il remplissait d'abord de cette eau la boule et une partie du tube, et l'arrangeait de manière, que la quantité d'eau employée fût nulle fois aussi grande que celle qui pouvait être contenue

dans une très petite mesure prise pour unité. Ayant marqué zéro à l'endroit où l'eau s'était arrêtée, il se disposait à tracer les degrés en commençant par ceux de condensation. Dans cette vue, il faisait d'abord sortir du tube une telle quantité d'eau, qu'elle pût remplir exactement une mesure qui contenait un certain nombre de fois l'unité. Supposons que cette mesure fût de 25 unités ; il devait y avoir, dans ce cas, 25 degrés de condensation sur le thermomètre. Il se servait de la mesure élémentaire pour obtenir ces degrés, en sorte que chaque élévation de l'eau, dans l'intérieur du tube, produite par le versement d'une mesure élémentaire, déterminait la grandeur d'un degré. Dans cette seconde opération, Réaumur substituait le mercure à l'eau, parce qu'il ne s'attache point au verre, et qu'il en résulte une plus grande précision. Le mercure, en tombant au fond de la boule, faisait monter d'autant le liquide contenu dans le tube. A l'aide du même procédé, Réaumur poussait la graduation jusqu'à 80<sup>d</sup> au-dessus de zéro. Il préférerait de graduer ainsi le tube, en y faisant entrer successivement des quantités égales de liquide, plutôt que de continuer la division, d'après la grandeur connue d'un seul degré, pour n'avoir rien à craindre des inégalités intérieures du tube et des variations de son diamètre.

La graduation une fois établie, Réaumur vidait le tube, et y versait de l'alcool jusqu'à la hauteur de 4 ou 5 degrés au-dessus de zéro, puis il plongeait la boule dans l'eau que contenait un vase de fer blanc qu'il entourait de glace artificielle. Au moment où l'eau entrait en congélation, Réaumur observait le point où s'arrêtait l'alcool, et suivant que ce liquide se trouvait un peu au-dessus ou au-dessous de zéro, il en faisait sortir ou en ajoutait, jusqu'à ce que sa hauteur dans le tube coïncidât exactement avec le point de zéro.

On voit par ces détails, que pour un degré de chaleur, l'alcool se dilatait d'une quantité égale à la millième partie de celle qui, au moment de la congélation, remplissait la boule et la partie du tube comprise entre cette boule et le point de zéro.

L'opération se serait bornée aux procédés que nous venons de décrire, si tous les alcools avaient la même qualité et la même

dilatabilité. Mais comme on ne devait pas s'attendre à ces avantages, il avait fallu fixer la quantité de dilatation dont l'alcool, employé dans la construction du thermomètre, devait être susceptible. Voici comment Réaumur avait été conduit à cette détermination. Ayant plongé à plusieurs reprises un tube rempli d'alcool jusqu'à une certaine hauteur dans de l'eau qui s'échauffait toujours de plus en plus, et finissait par bouillir, il avait remarqué que quand les bouillonnemens que la chaleur avait excités dans l'alcool lui-même s'étaient apaisés, après que le tube avait été retiré de l'eau, l'alcool se trouvait toujours plus haut qu'avant l'immersion; mais cette dilatation n'avait lieu que jusqu'à un certain terme, passé lequel, aussitôt que l'ébullition avait cessé, la liqueur reprenait son niveau. Il avait regardé comme un terme fixe pour chaque espèce d'alcool, cette dilatation, qui était la plus grande que le liquide pût éprouver par la chaleur de l'eau bouillante, lorsque lui-même ne bouillait pas; il résultait de là qu'il y avait, relativement à un alcool donné, un rapport constant entre le volume du liquide, qui répondait au terme de la congélation, et celui du même liquide, dilaté le plus qu'il était possible, sans bouillir. Ce rapport était plus grand pour l'alcool rectifié, et diminuait lorsqu'on avait affaibli l'alcool par un mélange d'eau. Or Réaumur s'en était tenu au rapport de 1000 à 1080, qui ne pouvait convenir qu'à un alcool un peu étendu d'eau, et il fallait chercher par tâtonnement le degré de mélange qui donnait ce rapport.

On voit par là que Réaumur n'avait employé que secondai-  
 rement la chaleur de l'eau bouillante, et que le degré 80 sur  
 son thermomètre était nécessairement situé plus bas que sur le  
 thermomètre ordinaire, puisqu'il faut une chaleur moindre que  
 celle de l'eau bouillante pour amener l'alcool au degré où il est  
 sur le point de bouillir.

La construction dont nous venons de parler fut généralement  
 accueillie. On ne parla presque plus que du thermomètre de  
 Réaumur; et il se forma une liaison si intime entre le nom de  
 l'inventeur et celui de l'instrument, qu'aujourd'hui même en-  
 core, les thermomètres dont nous nous servons sont appelés

*Thermomètres de Réaumur, quoiqu'ils ne soient pas faits d'après sa méthode.*

*Thermomètre moderne, usité en France.*

268. La marche de ce nouvel instrument se rapporte à deux termes fixes, dont l'un, qui sert de point de départ, ne diffère de celui qu'employait Réaumur, que par la circonstance dans laquelle se trouve l'eau dont la température détermine ce même terme, et qui est à l'état de glace fondante, et non à l'état de congélation commencée; l'autre qui donne la limite opposée, est la chaleur de l'eau bouillante. On choisit le tube le mieux calibré qu'il est possible, et on divise d'abord en 80<sup>d</sup> la distance comprise entre les deux termes fixes, puis on continue la même division au-dessous de zéro. Dans le thermomètre que l'on appelle *centigrade*, la distance dont nous venons de parler est divisée en cent parties.

Cette méthode réunit au mérite d'une plus grande exactitude, celui de la simplicité, en ce qu'elle ramène uniquement la construction du thermomètre à la cause même des variations de cet instrument, et aux deux époques où l'eau, prenant tout à coup une nouvelle forme, avertit le physicien de l'existence du point fixe qu'il cherche à saisir. Nous devons observer, à ce sujet, que la pression de l'air n'influe pas sensiblement sur la première limite, qui est le degré de la glace fondante, au lieu qu'il est nécessaire d'avoir égard à cette pression pour déterminer la limite opposée, parce qu'à proportion que l'eau est plus ou moins comprimée, elle entre en ébullition par une température plus haute ou plus basse. On a choisi la pression qui répond à une hauteur de 28 pouces dans le baromètre, parce que c'est la pression moyenne, ou celle qui a lieu communément aux bords de la mer.

Il est aisé de voir maintenant que les deux limites étant les mêmes dans différens thermomètres construits d'après ces principes, et les degrés de l'échelle, dans tous ces thermomètres, étant des parties proportionnelles à la distance entre les deux limites, les indications données par les mouvemens de la liqueur

se rapporteront entre elles , quelle que soit d'ailleurs la distance dont il s'agit. La graduation deviendra ainsi comme une langue de commerce entre tous les thermomètres ; en sorte que si deux de ces instrumens placés , l'un à Paris , l'autre à Amsterdam , indiquent le même degré , on sera sûr que la température est la même dans les deux endroits , et que s'ils marquent différens degrés , chacun d'eux parlera précisément comme aurait fait l'autre dans la même position.

*Mercure préférable à l'Alkohol, pour la construction du Thermomètre.*

269. On s'est servi pendant long-temps d'alcohol, ainsi que l'avait fait Réaumur, pour avoir une colonne de liquide, dont les élévations ou les abaissemens indiquassent les diversités de la température. Nous avons décrit (267) le procédé à l'aide duquel le même physicien s'était efforcé de remédier à l'inconvénient qu'a cette substance de varier, dans sa pureté et dans sa densité, suivant les différens procédés que l'on emploie pour l'obtenir. Mais on ne pouvait pas assez compter sur l'exactitude de ce procédé, d'ailleurs incommode par les tâtonnemens qu'il exigeait. Ainsi les thermomètres, à cet égard, laissaient de l'incertitude sur l'accord qui devait régner entre eux. Mais l'alcohol a un autre inconvénient, qui avait échappé aux observateurs; il consiste en ce que la marche du thermomètre construit avec ce liquide n'est pas conforme à celle de la température, en sorte que les dilatations progressives de ce même liquide marquent des degrés sensiblement inégaux, pendant des variations égales de température; et ici revient la première des conditions dont nous avons parlé (266), et sans laquelle chaque thermomètre cesse d'être comparable avec lui-même. Il nous reste à faire voir que le mercure remplace avantageusement l'alcohol sous tous les rapports.

Il est d'abord facile de concevoir que ce métal liquide, lorsqu'il a été purifié, est partout homogène et d'une densité uniforme. On a de plus reconnu que sa marche, dans le thermomètre, offrait des différences sensibles avec celle de l'alcohol, et le célèbre Deluc

a fait des expériences qui lui ont paru prouver que ces différences provenaient de ce que l'alcool subissait des anomalies dont le mercure était à peu près exempt. Dans ces expériences, il mêlait ensemble deux masses égales d'eau, ayant des températures différentes, l'une par exemple de 75<sup>d</sup> du thermomètre en 80 parties, l'autre de 6<sup>d</sup> qui était en même temps celle de l'air environnant. La température que devait prendre le mélange était, suivant le même physicien, la moyenne entre les températures des deux masses séparées, c'est-à-dire, qu'elle était égale à la demi-somme 40<sup>d</sup>  $\frac{1}{2}$  des températures extrêmes. Or Deluc ayant plongé dans le mélange un thermomètre à mercure qui avait servi à déterminer les températures particulières des deux masses d'eau, remarqua que l'instrument indiquait une température qui ne différait de la moyenne qu'en ce qu'elle était un peu au-dessous.

270. Mais l'expérience que l'on prenait ici pour juge du thermomètre à mercure, péchait par le défaut de précision. Pour le concevoir, remarquons que l'eau chaude, dans ce cas, n'arrive à l'équilibre de température avec l'eau froide, qu'en cédant à celle-ci la moitié du calorique qui détermine la différence de 69<sup>d</sup> entre les deux températures. Or nous sommes fondés à croire que la partie de cette même moitié qui sert à dilater l'eau froide, est plus grande que celle qui, par sa retraite, a occasionné la contraction de l'eau chaude (1). Il faut donc que réciproquement la partie dont le dégagement donne lieu au refroidissement de l'eau chaude soit plus grande que celle qui est employée à échauffer l'eau froide, puisque la somme des deux parties est égale à la quantité de calorique qui a passé de l'eau chaude dans la froide. Donc la tem-

---

(1) La portion de calorique dont le dégagement détermine l'eau chaude à se contracter, est égale à celle qui, en partant du dernier terme de la contraction, remettrait cette eau dans son premier état de dilatation. Or l'affinité des molécules de cette même eau opposerait moins de résistance à la force dilatante de la portion de calorique dont il s'agit, que l'affinité des molécules de l'eau froide n'en oppose à la force du calorique qui sert à la dilater, parce qu'à une plus basse température les molécules aqueuses sont moins écartées les unes des autres. Donc la portion de calorique dont la perte occasionne la contraction de l'eau chaude doit être moindre que celle qui agit pour dilater l'eau froide.

pérature de la première baisse davantage que celle de la seconde ne s'élève, d'où il suit que la température du mélange doit être au-dessous de la moyenne.

271. Le célèbre Laplace a trouvé dans le thermomètre à air le véritable terme de comparaison qui devait servir à vérifier la marche du mercure (1). Supposons qu'une masse d'air reçoive successivement de nouvelles quantités de calorique, et qu'en même temps on la tienne resserrée dans l'espace qu'elle occupait. Il est extrêmement probable que les accroissemens de sa force élastique seront proportionnels aux élévations de sa température, puisque l'une et l'autre dépendent de l'action du calorique. Or si l'air, au lieu d'être coércé dans le même espace, a la liberté de s'étendre, en restant soumis à une pression constante, ses dilatations seront proportionnelles aux accroissemens que recevrait sa force élastique, dans l'hypothèse de l'uniformité de volume; d'où il suit qu'elles seront aussi en rapport avec les élévations de la température, ce qui est le caractère d'un thermomètre toujours d'accord avec lui-même.

Voici maintenant de quelle manière M. Gay-Lussac, sur l'invitation de M. Laplace, a comparé la marche du thermomètre à mercure, avec celle du thermomètre à air. Ayant choisi un tube de verre exactement calibré, terminé en boule d'un côté et ouvert de l'autre, il a introduit dans son intérieur une goutte de mercure, qui s'est trouvée ainsi soumise d'une part à la pression de l'air renfermé dans la partie du tube située au-dessous d'elle et dans la boule, et d'une autre part à la pression de l'atmosphère. A mesure que l'air intérieur variait dans sa température, les mouvemens de la goutte de mercure faisaient connaître la quantité dont il s'était dilaté ou contracté.

L'appareil destiné aux expériences était un vase rempli d'eau dans laquelle le tube se trouvait plongé horizontalement, de manière que sa partie située vers l'orifice ouvert était saillante hors du vase, au moyen d'un trou circulaire pratiqué à la paroi latérale. On a d'abord déterminé, relativement à l'air renfermé dans

---

(1) Traité de Mécanique céleste, t. IV, préface, p. 21.

le tube, le terme de la glace fondante et celui de l'eau bouillante, et l'on a fait la même opération sur un thermomètre à mercure. On a divisé ensuite, dans chaque thermomètre, en deux parties égales, l'intervalle entre les deux limites, ce qui a donné de part et d'autre le degré 50 de la division en 100 parties.

Or les deux thermomètres plongés dans le même bain d'eau que l'on avait fait chauffer progressivement, indiquèrent à la fois ce degré, avec de légères différences, qui, dans vingt expériences successives, se trouvèrent tantôt en plus et tantôt en moins, et donnèrent une quantité presque nulle pour résultat moyen. On doit en conclure que la marche des deux thermomètres est la même, au moins depuis zéro jusqu'au terme de l'eau bouillante, et ainsi le thermomètre à air, dont l'exactitude est comme garantie par la nature même de ce fluide, mais dont l'exécution serait d'ailleurs difficile, sert à son tour de garant au thermomètre à mercure; et il est heureux que ce métal déjà si remarquable par l'action du calorique, pour le tenir dans un état de liquidité habituelle, le soit doublement, par la régularité avec laquelle cette action s'exerce pour le dilater.

272. D'après tout ce que nous venons de dire, il est à désirer que l'usage des thermomètres à mercure devienne général; on n'emploierait le thermomètre à alkohol que dans le cas où l'on voudrait faire des observations par un froid artificiel plus grand que celui de 32<sup>d</sup>, qui détermine la congélation du mercure. À l'égard de ce dernier effet, nous nous réservons à l'exposer, lorsque nous parlerons de la congélation de l'eau, qui est accompagnée de circonstances, dont le contraste avec celles que présente le mercure dans le même cas, nous ont engagés à réunir les deux phénomènes sous un même point de vue.

*Remarque sur l'Air qui pourrait rester dans le tube de l'instrument.*

273. Quelques physiiciens ont pensé que quand on laissait de l'air entre la liqueur du thermomètre et le haut du tube, les dilatations de ce fluide, par l'action de la chaleur, opposaient à

celles du mercure ou de l'alcool, un obstacle qui altérerait la régularité de ces dernières. Cependant l'observation fait voir que cet obstacle est nul, et la théorie seule indique qu'il doit l'être; car l'air ne pourrait agir, dans ce cas, sur les liquides, que comme force comprimante. Or on sait que les liquides résistent sensiblement à la compression, et cette résistance a lieu également à toutes les températures; et parce que les fluides, au contraire, se laissent comprimer avec beaucoup de facilité, ce sera le mercure ou l'alcool qui forcera l'air de se contracter et de lui céder la place.

### *Dilatation absolue du Mercure.*

174. La connaissance de la dilatation absolue du mercure est utile dans un grand nombre d'expériences, et principalement pour la construction de la formule barométrique. La dilatation apparente indiquée par le thermomètre n'est que la différence d'expansion du liquide et du verre qui le contient, et pour en déduire la dilatation véritable, il faudrait connaître la loi suivant laquelle se dilate la matière même de l'enveloppe. Or la mesure de l'expansion des solides est sujette à tant de difficultés, que la plupart des déterminations qui ont été fondées sur elle sont tout-à-fait inexactes. C'est ce qu'ont reconnu MM. Dulong et Petit, en suivant une autre méthode, indépendante de la mesure dont il s'agit. Elle repose uniquement sur la condition d'équilibre des fluides de densités différentes dans les branches d'un syphon renversé.

Ils ont trouvé que la dilatation absolue du mercure entre  $0^{\circ}$  et  $100^{\circ}$  est de  $\frac{1}{5556}$  pour chaque degré centésimal, tandis que la dilatation apparente n'est que de  $\frac{1}{8485}$  (1).

### *Thermomètres de Fahrenheit et de Delisle.*

275. On trouve fréquemment dans les ouvrages des physiciens étrangers, des résultats d'observations relatives à deux autres thermomètres, dont il ne sera pas inutile de donner ici une notion,

---

(1) Annales de Chimie et de Physique, t. xvii, p. 124.

pour mettre chacun à portée de traduire leur langage en celui du thermomètre en usage parmi nous.

Le premier est le thermomètre de Fahrenheit, qui est à mercure, et qui a pour termes fixes le degré de la congélation forcée par l'hydrochlorate ammoniacal, et celui qui répond à la chaleur de l'eau bouillante. L'intervalle entre ces deux termes est divisée en 212 parties; il en résulte que le 32<sup>e</sup> degré coïncide avec le zéro de notre thermomètre, ce qui donne 180<sup>d</sup> depuis ce même terme jusqu'à celui de l'eau bouillante. Ainsi, 9 degrés de Fahrenheit valent 4 degrés du thermomètre divisé en 80 parties, et 5 degrés du thermomètre centigrade; ce qui suffit pour faire le rapprochement entre les résultats donnés par les deux instrumens.

276. L'autre thermomètre est celui de Delisle, dans lequel ce physicien employait aussi le mercure; il n'avait qu'un seul terme fixe, savoir: celui de la chaleur de l'eau bouillante, où était placé le zéro. Les degrés de condensation au-dessous de ce terme étaient des dix-millièmes de la capacité de la boule et de la partie du tube qui se terminait au zéro, le degré auquel se rapportait la température de la glace fondante et qui correspond à notre zéro était le 150° de l'échelle descendante sur le thermomètre de Delisle; d'où il suit que 15<sup>d</sup> de ce thermomètre répondent à 8<sup>d</sup> du thermomètre divisé en 80 parties, et à 10<sup>d</sup> du thermomètre centigrade; en sorte qu'à l'égard de ce dernier, le rapport réduit à sa plus grande simplicité est celui de 3 à 2.

Les recherches multipliées entreprises par les physiciens, dans la vue de perfectionner le thermomètre, suffiraient seules pour prouver le mérite de cet instrument. Il a servi à nous dévoiler une multitude de faits intéressans. Sa présence est indispensable dans une infinité d'expériences, pour comparer les températures des corps que l'on emploie, ou déterminer les changemens qui surviennent dans celle qu'ils avaient primitivement. Il est souvent utile d'avoir recours à ses indications pour connaître la chaleur qui convient à la chambre d'un malade, à l'eau d'un bain, à une étuve, à une serre chaude, soit qu'on veuille hâter la végétation des plantes indigènes, ou conserver les plantes étrangères. C'est, pour ainsi dire, un instrument de

société, que chacun se plaît à interroger sur un point aussi important que les variations qu'éprouve la température du fluide au milieu duquel nous vivons ; et lorsque ces variations s'étendent beaucoup au-delà des limites ordinaires, l'indication du thermomètre devient d'un intérêt général : le récit que chacun fait de ce qu'il a observé sur le sien, est un des sujets qui s'emparent le plus promptement des conversations familières.

### *Thermomètre de MM. Bréguet.*

277. La construction de l'échelle qui sur nos thermomètres indique les degrés successifs de la température, n'est autre chose qu'un moyen assorti à nos usages, de sous-diviser une série qui varie d'un terme à l'autre par des nuances imperceptibles. Les efforts des physiciens modernes, pour mettre dans leurs expériences la plus grande précision possible, ont donné naissance à des instrumens particuliers, susceptibles de conduire à des mesures beaucoup plus approchées que celles qu'on avait obtenues, en se servant des instrumens ordinaires. Le thermomètre que nous allons décrire, et dont l'invention est due à MM. Bréguet, mérite d'occuper parmi les premiers un rang distingué, soit par sa grande sensibilité, soit par le mécanisme ingénieux d'où dépendent ses effets.

278. Ce thermomètre est destiné principalement à rendre sensibles les légers changemens que subit la température d'un instant à l'autre dans un même lieu. La pièce principale de cet instrument est une spirale (fig. 24) composée de trois lames très-minces de métaux différemment dilatables, savoir : l'argent, l'or et le platine. (1). Ces trois lames sont soudées ensemble par pression, et réduites, par le laminage, à une épaisseur qui n'excède pas  $\frac{1}{30}$  de millimètre. La spirale est suspendue à un cylindre creux de laiton *ab*, évasé par le haut, et dans lequel s'insère

---

(1) Ces métaux sont placés ici dans l'ordre de leurs dilatabilités, à partir de la plus grande.

une tige terminée supérieurement par un petit disque  $m$ , à l'aide duquel on peut à volonté retirer cette tige et la remettre en place. Cette même tige traverse de haut en bas la spirale, sans la toucher, et elle s'introduit par sa partie inférieure dans un support  $cd$ , qui sert à lui conserver une position fixe. A l'extrémité de la spirale est suspendue une aiguille formée de deux parties séparées, dont l'une  $ef$  terminée en pointe est attachée en  $e$  à la circonférence de la dernière spire, et dont l'autre  $gh$ , façonnée en flèche, aboutit au point opposé  $g$  de la même circonférence. Cette disposition permet à l'aiguille de prendre une direction qui coupe perpendiculairement celle de la tige, et passe constamment par l'axe même de la spirale. Celui-ci correspond verticalement au centre d'un cercle, soutenu par trois petits pieds fixés sur une pièce de bois arrondie en cylindre, qui sert de base à l'instrument; on a pratiqué dans ce cylindre une rainure circulaire, dans laquelle on fait entrer les bords inférieurs d'une cloche de verre, dont on recouvre l'appareil lorsqu'on a cessé d'en faire usage, et qui le garantit de la poussière.

279. La construction de ce thermomètre est fondée sur le résultat d'expérience que je vais rapporter. Si deux lames minces de métaux inégalement dilatables sont juxtaposées et fortement soudées ensemble, si de plus elles ont la même longueur, et qu'elles soient fixement assujetties par leurs extrémités, lorsque la température vient à changer, l'une des lames s'allongeant plus que l'autre, force le système à prendre un certain degré de courbure qui sera d'autant plus grand, que le changement de température sera lui-même plus considérable. L'appareil se courbe dans un sens ou dans l'autre, suivant que la température s'élève ou s'abaisse, de manière que le métal le plus dilatable est tantôt en dehors, et tantôt en dedans de la courbure.

280. En partant de ce fait, si l'on courbe, comme l'ont fait MM. Bréguet, une pareille lame en spirale, en assujettissant l'une de ses extrémités à un corps solide, et en fixant à l'extrémité inférieure une aiguille qui parcourt les divisions d'un cercle gradué, le plus léger changement de température faisant varier aussitôt la courbure et le diamètre des spires qui sont très mul-

tipliées, deviendra sensible par le mouvement de l'index dans un sens ou dans l'autre, et cet effet aura lieu avec une extrême promptitude, à raison du peu de masse que la chaleur doit pénétrer, le thermomètre étant presque tout en surface (1).

281. On voit qu'à la rigueur, il suffirait d'employer à sa construction deux métaux inégalement dilatables; mais si ces métaux n'étaient pas assez fortement soudés ensemble, ou que la différence de leurs dilatabilités fût trop forte, la spirale éprouverait des déchiremens par des changemens brusques de température. MM. Bréguet ont remédié à cet inconvénient en interposant entre les deux métaux, le platine et l'argent, un troisième métal d'une dilatabilité moyenne, qui est l'or.

282. L'expérience prouve que, par des changemens égaux de température, l'aiguille parcourt des nombres égaux de degrés sur le cercle gradué. D'après ce résultat, il est facile à chaque observateur de se construire une échelle en prenant des points fixes à la manière ordinaire, ou en comparant la marche de l'instrument à celle d'un thermomètre à mercure.

Voici quelques faits d'après lesquels on pourra juger de l'extrême sensibilité de cet instrument.

283. Ayant retiré la tige qui traverse la spirale, si on la roule un instant avec frottement entre les deux mains, et qu'ensuite on la replace, on voit aussitôt l'aiguille se mouvoir très sensiblement, et ce déplacement va quelquefois jusqu'à 15<sup>d</sup>.

284. MM. Bréguet placèrent sous le récipient d'une machine pneumatique dont la capacité était de 5 litres, un thermomètre à mercure qui marquait 19° centigrades, avec leur thermomètre. On fit le vide le plus promptement possible : le thermomètre à mercure ne descendit que de 2° centigrades; le thermomètre métallique passa de 19° centigrades à — 4°. On rendit l'air : le

(1) On peut disposer à volonté les trois lames, de manière que ce soit celle d'argent ou celle de platine qui se trouve en dessus. Si c'est la première, l'aiguille marchera, par une élévation de température, dans le sens suivant lequel les spires sont tournées. Elle marcherait en sens contraire, si le platine était en dessus.

thermomètre métallique s'éleva jusqu'à 50<sup>d</sup> centigrades, tandis que l'autre était encore un peu au-dessous de zéro.

## 11. Des Vapeurs, et de leur mélange avec les Gaz.

285. Il serait difficile de citer un phénomène plus général et plus étendu, que celui de la diminution de volume que subissent les liquides exposés à l'air. Toutes les eaux stagnantes, toutes celles que leur cours transporte d'un lieu à l'autre, laissent continuellement échapper des molécules qui s'élèvent de tous les points de leur surface, et dont l'atmosphère devient comme le réservoir. Ce phénomène que l'on a nommé *évaporation*, se répète même, à chaque instant, sous nos yeux, au milieu des soins qu'entraînent les besoins ou les commodités de la vie; et il n'est personne qui n'ait remarqué qu'on l'accélère par l'action de la chaleur, ou en multipliant les points de contact du liquide avec l'air, et que pour l'arrêter, et fixer en quelque sorte le volume du liquide, il ne faut que fermer exactement le vase qui contient ce dernier.

Le développement de ce sujet qui, dans le progrès des découvertes modernes, embrasse les mélanges de toutes les vapeurs avec tous les gaz, nous paraît d'autant mieux placé ici, comme branche de la théorie du calorique, que l'action de ce fluide suffit seule à l'hypothèse qui explique les phénomènes de la manière la plus vraisemblable. Mais avant de nous occuper de cette explication, il est nécessaire d'exposer les résultats des observations et des expériences faites par les physiciens qui ont le mieux étudié la marche et les circonstances de l'évaporation.

### *Résultat constant qu'offre la formation des Vapeurs.*

286. Nous avons déjà eu occasion d'ébaucher le tableau de ce qui se passe dans ce cas, en prenant l'eau pour exemple. Nous avons

vu qu'à toutes les températures il se forme une certaine quantité de vapeur aqueuse, dont les molécules écartées les unes des autres par la force élastique du calorique, et se trouvant dans le même cas que si elles se repoussaient mutuellement, s'élèvent dans l'air, à la faveur des nombreux interstices que les molécules de ce dernier fluide laissent entre elles. Nous avons dit que l'action du calorique pour produire l'évaporation est plus ou moins balancée par la résistance de l'air, jusqu'à une certaine limite, passé laquelle cette résistance étant entièrement vaincue, le liquide entre en pleine ébullition, et la température qui jusqu'alors s'était élevée, à mesure que le liquide s'échauffait, se fixe à 80<sup>d</sup> de Réaumur ou à 100<sup>d</sup> du thermomètre centigrade, sous la pression moyenne de l'atmosphère (207 et 208).

287. Or la vapeur qui se forme paisiblement à toutes les températures inférieures, ne diffère point en elle-même de celle que produit l'eau bouillante à l'air libre; elle n'est pas non plus distinguée de celle qui se développe pendant l'ébullition qui a lieu dans le vide, à une température quelconque.

288. Mais ici se présente un nouveau point fixe, d'autant plus remarquable; qu'il doit compter pour beaucoup parmi les données que l'observation fournit à la théorie. Il consiste en ce que la quantité de vapeur qui se forme dans un espace et à un degré de température déterminés, est constamment la même, soit que cet espace se trouve occupé par un air plus ou moins dense, ou par un gaz quelconque, soit qu'on y ait fait le vide. Ainsi, d'après les expériences de Saussure, la vapeur qui se développe dans un pied cube d'air, à la température de 15<sup>d</sup> de Réaumur, forme un poids d'environ 10 grains. Que l'on change la densité de cet air, qu'on le remplace par un autre gaz, qu'on le supprime même sans lui rien substituer, il y aura toujours dix grains d'eau employés à fournir la quantité de vapeur, qui se répandra dans le même espace, en supposant que la température soit encore de 15<sup>d</sup> de Réaumur.

289. Pour parvenir au résultat que nous venons d'exposer, Saussure se servait d'un ballon de verre, dont il avait mesuré exactement la capacité; il y laissait entrer de l'air qu'il desséchait

le plus qu'il était possible, puis il introduisait dans cet air un linge imbibé d'une quantité d'eau dont il avait évalué le poids. Un hygromètre (1) était placé dans le même ballon, et le moment où il avait atteint le *maximum* d'humidité, faisait connaître que l'eau dont le linge était imbibé avait fourni toute la quantité de vapeur que l'air du ballon pouvait contenir, à la température indiquée par un thermomètre, qui avait aussi sa place dans l'intérieur du ballon; après quoi il ne restait plus qu'à évaluer la perte que l'eau avait éprouvée, et à la diviser par le nombre de pieds cubes, qui représentait la capacité du ballon (2).

Un troisième instrument, savoir, un manomètre (3), que contenait encore le ballon, servait en même temps à constater un autre fait non moins intéressant, c'est que la présence de la vapeur augmente l'élasticité de l'air. Dans l'expérience dont nous avons cité le résultat, l'air desséché faisait équilibre, par son ressort, à la pression d'une colonne de mercure d'environ 27 pouces; et, après la formation de la vapeur, la hauteur de la colonne était de 27 pouces 6 lignes. Saussure conclut de cette ob-

(1) Cet instrument, dont nous donnerons dans la suite la description, est destiné à indiquer les différens degrés d'humidité de l'air, d'après l'allongement que subit un cheveu, en sorte que quand cet allongement est le plus grand possible, on juge que l'air est parvenu à son point de saturation, relativement à l'eau.

(2) Essais sur l'Hygrométrie, numéros 97 et suiv.

(3) Ce mot est une espèce de surnom donné au baromètre, et relatif à un usage particulier de cet instrument. Nous dirons ici, par anticipation, que le baromètre est composé principalement d'un tube de verre d'environ 80 centimètres ou 30 pouces de hauteur, fermé par le haut, et dans lequel s'élève une colonne de mercure, qui y est soutenue par la pression que l'atmosphère exerce sur elle en vertu de son poids. A mesure que ce poids augmente ou diminue, la colonne s'allonge ou se raccourcit: de là le nom de *baromètre*, qui signifie *mesure du poids*. Maintenant si l'on suppose le baromètre renfermé dans un espace où l'air soit coërcé, ce fluide n'agira plus que par son ressort sur la colonne de mercure, qui s'allongera ou se raccourcira, suivant que la force élastique de l'air augmentera ou diminuera. Dans ce cas, l'instrument prend le nom de *manomètre*, qui signifie *mesure de la rareté*, parceque le ressort de l'air varie, suivant que ce fluide est plus ou moins rare.

servation, que la vapeur répandue dans l'air soumis à l'expérience, était un fluide élastique capable seul de faire équilibre à une pression mesurée par l'accroissement d'élasticité qu'il communiquait à l'air, ou, ce qui revient au même, mesurée par six lignes de mercure, en sorte que dans le vide, l'élasticité de la vapeur aurait fait monter réellement le manomètre de cette quantité.

D'autres expériences ont prouvé que le poids de l'eau employée à fournir la vapeur est constamment le même, à égalité d'espace, par un même degré du thermomètre, quelle que soit la densité de l'air dans lequel la vapeur est répandue. La température détermine seule la quantité de cette vapeur; elle l'augmente en s'élevant, et la diminue en s'abaissant.

290. Ceci exige quelques éclaircissements, pour bien concevoir cette relation entre les degrés de la température et les quantités correspondantes de vapeur qu'admet un espace donné. Imaginons que cet espace étant d'abord rempli d'air sec, se trouve situé au-dessus d'une masse d'eau, à une température quelconque, qui soit la même par rapport à l'air : au moment où les molécules de l'eau se détachent de la surface de ce liquide, pour se convertir en vapeurs, leurs distances respectives n'excèdent pas encore le rayon de leur sphère d'activité sensible, et il paraît que, même après la formation de toute la vapeur que comporte l'espace dont il s'agit, la quantité dont elles s'écartent les unes des autres est un peu moindre que le même rayon. Pendant que la vapeur se forme, le calorique situé sous la surface de l'eau agit par son élasticité pour soulever la couche extérieure de ce liquide; or, l'effet de cette élasticité est diminué par l'affinité de la même couche pour l'eau située au-dessous d'elle. D'une autre part, le calorique interposé entre les molécules de la vapeur déjà formée agit sur elles par sa force élastique, et l'effet de cette force peut être considéré comme une pression que la vapeur exerce sur l'eau encore liquide. Or cette même force est aussi diminuée par l'affinité de la vapeur pour elle-même. Désignons par  $C$  la force élastique du calorique renfermé dans l'eau, par  $F$  l'affinité réciproque des molécules de ce liquide, par  $c$  la force élastique du

calorique interposé dans la vapeur, et par  $f$  l'affinité réciproque des molécules de cette vapeur. Nous pouvons représenter par  $C$  moins  $F$  la force du calorique renfermé dans l'eau pour produire de nouvelle vapeur, et par  $c$  moins  $f$  la pression que la vapeur déjà produite exerce sur l'eau encore liquide, et il est évident que la formation de la vapeur s'arrêtera au terme où il y aura équilibre entre  $C$  moins  $F$  et  $c$  moins  $f$ .

Les choses étant dans cet état, supposons que la température de tout le système s'élève d'un certain nombre de degrés, et qu'en même temps l'espace qui renferme la vapeur diminue. L'élasticité du calorique interposé entre les molécules de la vapeur se trouvant augmentée par l'élevation de température, permettra à ces molécules de se rapprocher sans se réduire en eau, quoique alors elles s'attirent davantage les unes des autres. Par une suite nécessaire, la pression de la vapeur sur l'eau encore liquide s'accroîtra, tandis que d'une autre part le calorique enfermé dans cette eau agira avec plus d'énergie pour en soulever la couche extérieure. On peut donc concevoir que telle soit la diminution d'espace, qu'il s'établisse un nouvel équilibre entre les actions auxquelles l'eau liquide et la vapeur sont soumises, c'est-à-dire entre  $C$  moins  $F$  et  $c$  moins  $f$ . Maintenant si l'on suppose l'espace constant, il est visible que pendant l'élevation de température, il se formera de nouvelle vapeur, dont les molécules s'intercaleront entre celles de la première, jusqu'à ce que la densité soit la même que dans l'hypothèse de la diminution d'espace, c'est-à-dire que la température, en s'élevant, détermine une augmentation dans la quantité de vapeur que comporte un espace donné.

Les parois du vase qui contient la vapeur, opposent à la force élastique de celle-ci une réaction égale à la force du calorique renfermé dans l'eau, moins à l'affinité de l'eau pour elle-même : d'où il suit que si l'on suppose que, l'équilibre étant établi, le vase se ferme de tous les côtés, l'équilibre subsistera encore. Dans ce cas, la continuation du vase, à l'endroit qui était occupé par l'eau, est censée remplacer la dernière couche de ce liquide.

291. Les choses auront lieu de la même manière, si l'on sup-

pose que l'espace que nous considérons ici soit purgé d'air, excepté que la formation de la vapeur étant plus rapide, l'équilibre s'établira plus tôt. La résistance de l'air n'est qu'un obstacle en quelque sorte mécanique, qui, étant censé nul à tous les endroits où ce fluide laisse des interstices libres, permet aux molécules de vapeur de s'élever, comme elles feraient dans le vide, en sorte qu'elles s'y placent aux mêmes distances respectives, et exercent la même pression sur l'eau encore liquide, que si l'air n'existait pas. Ceci s'éclaircira encore par les détails que nous donnerons dans la suite.

292. Faisons maintenant varier l'espace en laissant subsister la température, et imaginons pour plus grande simplicité, que cet espace soit encore purgé d'air, et qu'il n'y ait que la vapeur qui l'occupe. Si l'on suppose qu'il se trouve diminué, par exemple, de moitié, alors la moitié des molécules de la vapeur subiront un rapprochement, qui donnera lieu au dégagement d'une partie du calorique interposé entre elles, en sorte qu'elles se réduiront en eau. Ce n'est pas que la diminution d'espace ne produise dans toutes les molécules une tendance à se rapprocher. Mais si cette tendance avait son effet, le résidu de l'espace demeurerait vide, et aussitôt il s'y formerait une nouvelle quantité de vapeur égale à la moitié de celle qui occupait primitivement la totalité de l'espace. Cette quantité de vapeur se conservera donc, par une suite de ce qu'elle ne pourrait être détruite sans renaître à l'instant.

Au lieu de diminuer l'espace, augmentons-le, par exemple, du double. L'eau que nous supposons placée au-dessous, en restant toujours à la même température, recommencera à fournir de la vapeur; de manière que la quantité primitive se trouvera aussi doublée, en conservant la même densité qu'auparavant. Mais si la vapeur est coercée de tous les côtés en même temps que l'espace augmente, ses molécules s'écarteront les unes des autres pour continuer de le remplir, et il y aura un terme où elles parviendront à des distances mutuelles plus grandes que le rayon de leur sphère d'affinité sensible. Si l'espace revient à ses dimensions primitives, les molécules de la vapeur se rappro-

cheront, en reprenant leurs premières distances respectives, sans qu'aucune partie se réduise en eau. Pour que ce dernier effet eût lieu, il faudrait que l'espace diminuât dans un plus grand rapport que celui de son augmentation précédente.

293. Ainsi l'on doit concevoir que l'écartement entre les molécules de la vapeur répandue dans un espace donné, est moindre que le rayon de leur sphère d'affinité sensible, toutes les fois que la quantité de cette vapeur est égale à celle qui peut se former librement dans le même espace. Ce terme peut être regardé comme celui de la saturation de l'espace dont il s'agit, ou de l'air qui s'y trouve renfermé, pour le degré auquel s'élève la température de la vapeur. On a désigné celle-ci, dans le même cas, sous le nom de *vapeur naissante*, pour la distinguer de la vapeur proprement dite, dont les molécules étant à des distances respectives plus grandes que le rayon de leur sphère d'affinité sensible, ne sont plus soumises à d'autre force que l'élasticité du calorique.

### *Loi de la Dilatation des Gaz, par leur union avec les Vapeurs.*

294. Il suit de ce qui a été dit plus haut, qu'une masse d'air saturée d'eau en vapeur à 15<sup>d</sup>, exige une pression de 27 pouces  $\frac{1}{29}$  pour continuer d'être resserrée dans l'espace où une pression de 27 pouces aurait suffi auparavant pour la maintenir. Concevons donc qu'elle ne soit encore chargée que de cette dernière pression. L'air dont la force élastique se trouve augmentée par son union avec la vapeur, subira une dilatation qui fera croître son volume, jusqu'à ce que son ressort ne soit plus capable que de faire équilibre à la pression de 27 pouces dont il est chargé.

295. Ceci nous conduit à exposer les résultats d'une suite de recherches entreprises par le célèbre Dalton, et qui donnent une grande extension à celles de Saussure. Le but de ces recherches est de déterminer la quantité dont les gaz se dilatent par leur union avec les vapeurs; car ici le phénomène que présente l'air n'est encore qu'une modification particulière d'une loi commune

à laquelle sont soumises toutes les substances gazeuses, en sorte que ce fluide, après avoir été l'unique objet des expériences de ce genre, n'est plus distingué que par la facilité de pouvoir être pris pour exemple.

296. Voici en quoi consiste le problème que Dalton s'est proposé de résoudre : on suppose une masse d'un gaz quelconque, soumise à une pression déterminée, et située au-dessus d'un liquide dont la température est donnée; connaissant la force de la vapeur que produit le liquide à cette même température, on veut savoir dans quel rapport s'accroîtra le volume du gaz par le mélange de la vapeur.

297. Dans les expériences relatives à ce sujet (1), Dalton se sert d'un tube de verre droit, fermé à une extrémité, et divisé en parties égales. Il introduit au fond de ce tube quelques gouttes du liquide, qu'il veut soumettre à l'évaporation, et renferme dans le même tube un gaz, qu'il charge d'une colonne de mercure plus ou moins haute, selon l'objet qu'il a en vue. Il plonge ensuite l'extrémité fermée du tube dans une eau dont la température est connue, puis il détermine, d'après l'ascension de la colonne de mercure, l'expansion du gaz, à mesure que la vapeur agit sur lui, pour écarter ses molécules.

298. Concevons que la pression à laquelle le ressort du gaz, que nous supposerons être l'air commun, fait d'abord équilibre, soit égale à celle d'une colonne de mercure de 27 pouces, et que la vapeur qui sera, par exemple, celle de l'eau, soit capable de soutenir seule une pression de 6 lignes, la température étant de 15<sup>d</sup> de Réaumur. A mesure que la vapeur s'élèvera dans l'air, ce dernier fluide se dilatera, et, pendant tout le temps de sa dilatation, il se formera une nouvelle quantité de vapeur proportionnelle à l'augmentation de volume, de manière que la force élastique de la vapeur sera constamment égale à une pression de 6 lignes. Or, au terme où la dilatation s'arrêtera, le ressort de l'air, diminué par cette même dilatation, joint au ressort constant de la vapeur, fera de nouveau équilibre à la pression de

---

(1) Bibliothèque britannique, n<sup>o</sup> 160, vol. xx, p. 338 et suiv.

27 pouces, c'est-à-dire que le ressort de l'air, qui d'abord était exprimé par cette même quantité de 27 pouces, ne le sera plus que par 26 pouces 6 lignes. Donc, puisque les volumes sont en raison inverse des forces de ressort, le volume de l'air, après la dilatation, sera au volume primitif comme 27 est à  $26\frac{1}{2}$ , ou comme 54 est à 53, et en d'autres termes, comme la force de ressort de l'air, dans son état primitif, est à la différence entre cette même force et celle de la vapeur (1). Ce résultat est celui auquel conduit l'expérience de Saussure.

Supposons que la pression dont le gaz est chargé, ou ce qui est la même chose, la force de ressort de ce gaz, avant l'expérience, ne soit que de 20 pouces, et que celle de la vapeur soit de 10 pouces; le volume du gaz, après la dilatation, sera au volume primitif, comme 20 est à 20 moins 10, ou comme 20 est à 10, c'est-à-dire que le volume du gaz se trouvera doublé.

Lorsque la force constante de la vapeur est égale à la force primitive du gaz, elle détruit à chaque instant l'effet de la pression que soutenait le gaz, en sorte que la dilatation n'a plus de terme, et s'étend à l'infini (2).

299. On voit, par ce qui précède, que dans l'union d'une vapeur avec un gaz, l'élasticité du mixte est la somme des élasticités qu'auraient les composans, si chacun d'eux occupait seul l'espace rempli par le mixte. Ainsi, dans l'expérience de Saussure (289), l'élasticité du mixte, dont l'expression est 27, se compose d'une force exprimée par  $26\frac{1}{2}$ , qui est celle de l'air, cu

(1) Soit  $P$  la pression que soutenait l'air avant l'expérience, ou, ce qui revient au même, la force de ressort qu'avait alors ce fluide;  $P'$  la pression que la vapeur seule est capable de soutenir, ou sa force de ressort;  $V$  le volume primitif du gaz, et  $V'$  le volume après la dilatation. Dans ce dernier cas, la force de ressort de l'air se trouvera réduite à  $P - P'$ ; et puisque les volumes sont réciproques aux forces de ressort, on aura  $V' : V :: P : P - P'$ , d'où l'on tire  $V' = \frac{VP}{P - P'}$ , et  $V' = V + \frac{VP'}{P - P'}$ , ce qui est la formule de Dalton. Pour l'appliquer à l'exemple cité, on fera  $V = 1$ ,  $P = 27$ ,  $P' = 1$ , ce qui donne  $V' = \frac{27}{27 - 1} = \frac{54}{53}$ .

(2) Dans ce cas,  $P = P'$ , et la formule devient  $V' = \frac{P}{0}$ , quantité infinie.

égard à son état actuel de dilatation, et d'une autre force exprimée par  $\frac{1}{2}$ , qui est celle de la vapeur répandue dans le même espace.

*Pesanteur spécifique de la Vapeur comparée à celle de l'Air.*

300. Donnons un nouveau développement au résultat qui vient d'être cité, pour en déduire l'explication d'un fait observé par différens physiciens, savoir, que la pesanteur spécifique de l'air diminue, à mesure que ce fluide se charge d'une plus grande quantité de vapeur. Nous avons dit (289) que celle qui est répandue dans un pied cube, à la température de  $15^d$ , forme un poids de 10 grains, et qu'en même temps son ressort fait équilibre à 6 lignes de mercure. Or, un pied cube d'air qui, à la même température, soutient une pression de 27 pouces, pèse 751 grains. Supposons que cet air n'ait à supporter qu'une pression de 6 lignes. Il se dilatera dans un espace, qui sera à l'espace primitif comme 27 pouces est à 6 lignes, ou comme 54 est à 1; et parce que les densités, à égalité de masse, sont en raison inverse des volumes, la densité de l'air, après la dilatation, ne sera plus que  $\frac{1}{54}$  de sa densité primitive, d'où il suit que le poids d'un pied cube de cet air dilaté serait de  $\frac{751}{54}$  grains ou de 14 grains à peu près. Ainsi la pesanteur spécifique de l'air, est à celle de la vapeur, comme 14 est à 10, la température et la pression étant supposées être les mêmes de part et d'autre (1); d'où nous concluons que, quand l'air se dilate par l'action d'une vapeur qui se mêle avec lui, son volume s'accroît dans un rapport plus grand que celui de l'augmentation de masse. Newton, dans ses *Questions d'Optique*, où l'on trouve une foule d'aperçus, qui sont comme des germes précieux dont le développement était réservé à d'autres temps, remarque que le véritable air est plus pesant que les vapeurs, et qu'une atmosphère humide est plus légère qu'une atmosphère sèche à quantités égales (2).

(1) Essais sur l'Hygrométrie, n° 288.

(2) Optice lucis, lib. III, quæst. 31.

*Accord de la théorie avec l'observation, sur la capacité de l'Air pour la Vapeur.*

301. Saussure avait déterminé, par une observation immédiate, la quantité de vapeur contenue dans un pied cube d'air, à la température de  $15^{\text{d}}$ . Le célèbre Laplace a conçu l'idée de considérer cette même quantité comme l'inconnue d'un problème, dont le but serait d'en trouver la valeur, en prenant pour donnée le résultat que M. Gay-Lussac a obtenu, par rapport à la dilatation des fluides élastiques.

La vapeur que contient un pied cube d'air, à  $15^{\text{d}}$  du thermomètre, est dans le même état que si elle occupait seule cet espace, sous une pression de six lignes de mercure et à la même température (289). Or on sait qu'à une température de  $80^{\text{d}}$  et sous une pression de 28 pouces de mercure, la vapeur de l'eau est environ 1600 fois plus légère que l'eau liquide. Un pied cube de celle-ci pèse 70 livres; d'où il suit que le poids d'un pied cube de vapeur aqueuse, à  $80^{\text{d}}$  et sous une pression de 28 pouces, est de  $\frac{70 \text{ liv.}}{1600}$ .

Supposons que cette quantité de vapeur, en restant toujours à une température de  $80^{\text{d}}$ , ne soutienne plus qu'une pression de 6 lignes; son nouveau volume sera au volume primitif dans le rapport inverse des pressions, c'est-à-dire comme 28 pouces est à 6 lignes, ou comme 56 est à l'unité. Donc, après la dilatation, un pied cube de cette vapeur ne pèsera plus que  $\frac{70 \text{ liv.}}{56 \cdot 1600}$  ou  $\frac{1}{1280}$  de livre.

Mais ce volume étant calculé d'après la supposition d'une température de  $80^{\text{d}}$ , il faut le ramener à ce qu'il serait par une température de  $15^{\text{d}}$ , qui est celle qu'avait la vapeur de l'eau, dans l'expérience de Saussure. Or, M. Gay-Lussac a trouvé que les gaz se dilatent de  $\frac{1}{213}$  de leur volume (250), en passant de la température de la glace à celle de l'eau bouillante; c'où il suit que si l'on se contente d'un à peu près, on pourra supposer la dilatation de  $\frac{1}{213}$  du volume, pour chaque degré de chaleur. Donc le vo-

lume d'une quantité de vapeur dont la température est de  $15^{\text{d}}$ , est à celui de la même quantité à  $80^{\text{d}}$ , comme  $1 + \frac{15}{213}$  est à  $1 + \frac{80}{213}$ , ou comme 228 est à 293. Donc puisque les densités sont en raison inverse des volumes, pour une même quantité de matière, la densité de la vapeur à  $15^{\text{d}}$  est à celle de la vapeur à  $80^{\text{d}}$  comme 293 est à 228. Donc enfin, puisque les poids, à volume égal, sont proportionnels aux densités, le poids d'un pied cube de vapeur à  $15^{\text{d}}$  sera à  $\frac{1}{1280}$  de livre, qui est le poids du même volume à  $80^{\text{d}}$ , comme 293 à 228, ce qui donne pour le poids d'un pied cube de vapeur à  $15^{\text{d}}$ ,  $\frac{293 \text{ liv.}}{228.1280}$ , ou environ  $9^{\text{sr}}, 3$  (1), résultat peu différent de celui de Saussure; et tel est l'avantage des expériences même isolées, quand elles sont bien faites, qu'elles n'attendent que les théories pour se rallier autour d'elles.

*Différence entre l'effet de la pression sur la Vapeur quand celle-ci est seule, et quand elle est unie à l'Air.*

Nous allons maintenant comparer les effets de la pression par rapport à la vapeur considérée dans le vide, avec ceux qui ont lieu lorsqu'elle est unie à l'air. Cette comparaison nous conduira, pour ainsi dire, à l'endroit par lequel la théorie doit aborder ce sujet délicat, pour essayer de pénétrer jusqu'à la cause des phénomènes qu'il présente.

302. Supposons donc d'abord une vapeur contenue dans un espace purgé d'air, et chargée de la pression à laquelle son ressort est capable de faire équilibre, par la température actuelle.

---

(1) Voyez dans le Bulletin des Sciences de la Société Philomatique, ventôse an xi, p. 189, un article de M. Biot, où ce savant géomètre, après avoir exposé les résultats et la théorie de Dalton, donne le calcul relatif au rapprochement dont il s'agit.

Si l'on augmente la pression, et que la cause qui produit celle-ci agisse à la manière d'un piston, les molécules de la vapeur se rapprocheront successivement les unes des autres, à mesure que l'espace diminuera, et la vapeur se réduira toute entière en eau.

Dans le même cas, si l'on arrête la pression à un certain terme, en sorte par exemple, que l'espace soit seulement diminué de moitié, il n'y aura qu'une moitié de la vapeur qui se réduira en eau; l'autre moitié restera à la même tension dans la partie de l'espace que la pression n'aura point atteinte (292).

303. Ces effets sont très sensibles dans les résultats d'une expérience qui a pour auteurs Laplace et Lavoisier, et dont le but était de montrer avec quelle force l'éther se dilate, en s'évaporant dans le vide. Parmi les différens procédés que l'on peut employer pour la répéter, en voici un qui est simple, et qui a été imaginé par Van-Marum (1). On prend un tube de baromètre que l'on remplit d'abord entièrement de mercure, tandis que l'extrémité fermée est tournée vers la terre. On fait ensuite sortir de ce tube deux lignes de mercure, que l'on remplace par une égale quantité du liquide dont on veut éprouver la dilatation, puis on renverse le tube, en tenant le doigt appliqué sur l'orifice. Pendant ce mouvement, le liquide monte à travers la colonne de mercure, et va se placer dans la partie supérieure du tube. On plonge celui-ci par le bas dans un bain de mercure, on lui donne une position fixe, et on retire le doigt. A l'instant la colonne qui occupe le tube tend par elle-même à descendre jusqu'à ce que son poids soit en équilibre avec la pression de l'atmosphère, et aussitôt que le vide commence à se former au-dessus de sa surface supérieure, le liquide passe, en tout ou en partie, à l'état de vapeur, et celle-ci agissant par son élasticité sur la colonne de mercure, ajoute un nouvel effort à celui qu'elle fait par son poids, en sorte qu'elle se tient plus bas que dans le baromètre ordinaire. Van-Marum a observé qu'à une température de  $10^d$  de Réaumur, cet abaissement est de 12 pouces  $\frac{1}{2}$  ou environ 34 centimètres. La vapeur

---

(1) Description de quelques Appareils chimiques, etc., Harlem, 1798, p. 97 et suiv.

aqueuse, dans le même cas, fait descendre le mercure de  $\frac{2}{3}$  de pouce ou environ 11 millimètres.

Or, si l'on enfonce plus profondément le tube dans le mercure où il est plongé, la colonne de ce métal qui en occupe l'intérieur s'y maintenant à la même hauteur, il en résulte une diminution continue de l'espace qui renferme la vapeur, et toutes les molécules de celle-ci perdent successivement leur état élastique, de manière qu'à la fin il ne reste plus que du liquide entre la colonne de mercure et le sommet du tube.

304. Concevons maintenant qu'un mélange d'air et de vapeur soit d'abord soumis à la pression que comporte son élasticité, et qu'ensuite on augmente cette pression. L'air se contractera d'une certaine quantité, et la portion de vapeur qui occupait l'espace abandonné par cet air, se convertira en eau. Mais parce que l'air est un fluide permanent qu'aucune force connue ne peut amener au degré de condensation où la force élastique du calorique qui écarte ses molécules céderait à leur affinité mutuelle, la compression s'arrêtera d'elle-même, au terme où elle sera équilibrée par le ressort de l'air condensé, joint à celui de la vapeur qui aura conservé son état et sa tension dans l'espace où l'air se trouve confiné.

Imaginons, pour fixer nos idées, que la vapeur seule ait une force élastique mesurée par une pression de 38 centimètres ou de 14 pouces, et qu'il en soit de même de l'air, dans le premier moment où la pression n'a encore subi aucune augmentation. Cette pression, à laquelle le mixte fait alors équilibre, est de 76 centimètres ou de 28 pouces. Mais si l'on isolait les deux fluides, la pression dont il s'agit réduirait l'air à la moitié de son volume, et s'arrêterait à ce terme, où l'élasticité de l'air étant doublée avec sa densité, opposerait à la pression une résistance équivalente. D'une autre part, la même pression, en exerçant sur la vapeur une action continue, la convertirait tout entière en eau. Or, dans le cas où les deux fluides sont unis, si cette union ne consistait que dans une simple juxtaposition de leurs molécules, en sorte qu'ils existassent dans le même espace indépendamment l'un de l'autre, et sans être liés entre

eux par aucune action mutuelle, chacun d'eux n'opposerait à la pression de 76 centimètres que la force répulsive de ses propres molécules, qui n'est que de 38 centimètres : ainsi l'air se comprimerait jusqu'à ce qu'il fût réduit à la moitié de son volume ; en même temps la moitié de la vapeur se réduirait en eau, et l'autre moitié n'éviterait le retour à l'état de liquidité, que parce qu'elle serait comme protégée par l'air, dont l'élasticité ferait obstacle à la diminution de l'espace. Or, il en est tout autrement, et dès le premier instant, le mixte soutient la pression de 76 centimètres, sans qu'aucune partie de la vapeur se réduise en eau. Pour que cet effet eût lieu, il faudrait augmenter la pression, comme nous l'avons dit. En quoi consiste donc, dans le cas présent, l'influence réciproque de l'air et de la vapeur, et quel est en général le rôle que joue l'air dans l'évaporation ? c'est ici le nœud de la difficulté, quoiqu'il ait été manié et retourné par des mains très habiles, et les physiciens ne s'accordent pas encore sur le moyen de le résoudre.

### *Théorie de Leroi sur l'Évaporation.*

305. Si nous remontons aux plus anciennes opinions qui aient été émises sur cet objet, nous trouvons qu'elles tendaient toutes à donner au feu la principale part dans la production du phénomène. Les uns pensaient que les molécules de l'eau extrêmement divisées par le feu, et acquérant une augmentation considérable de surface, eu égard à leur volume, donnaient prise à l'air pour s'emparer d'elles, en les heurtant, et en les enveloppant dans les contours des petites spirales dont il était composé. Selon d'autres, le feu, en dilatant les molécules de l'eau, les rendait spécifiquement plus légères que l'air, en sorte que leur ascension dans ce fluide n'était qu'un phénomène ordinaire d'Hydrostatique.

Au milieu de ce conflit d'opinions, les principes de la dissolution de l'eau par l'intermède de l'air, dont la première idée est due à Muschenbroeck (1), mais qu'il s'était borné à énoncer,

---

(1) Essai de Physique, Leyde, 1751, t. 11, p. 721.

devint, entre les mains de Leroi de Montpellier, la base d'une nouvelle théorie de l'évaporation, qui fut d'autant mieux accueillie, qu'indépendamment de ce qu'elle avait pour elle une raison très spécieuse d'analogie, elle tendait à faire rentrer un des plus grands phénomènes de la nature sous la puissance universelle de l'attraction (1).

306. Voici à quoi se réduit toute la doctrine de ce physicien : l'air dissout l'eau de la même manière et avec les mêmes circonstances que l'eau dissout les sels ; en sorte que comme l'eau en s'échauffant devient capable de dissoudre une nouvelle quantité de sel, et abandonne, en se refroidissant, une partie de celui qu'elle avait dissous, ainsi à proportion que l'air s'échauffe ou se refroidit, il lui faut plus ou moins d'eau pour arriver à son point de saturation.

Les expériences qui ont conduit le même physicien à l'adoption de ce principe, sont celles qui se répètent spontanément tous les jours. Elles avaient été vues mille fois ; mais personne ne les avait encore regardées.

307. L'auteur exposa sur sa fenêtre une bouteille de verre blanc, exactement bouchée ; la température était alors de 20 degrés au-dessus de zéro du thermomètre en 80 parties. Quelque temps après, le thermomètre étant descendu, pendant la nuit, à quinze degrés, Leroi s'aperçut qu'une partie de l'eau contenue dans l'air dont la bouteille était remplie, s'était déposée en forme de gouttelettes, sur ses parois supérieures qui, étant les plus exposées, avaient dû se refroidir les premières. Cette espèce de rosée devint beaucoup plus abondante, lorsque le thermomètre fut descendu à six degrés. L'air, en se réchauffant pendant le jour, dissolvait ensuite l'eau qui s'était précipitée pendant la nuit. Cet air représentait tout le reste de l'atmosphère ; le vase, soumis à l'expérience, ne faisait que montrer aux yeux ce qui se passait ailleurs d'une manière insensible. Cette expérience, répétée et variée avec toutes les attentions convenables pour la rendre décisive, a donné constamment des résultats analogues.

---

(1) *Mélanges de Physique et de Médecine*, p. 1 et suiv.

Leroi a cherché ensuite le moyen de déterminer le degré de saturation de l'air relatif à un état donné de l'atmosphère. Pour y parvenir, il versait dans un grand gobelet de cristal bien sec par dehors, de l'eau assez froide pour occasionner sur les parois extérieures, refroidies par le voisinage de cette eau, un précipité de celle qui était en dissolution dans l'air environnant, à mesure que la température de l'eau s'élevait d'un demi-degré, il versait de cette eau dans un nouveau vase, et observait le terme où le précipité s'arrêtait : ce terme indiquait le degré de saturation de l'air. L'auteur a reconnu, à l'aide de cette expérience, que la direction et la force du vent faisaient varier très sensiblement le degré de saturation, qu'il était plus bas par le vent de nord que par celui de nord-ouest ; et que dans l'un et l'autre cas, la force du vent contribuait encore à l'abaisser.

308. Cependant la comparaison faite par Leroi, de la manière dont l'air dissout l'eau, avec celle dont l'eau dissout les sels, en la supposant exacte quant au fond, ne se soutient pas sous tous les rapports. Il y aurait cette différence entre les deux phénomènes, qu'un sel qui se dissout dans l'eau passe de l'état de solidité à celui de liquidité, en sorte que sa pesanteur spécifique ne varie pas d'une quantité considérable ; tandis que l'eau, en s'évaporant, passe de l'état de liquidité à celui de fluidité élastique, ce qui diminue sa densité dans un rapport plus grand que celui de mille à l'unité.

Mais les physiciens qui ont adopté la théorie dont il s'agit ; ont trouvé que, considérée en elle-même, elle devait être aussi modifiée à certains égards.

309. On ignorait, à l'époque où cette théorie a paru, que la quantité de vapeur qui se forme dans l'air, à une température déterminée, est la même que celle qui serait produite dans le vide, à la même température et à égalité d'espace. On n'avait pas non plus assez considéré que la vapeur qui se forme, à toutes les températures, au-dessous du terme de l'ébullition, ne diffère que par sa densité de celle dont la formation concourt avec l'ébullition elle-même. Or, la cause productrice de cette dernière vapeur, ainsi que de celle qui naît dans le vide, ne pouvait être

que la force élastique du calorique, qui écartait les molécules de l'eau à des distances où leur affinité mutuelle devenait comme nulle par rapport à cette même force. On conclut de ces observations, que le calorique qui faisait tout, en l'absence de l'air, ou lorsque la température du liquide sur lequel reposait l'air était au degré de l'ébullition, concourait, avec ce dernier fluide, à l'évaporation ordinaire. Suivant l'opinion de Saussure, l'air ne commençait même à dissoudre l'eau que quand l'action du calorique l'avait convertie en fluide élastique (1). Ainsi l'air qui, d'un côté, s'opposait, par sa pression, à la force de ressort du calorique, pour réduire l'eau en vapeur, la secondait, d'un autre côté, par l'affinité qu'il exerçait sur ce liquide.

Dans cette même hypothèse, la vapeur, tandis qu'elle était attirée par l'air, agissait sur ce fluide par son élasticité, pour écarter ses molécules, jusqu'à ce que la perte que l'air faisait d'une partie de son ressort, par cet écartement, fût égale au ressort constant de la vapeur, en sorte qu'à l'aide de la compensation qui en résultait, l'équilibre avec la pression de l'atmosphère se trouvait rétabli. C'était en vertu de cette affinité que l'air exerçait sur la vapeur, que celle-ci échappait à l'effet de la pression, qui sans cela en eût forcé une partie de repasser à l'état de liquidité (302).

310. On ne peut refuser à la théorie de Leroi, ainsi modifiée, le mérite d'offrir une manière plus plausible de concevoir les phénomènes. Cependant, lorsqu'on y regarde de près, on a peine à reconnaître ici l'affinité. On sait que l'action de cette force se modifie diversement, et change pour ainsi dire de mesure, suivant la nature des substances qui l'exercent. Comment concilier avec ces variations, l'uniformité qui existe dans la quantité de vapeur dont tous les gaz se saturent, par un même degré de chaleur et à égalité d'espace, surtout si l'on considère que cette quantité est égale à celle qui, dans les mêmes circonstances, se formerait au milieu du vide par la seule action du calorique?

---

(1) *Essais sur l'Hygrométrie*, n° 191.

*Théories de Deluc et de Dalton.*

311. D'après les réflexions que nous venons de faire, on ne sera pas étonné que des physiciens d'un mérite distingué aient écarté de leur théorie la considération de l'affinité, pour ramener tout à l'élasticité, soit de l'air, soit de la vapeur. La première théorie de ce genre qui ait paru, a pour auteur le célèbre Deluc. Selon ce physicien, l'évaporation est produite uniquement par le feu qui, s'unissant au liquide, l'entraîne avec lui, sous la forme d'un fluide expansible (1). Les particules de ce fluide se mêlent à celles de l'air : là, elles contribuent, pour leur part, à supporter la pression de l'atmosphère, comme si elles étaient autant de particules d'air appartenant à la même masse; toute la différence consiste en ce qu'elles ne pourraient être rapprochées entre elles au-delà d'un certain point déterminé par la température, sans qu'une partie ne se décomposât, pour se convertir en eau. Mais elles sont garanties de ce rapprochement, par leur mélange avec l'air au milieu duquel elles exercent leur force expansive, comme si elles se trouvaient dans le vide (2).

312. La manière dont le même sujet a été envisagé par Dalton ne s'éloigne pas beaucoup de celle que nous venons d'exposer. Ce savant pense que quand une vapeur, telle que la vapeur de l'eau, se mêle, par exemple, à l'air atmosphérique, les molécules de chaque fluide se repoussent mutuellement, sans exercer aucune action sur celles de l'autre fluide. Ainsi, à l'instant même du mélange, l'élasticité de la vapeur décharge l'air d'une partie de la pression qu'il soutenait. Cet air se dilate donc par l'excès de sa force élastique, jusqu'à ce que la partie qui lui en reste, jointe à l'élasticité de la vapeur, soit en équilibre avec la pression. Dans cet état de choses, les molécules des deux fluides agissent comme feraient de petits ressorts de deux espèces intercalés les uns entre les autres, de manière que ceux de chaque espèce exerçassent leur

(1) *Introduc. à la Phys. terrestre*, t. 1, p. 383.

(2) *Ibid.*, t. 1, p. 399.

force séparément. Si quelque molécule d'un des fluides éprouve une résistance de la part des molécules de l'autre, ce n'est qu'une résistance, pour ainsi dire, de rencontre, semblable à celle qui a lieu dans le choc des corps solides, et qui ne peut en conséquence exister qu'accidentellement, par une suite du contact.

Tout ce que la Chimie peut opposer de plus fort à cette doctrine, dans l'hypothèse de la dissolution de l'eau par l'air, a été employé par M. Berthollet, pour défendre ici les droits de l'affinité, dans le bel ouvrage où il a présenté la théorie de cette force d'une manière si neuve et si digne de son génie (1). Mais comme l'hypothèse dont il s'agit n'est pas elle-même à l'abri des objections (305), c'est plutôt dans la Physique que doivent être puisées les considérations qui peuvent faire apprécier la manière de voir des deux auteurs. Or, nous nous contenterons d'observer, à cet égard, que celle de M. Dalton, loin de servir à expliquer comment la vapeur peut résister à la pression qui tend à la convertir en eau, met au contraire la difficulté à découvert, en nous offrant les actions de l'air et de la vapeur comme entièrement isolées l'une par rapport à l'autre. Quant à M. Deluc, l'expression de mélange par laquelle il désigne l'union de la vapeur avec l'air, déguise la difficulté plutôt qu'elle ne la fait disparaître.

### *Théorie de Laplace.*

313. Entre les deux hypothèses que nous venons d'exposer, il en est une troisième, dont l'idée est encore le fruit des savantes méditations du célèbre Laplace. Elle consiste à considérer la vapeur unie à l'air, comme exerçant sur ce dernier fluide, et éprouvant de sa part la même action répulsive qu'une nouvelle masse d'air dont l'élasticité et la densité seraient les mêmes, toutes choses égales d'ailleurs, que celles de la vapeur.

Pour rendre ceci sensible par un exemple, imaginons un cylindre d'air infiniment délié, qui se réduise à une simple file de molécules de ce fluide, et supposons que la température étant,

---

(1) Essai de Statique chimique, première Partie, p. 485 et suiv.

par exemple, de 20<sup>d</sup>, celles de ces mêmes molécules qui sont voisines se repoussent avec une force capable de faire équilibre à une pression de quatre décimètres de mercure. Concevons d'une autre part une file de molécules de vapeur de la même longueur que la précédente et capable de soutenir la même pression de quatre décimètres, la température de cette vapeur étant aussi de 20<sup>d</sup>. Si nous supposons que le nombre de molécules soit égal de part et d'autre, toute la différence consistera en ce que celles de la vapeur seront moins denses, puisque la pesanteur spécifique de la vapeur, à égalité de température, est plus petite que celle de l'air (300).

Lorsque nous disons que les molécules de l'air ou celles de la vapeur se repoussent, ce n'est qu'une manière abrégée d'exprimer que les molécules du calorique interposées entre les unes ou les autres, agissent comme autant de petits ressorts bandés, pour augmenter leurs distances respectives, l'effet de cette action élastique étant équivalent à une répulsion mutuelle dont la cause existerait dans les molécules elles-mêmes.

Intercalons maintenant les molécules de la vapeur, une à une, entre celles de l'air. Il est évident que deux molécules voisines, l'une d'air, l'autre de vapeur, se repousseront mutuellement avec une force double de la première, en sorte que le mélange sera capable de soutenir une colonne de mercure de huit décimètres de hauteur, sans que les molécules de la vapeur puissent se rapprocher. Car quoiqu'elles soient encore aux mêmes distances respectives où leur répulsion mutuelle n'est mesurée que par quatre décimètres, l'action répulsive que les molécules de l'air exercent sur elles, les maintient dans leurs positions, et les soustrait à l'effet de la pression qui, sans la présence de l'air, en forcerait une partie à se réduire en eau. Dans le mélange dont il s'agit, l'intervalle entre chaque molécule d'air et la molécule voisine de vapeur, sera de même occupé par un petit ressort de calorique, dont l'action pour les écarter l'une de l'autre est ce que nous désignons par le mot de *répulsion*.

Les choses auront lieu d'une manière analogue, relativement à une masse d'air entremêlée de vapeur, toutes les circonstances étant d'ailleurs les mêmes. Une molécule de vapeur, située dans

un point quelconque de la masse, sera environnée de molécules d'air opposées deux à deux sur des directions qui passeront toutes par cette molécule, en sorte qu'elle sera garantie de toutes parts, contre la pression qui la rapprocherait des autres molécules, si elle restait abandonnée à elle-même.

314. On peut supposer que l'élasticité de la vapeur soit différente de celle de l'air : par exemple, dans l'expérience de Saussure (289), elle n'en est que la 53<sup>e</sup> partie, à égalité de température. Dans ce cas, les molécules de la vapeur conservent toujours au milieu de celles de l'air les mêmes distances respectives que quand elles existaient seules dans un espace égal à celui qu'occupe le mélange, et les molécules de l'air se rapprochent de manière que leur force répulsive mutuelle comparée à celle qui avait lieu lorsque cet air était pur, se trouve augmentée dans le rapport de 53 à 54; et comme elles exercent sur les molécules de la vapeur, et subissent de leur part des actions égales à celle de cette même force, il en résulte que l'élasticité du mélange est encore la somme des élasticités qu'avaient les deux fluides, lorsqu'ils existaient séparément. On conçoit aussi comment l'action répulsive des molécules de l'air sur celles de la vapeur a de même son effet pour s'opposer à leur réunion.

La vapeur, telle que nous la considérons ici, est à l'état de vapeur naissante (293), c'est-à-dire que ses molécules sont à des distances respectives un peu plus petites que le rayon de leur sphère d'affinité sensible. Il n'en est pas de même des molécules de l'air considérées entre elles; leurs distances mutuelles sont plus grandes que le rayon de leur sphère d'affinité sensible, et il en faut dire autant de la distance qui sépare chaque molécule de vapeur de la molécule d'air voisine; telle est la petitesse du rayon de la sphère d'affinité sensible de l'air pour la vapeur, que la distance dont il s'agit excède l'étendue de ce rayon. Ainsi, dans l'hypothèse où l'espace viendrait à diminuer, les molécules de la vapeur subiraient un rapprochement à la faveur duquel leurs attractions réciproques se trouvant augmentées, en détermineraient une partie à reprendre l'état liquide, et du reste tout se passerait comme s'il n'existait point d'air dans l'espace qu'occupe la vapeur (292).

315. Ce que nous venons de dire des molécules de l'air et des molécules aqueuses, s'applique également à tous les corps qui, en passant à l'état de gaz ou de vapeur, deviennent susceptibles d'agir les uns sur les autres par répulsion, dans des circonstances semblables à celles que nous avons citées. Il en est cependant quelques-unes où les fluides que l'on mêle, cèdent au contraire à leur affinité mutuelle, en se combinant; et cet effet qui, au premier aperçu, ne paraît pas se concilier avec la théorie précédente, n'en est qu'un corollaire. On sait, par exemple, que quand on forme un mélange de gaz nitreux et d'air atmosphérique, le volume du mélange diminue, en même temps que l'air absorbe le gaz nitreux. Or, si nous imaginons que les deux fluides restent pendant un instant dans leur état primitif, les molécules de chacun, considéré séparément, se trouveront à des distances respectives plus grandes que le rayon de leur sphère d'affinité sensible pour elles-mêmes. Mais telles seront les positions mutuelles que les molécules des deux espèces auront prises, en se mêlant, que la distance entre chaque molécule d'air et la molécule de gaz nitreux qui en est voisine, sera moindre que le rayon de la sphère d'affinité sensible de l'air pour l'autre principe; et l'effet de cette différence donnera à l'affinité dont il s'agit une prépondérance capable de déterminer la combinaison des deux gaz et l'absorption qui en est la suite. Il sera facile d'étendre cette explication à d'autres cas analogues, et de ramener toutes les diversités qu'offrent les phénomènes de ce genre, à celle qui existe dans le rapport entre l'intervalle au-delà duquel l'attraction des molécules d'un principe sur celles de l'autre est censée s'évanouir, et celui que la force élastique du calorique met entre elles.

## 11. De la Combustion.

316. Quoique la théorie de la combustion soit fondée sur les lois auxquelles sont soumises les actions chimiques, nous ne pouvons nous dispenser de donner ici en abrégé l'histoire de sa naissance, et des progrès dont elle est redevable aux découvertes des chimistes modernes, parce que cette histoire se rattache en par-

tie à celle de la Physique. La combustion présente, en général, l'aspect d'un corps qui se dissipe en produisant ce qu'on appelle communément *chaleur* et *lumière*. Dans le langage vulgaire, *feu* et *combustion* sont presque synonymes l'un de l'autre; mais dans les idées des anciens philosophes, le feu était l'agent de la combustion. Ils le regardaient comme un principe fixé dans les corps, dont le dégagement produisait la dissipation des molécules de la substance embrasée; et c'était à ce même principe que Stahl avait donné le nom de *phlogistique*. La manière dont les physiciens qui ont adopté la doctrine de cet homme célèbre expliquaient la combustion, était d'autant plus séduisante, que la cause dont ils faisaient dépendre ce phénomène s'offrait sous l'air d'une cause mécanique. Les molécules du feu élémentaire étaient logées dans celles des corps, comme dans autant de petites enveloppes, où elles éprouvaient une compression semblable à celle d'un ressort bandé. Dans la combustion, le feu, en s'échappant par sa force expansive, des particules par lesquelles commençait la déflagration, imprimait aux particules voisines une secousse qui occasionnait leur rupture, par le débandement du feu qu'elles recélaient; et ainsi, de proche en proche, la combustion et, par une suite nécessaire, l'embrasement se communiquait à toute la masse. L'air contribuait à entretenir et à accélérer l'action du feu, en réagissant contre lui, et en opposant à sa dissipation un obstacle qui concentrait son action dans un espace plus étroit, et en augmentait l'énergie.

Les découvertes des chimistes modernes, et surtout celles de l'illustre Lavoisier, ont entièrement changé le point de vue sous lequel la combustion doit être envisagée. On a fait consister ce phénomène dans une combinaison des molécules propres d'un corps avec celles de l'oxygène que ce corps enlevait à l'air environnant, accompagnée du dégagement de la lumière et du calorique, qui tenaient l'oxygène à l'état de fluide élastique. Cette doctrine a fait disparaître le phlogistique comme étant au moins inutile; et l'air atmosphérique, que l'on avait regardé comme un simple stimulant, par rapport à la combustion, a fourni le principe qui en devenait l'agent principal et immédiat.

317. La théorie de Lavoisier, qui, considérée dans toute son étendue, ralliait autour de l'oxygène, tant de phénomènes divers, où il se présentait tour à tour comme agent de la combustion, et comme principe acidifiable, fut adopté avec empressement d'abord par tous les chimistes français, et ensuite par une partie des chimistes étrangers. Les faits qui avaient servi à l'établir parlaient si clairement en sa faveur, qu'on ne douta point qu'elle ne s'appliquât également à tous les autres, et ne réunit le mérite de la généralité à celui de la simplicité.

Mais pour nous borner ici à ce qui regarde la combustion, de célèbres chimistes, en variant les expériences, trouvèrent que cette théorie souffrait des exceptions dans certains cas, dont un des plus remarquables était celui où l'oxygène n'éprouvait aucune diminution de volume.

La conséquence à laquelle conduit cette observation et les autres du même genre, est qu'il existe, dans la marche du phénomène, quelque circonstance susceptible d'être, au défaut de l'oxygène, la source de la lumière et du calorique qui se dégagent. Nous nous bornons à cette simple indication, dont le développement nous entraînerait dans des détails qui appartiennent plus spécialement à la Chimie, comme étant liés à la manière dont les choses se passent dans l'acte de la combinaison, et aux rapports intimes entre les actions des molécules qui la subissent.

#### IV. DE L'EAU.

DANS l'exposé que nous avons fait jusqu'ici des propriétés générales des corps, nous nous sommes bornés à citer quelques exemples tirés de ceux qui manifestent ces propriétés d'une manière plus sensible. Nous allons reprendre successivement certains liquides ou certains fluides particuliers qui ont une influence remarquable dans les phénomènes de la nature.

Le premier est l'eau, que nous considérerons d'abord dans son état ordinaire, qui est celui de liquidité, ensuite dans l'état de glace, puis dans celui de vapeurs, qui sont comme les extrêmes entre lesquels se trouve l'eau liquide.

## 1. De l'Eau à l'état de Liquidité.

318. Les principales propriétés physiques de l'eau liquide, consistent en ce qu'elle est insipide, inodore, transparente, sans couleur, et susceptible de mouiller la plupart des corps qu'on met en contact avec elle.

Tout le monde sait avec quelle abondance ce liquide est répandu dans la nature, et combien sont diversifiées les fonctions qu'il y exerce. Rassemblé en masses immenses dans les bassins des mers, entraîné par un mouvement progressif sur le lit des fleuves et des rivières, il sert de véhicule aux navires et à différentes espèces de bâtimens, pour établir par les voyages et par le commerce, une communication entre les peuples des diverses contrées. Il devient, par son impulsion, le moteur d'une multitude de machines aussi utiles qu'ingénieuses; et si l'homme a en sa disposition une puissance supérieure encore à celle qui agit dans ce cas, il la doit au même liquide converti en vapeurs. L'eau est l'élément dans lequel vivent une infinité d'êtres organisés; elle sert de boisson à l'homme et aux animaux qui peuplent la terre et les airs; elle est un des principaux agens de la végétation; c'est dans son sein que se sont formés une multitude de minéraux, et ces précieuses substances métalliques auxquelles l'industrie humaine semble donner une nouvelle existence, en les élaborant pour nos usages.

319. L'eau a été regardée, pendant long-temps, comme une substance simple; et, sous ce rapport, les anciens philosophes en faisaient un des quatre élémens qui donnaient naissance à tous les corps de la nature; savoir, le Feu, l'Eau, l'Air et la Terre. Cette opinion, quoique éloignée de la vérité, avait cela de séduisant, qu'elle faisait concourir à la formation de tous les autres êtres, ceux qui existent le plus généralement dans l'univers, qui, occupant comme autant de domaines distincts, l'un dans les espaces célestes, les trois derniers dans la région qu'habite l'homme, sont néanmoins toujours en commerce les uns avec les autres et avec le reste de la nature; qui, enfin, semblaient seuls

être fixes et inaltérables, au milieu des alternatives qui faisaient varier sans cesse la scène des animaux, des plantes et des minéraux.

La Chimie moderne a substitué, à ces systèmes nés de considérations abstraites, des théories fondées sur des faits; et parmi ces derniers, un des plus remarquables est la décomposition en oxygène et en hydrogène de ce même liquide que l'on avait rangé parmi les substances élémentaires. Nous nous bornons encore ici à indiquer ce résultat, dont le détail n'entre pas dans notre plan.

320. L'eau de pluie est celle qui approche le plus de l'état de pureté. M. Chaptal a observé que celle qui accompagne les orages est plus mélangée que celle d'une pluie douce, et que cette dernière devient plus pure pendant la durée de la pluie (1). L'eau qui baigne la surface du globe, ou coule dans son intérieur, est toujours chargée de matières hétérogènes. On sait que celle de la mer et de plusieurs fontaines contient plus ou moins abondamment un sel qu'on en retire par l'évaporation, et qui est connu sous le nom de *sel marin*. On appelle *eaux minérales*, celles qui renferment différentes substances salines, métalliques ou autres; elles sont employées avec succès, dans le traitement de diverses maladies; elles empruntent des substances unies avec elles une saveur, et quelquefois une odeur particulière. A l'égard de l'eau des rivières, elle tient en dissolution plusieurs matières pierreuse, et en particulier des molécules calcaires, et celle qui coule dans le sein de la terre forme des incrustations de ces mêmes molécules, tantôt à l'intérieur des canaux qui la reçoivent, tantôt autour des corps organisés qui y sont plongés.

321. On a tenté inutilement de comprimer l'eau en employant une très grande force; et cette propriété d'être sensiblement incompressible est générale pour tous les liquides. Une des expériences qui ont servi à la reconnaître, par rapport à l'eau, consiste à charger ce liquide d'une colonne de mercure, en employant un tube recourbé en forme de syphon, dont la branche la plus courte est fermée par sa partie supérieure, et contient

---

(1) *Elémens de Chimie*, troisième édition, t. 1, p. 139.

de l'eau, en même temps que la branche la plus longue est occupée par le mercure, qui presse la surface de l'eau. La colonne formée par ce dernier liquide ne se raccourcit pas de la plus petite quantité sensible, lors même que celle de mercure a 227 centimètres ou 7 pieds de hauteur, auquel cas elle exerce sur l'eau un effort triple de celui d'une colonne d'eau de 10 mètres  $\frac{4}{5}$  ou 32 pieds de hauteur. Il y a tout lieu cependant de présumer que l'eau est réellement compressible, mais dans un degré inappréciable, au moins par les efforts que l'on a employés jusqu'ici pour la condenser, car la faculté qu'elle a de transmettre les sons, prouve qu'elle est élastique, et cette qualité suppose nécessairement la compressibilité.

### *De l'Hygrométrie.*

322. L'observation des divers phénomènes produits par ce qu'on appelle *humidité*, a donné naissance à une branche de Physique qui porte le nom d'*Hygrométrie*. Nous allons exposer les principes relatifs à la théorie générale de ces phénomènes, et nous décrirons ensuite l'*hygromètre*, ou l'instrument qui sert à mesurer l'humidité de l'air.

Tous les corps susceptibles de s'imbiber d'eau, ont une disposition plus ou moins grande à s'unir avec ce liquide, par l'effet d'une attraction semblable à l'affinité chimique, jointe à la texture de leurs parties et aux autres circonstances.

Si l'on plonge dans l'eau plusieurs de ces corps, tels que du bois, une éponge, du papier, etc., ils s'approprient une quantité de ce liquide, qui variera d'un corps à l'autre; et comme à mesure qu'ils tendent vers le point de saturation, leur affinité pour l'eau va en diminuant, lorsque ceux qui attiraient l'eau plus puissamment seront parvenus au point où leur force attractive se trouvera seulement égale à celle des corps qui agissaient plus faiblement sur le même liquide, il s'établira entre tous ces corps une espèce d'équilibre, en sorte qu'à ce terme l'imbibition s'arrêtera.

On voit qu'il y a ici une parité entre la manière dont les corps

enlèvent le calorique, et celle dont ils s'imbibent d'eau; que la principale condition qui détermine l'équilibre est la même de part et d'autre, et qu'elle dépend des différentes capacités des corps pour la substance qui échauffe ou pour celle qui mouille.

Que l'on mette en contact deux corps imprégnés d'eau, mais dont les affinités pour ce liquide ne soient pas en équilibre; celui dont l'affinité sera plus faible cédera une partie de son eau à l'autre corps, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi; et c'est dans cette disposition d'un corps à communiquer aux corps environnans une partie de l'eau dont il est imbibé, que consiste proprement ce qu'on appelle *humidité*.

323. L'air est celui de tous les corps dont nous ayons le plus d'intérêt de connaître les différens degrés d'humidité, et c'est aussi vers les moyens propres à nous procurer cette connaissance, que les physiciens ont dirigé principalement leurs recherches; de là les diverses espèces d'instrumens que l'on a imaginés pour mesurer l'humidité de l'air.

324. On connaît une multitude de corps dans lesquels l'humidité, à mesure qu'elle augmente ou diminue, occasionne divers degrés de dilatation ou de contraction, suivant que le corps se prête à l'un ou à l'autre de ces effets, à raison de son organisation, de son tissu, ou de la disposition des fibres dont il est l'assemblage. Par exemple, l'eau, en s'introduisant dans l'intérieur des cordes faites de fibres tortillées et situées obliquement produit entre ces fibres un écartement qui fait gonfler la corde, et par une suite nécessaire, la raccourcit. Les fils tors dont on fabrique les toiles, peuvent être considérés comme de petites cordes qui éprouvent de même un raccourcissement par l'action de l'humidité; ce qui fait que les toiles, surtout lorsqu'on les mouille pour la première fois, se retirent dans les deux sens où leurs fils se croisent; au contraire, le papier, qui n'est qu'un assemblage de filamens très déliés, très courts, et disposés irrégulièrement dans toutes sortes de directions, s'allonge dans toutes les dimensions de sa surface, à mesure que l'eau, en s'insinuant dans les intervalles de ces mêmes filamens, agit, pour les écarter, en allant du milieu vers les bords.

On a employé successivement à la construction des hygromètres, différens corps choisis parmi ceux dans lesquels l'humidité produit les mouvemens les plus sensibles. On a cherché aussi à mesurer l'humidité de l'air par l'augmentation de poids que subissent certaines substances, telles qu'un flocon de laine, ou un sel, en absorbant l'eau contenue dans l'air.

Mais, outre que ces moyens étaient par eux-mêmes très imparfaits, les corps qu'on y employait étaient sujets à des altérations qui leur faisaient perdre plus ou moins promptement leur qualité hygrométrique ; ils avaient le double inconvénient de servir mal, et de n'être pas d'un long service.

### Hygromètre de Saussure.

325. Pour tirer de l'hygromètre des avantages réels, il fallait le mettre en état de rivaliser avec le thermomètre, en offrant une suite d'observations exactes, et qui fussent comparables dans les différens hygromètres.

Le célèbre Saussure, à qui nous devons un ouvrage très estimé sur l'Hygrométrie, est parvenu à remplir cet objet, par un procédé dont nous allons donner une idée

La pièce principale de cet hygromètre est un cheveu, auquel Saussure fait d'abord subir une préparation, dont le but est de le dépouiller d'une espèce d'onctuosité qui lui est naturelle, et qui le garantirait, jusqu'à un certain point, de l'action de l'humidité. Cette préparation se fait en même temps sur un certain nombre de cheveux formant une touffe, dont l'épaisseur ne doit pas excéder celle d'une plume à écrire, et renfermés dans une toile fine qui leur sert d'étui. On plonge les cheveux ainsi enveloppés dans un matras à long col, rempli d'eau, qui tient en dissolution à peu près un centième de son poids de sulfate de soude, et l'on fait bouillir cette eau pendant trente minutes ; on passe ensuite à deux reprises les cheveux dans l'eau pure, pendant qu'elle est aussi en ébullition ; on les retire de leur enveloppe, et on les sépare, puis on les suspend pour les faire sécher à l'air, après quoi il ne reste plus qu'à faire un choix de ceux qui étant

plus nets, plus doux, plus brillans et plus transparens, méritent d'être employés de préférence.

On sait que l'humidité alonge le cheveu, et que le dessèchement le raccourcit. Pour rendre l'un et l'autre effet plus sensible, Saussure attache un des deux bouts du cheveu à un point fixe, et l'autre à la circonférence d'un petit cylindre mobile, qui porte à l'une de ses extrémités une aiguille légère. Le cheveu est bandé par un contre-poids de 16 centigrammes, ou d'environ trois grains, suspendu à une soie déliée, qui est roulée en sens contraire autour du même cylindre. A mesure que le cheveu s'alonge ou se raccourcit, il fait tourner le cylindre dans un sens ou dans l'autre, et, par une suite nécessaire, la petite aiguille, dont les mouvemens se mesurent sur la circonférence d'un cercle gradué, autour duquel l'aiguille fait sa révolution comme dans les cadrans ordinaires. De cette manière, une variation très petite dans la longueur du cheveu, devient sensible, par le mouvement beaucoup plus considérable qu'elle occasionne dans l'extrémité de l'aiguille; et l'on conçoit aisément qu'à des degrés égaux d'alongement ou de raccourcissement dans le cheveu, répondent des arcs égaux parcourus par l'aiguille.

Pour donner à l'échelle une base qui puisse mettre en rapport tous les hygromètres construits d'après les mêmes principes, Saussure prend deux termes fixes, dont l'un est l'extrême de l'humidité, et l'autre celui de la sécheresse; il détermine le premier, en plaçant l'hygromètre sous un récipient de verre, dont il a mouillé exactement avec de l'eau, toute la surface intérieure, l'air, en se saturant de cette eau, agit par son humidité sur le cheveu, pour l'alonger. On humecte de nouveau l'intérieur du récipient, autant de fois qu'il est nécessaire; et l'on reconnaît que le terme de l'humidité extrême est arrivé, lorsque, par un séjour plus long sous le récipient, le cheveu cesse de s'étendre.

Pour obtenir le terme de l'extrême sécheresse, le même physicien se sert d'un récipient chaud et bien desséché, sous lequel il renferme l'hygromètre, avec un morceau de tôle parcellément échauffé et couvert d'alkali fixe. Ce sel, en exerçant sa faculté absorbante sur ce qui reste d'humidité dans l'air environnant, dé-

termine le cheveu à se raccourcir jusqu'à ce qu'il ait atteint le dernier terme de sa contraction.

Ce terme n'est pas éloigné de celui qui répond à un parfait dessèchement, en sorte que l'on peut regarder comme inappréciable la petite quantité d'humidité qui pourrait rester encore dans le cheveu (1); et comme d'une autre part le plus grand allongement du cheveu est déterminé par la plus grande quantité possible d'humidité dont il puisse se charger, il en résulte que les deux points fixes de l'hygromètre répondent sensiblement à deux états absolus, en quoi cet instrument diffère du thermomètre, dont les deux termes fixes consistent dans deux limites prises au milieu d'une série de termes, qui s'étend indéfiniment au-dessus et au-dessous de ces limites.

L'échelle de l'instrument est divisée en cent degrés. Le zéro indique le terme de l'extrême sécheresse, et le nombre cent celui de l'humidité extrême. L'inventeur a senti les avantages de la division décimale pour la facilité des calculs, et n'a pas balancé à l'adopter.

### Hygromètre de Deluc.

326. Les nombreux travaux de Deluc sur l'Hygrométrie, dont une grande partie a concouru avec ceux de Saussure, ont été exécutés à l'aide d'un instrument qui diffère par sa pièce essentielle de celui que nous venons de décrire; et cette diversité dans les moyens d'interroger l'expérience sur un point de Physique si délicat, a été pour les inventeurs l'occasion d'une rivalité qui a fait naître entre eux des discussions intéressantes (2). Le physicien anglais emploie pour la construction de ses hygromètres une bandelette très mince de baleine, qui fait le même office que le cheveu dans l'hygromètre de Saussure. Il maintient cette bandelette tendue au moyen d'un ressort, dont il préfère l'action à celle d'un poids; il détermine le degré d'humidité extrême, en plongeant la bandelette de baleine tout à fait dans l'eau; et pour fixer la limite opposée, qui est celle de l'extrême sécheresse, il se sert

(1) Essais sur l'Hygrométrie, numéros 47 et 149.

(2) Voyez le Journal de Physique, 1788, t. xxxii, p. 24, 98 et 132.

de chaux calcinée, qu'il renferme avec l'hygromètre sous une cloche de verre. Le choix de cette substance est fondé sur ce que la calcination l'ayant amenée au plus haut degré de sécheresse, si on la laisse ensuite refroidir, jusqu'au point de pouvoir être placée, sans inconvénient, sous la cloche de verre destinée à l'expérience, elle se trouvera encore sensiblement dans le même état de sécheresse, parce qu'elle est très lente à reprendre de l'humidité; et ainsi, toute sa faculté absorbante sera employée à dessécher peu à peu l'air renfermé sous le récipient, et à faire passer l'hygromètre lui-même à un état qui se rapprochera le plus qu'il est possible de l'extrême sécheresse.

### Des Variations de l'Hygromètre.

327. Examinons maintenant l'action de l'hygromètre sur la vapeur renfermée dans l'air, en choisissant l'hygromètre à cheveu, pour y appliquer la théorie. Nous avons vu (290) qu'une masse d'air déterminée, en contact avec de l'eau liquide, contient toute la quantité de vapeur qu'elle est susceptible d'admettre, à une température donnée, lorsque la force élastique du calorique interposé entre les molécules de la vapeur, moins l'affinité mutuelle de ces molécules, est en équilibre avec la force du calorique renfermé dans l'eau, moins l'affinité de cette eau pour elle-même. Or l'eau dont l'hygromètre est imbibé diffère de celle qui serait isolée au milieu de l'air, en ce qu'elle est soumise à l'action d'une troisième force, savoir, l'affinité que le cheveu exerce sur elle, et il est visible que cette force agit dans le même sens que l'affinité réciproque des molécules de l'eau, en sorte qu'elle tend à diminuer l'effet de la force élastique du calorique interposé dans la même eau. De plus, elle augmente à mesure que l'hygromètre perd de son eau, et elle diminue, à mesure qu'il s'imbibe d'une nouvelle quantité de ce liquide, de manière qu'il y a un terme où l'hygromètre étant saturé, elle est censée devenir nulle.

328. Nous devons observer encore, pour l'intelligence des phénomènes, que l'on suppose la masse du cheveu assez petite pour qu'on puisse négliger la légère quantité d'eau qu'il enlève ou qu'il

cède à l'air environnant, quoique ce soit cette eau qui détermine les variations et, par une suite nécessaire, les indications de l'instrument. Nous avons déjà fait une remarque semblable, à l'égard du thermomètre (142).

329. Cela posé, concevons que l'on place au milieu d'une masse d'air saturée de vapeur, un hygromètre qui marque le degré de l'humidité extrême. Il n'arrivera rien de nouveau; car l'affinité de l'hygromètre pour l'eau étant satisfaite à ce terme, son action est nulle, en sorte que l'eau dont le cheveu est humecté, étant dans le même cas que celle qui est supposée avoir fourni à l'air la vapeur qui a fait monter ce fluide à son point de saturation, l'équilibre qui existait, relativement à cette dernière eau, aura lieu également pour l'autre.

330. Imaginons au contraire que l'hygromètre, en arrivant au milieu de l'air saturé, soit au-dessous du terme de l'humidité extrême. Alors l'affinité du cheveu pour l'eau n'étant pas satisfaite, attirera dans le cheveu une partie de la vapeur que renferme l'air, jusqu'à ce qu'elle ait épuisé son action. A ce moment l'équilibre du système sera le même que dans l'exemple précédent (329), c'est-à-dire que l'indication de l'hygromètre se trouvera d'accord avec l'état actuel de l'air.

331. Les choses étant dans cette position, concevons que la quantité de vapeur diminue dans l'air, et que la température reste la même, d'où il résulte que l'air sera au-dessous de son point de saturation. L'eau dont le cheveu est imbibé étant d'abord dans le même cas qu'une masse de ce liquide, isolée au milieu de l'air, la force élastique du calorique qu'elle renferme en convertira une partie en vapeur. En même temps l'affinité du cheveu pour l'eau reparaitra, et commencera à exercer sa force pour retenir les molécules aqueuses qui tendent à s'échapper. Il s'établira donc un nouveau point d'équilibre, au terme où la force élastique du calorique renfermé dans l'eau de l'hygromètre, moins les deux affinités qui sollicitent cette eau (327), sera en équilibre avec la force élastique du calorique interposé dans la vapeur, moins l'affinité de cette vapeur pour elle-même. Alors l'hygromètre étant descendu au-dessous du terme de l'humidité

extrême , fera connaître que le degré de l'air est inférieur lui-même à celui de la saturation.

332. Le même effet aura lieu , si l'on suppose que l'air ayant subi une élévation de température , sans que la quantité de vapeur dont il était chargé soit augmentée , on place au milieu de cet air un hygromètre qui marque le terme de l'humidité extrême. Dans ce cas , le cheveu cédera encore à l'air une partie de l'eau dont il est imbibé ; jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre les forces auxquelles cette même eau et la vapeur environnante sont soumises.

### Des différentes causes qui compliquent la marche de l'Hygromètre.

Ce que nous venons de dire suffit pour les circonstances ordinaires , où celui qui consulte l'hygromètre ne se propose que de connaître , par son moyen , si l'air est voisin du point de saturation , ou s'il en est éloigné , c'est-à-dire s'il a une disposition prochaine à se dessaisir des vapeurs renfermées dans son sein , ou s'il est susceptible d'en recevoir de nouvelles par la température actuelle. Mais cette connaissance ne suffit pas au physicien qui désire être en état de comparer les variations de l'hygromètre avec les différentes quantités de vapeurs dont l'air est chargé. Ceci exige certaines considérations relatives aux diverses causes qui se combinent pour influer sur la marche de l'instrument.

333. Lorsque l'air au milieu duquel est situé l'hygromètre subit une élévation de température , sans recevoir de nouvelles vapeurs , le calorique devenu plus abondant détermine , comme nous l'avons vu (332) , l'évaporation d'une partie de l'eau dont le cheveu est imbibé , ce qui tend à raccourcir celui-ci ; mais d'un autre côté , l'action du calorique allonge le cheveu , en le pénétrant , et l'on a ainsi deux effets opposés , l'un hygrométrique l'autre pyrométrique. Ces mêmes effets ont lieu en sens contraire si la chaleur diminue. Le cheveu , dans ce cas , se charge d'une portion surabondante d'humidité qu'il enlève à l'air , ce qui le détermine à s'allonger , et en même temps le refroidissement agit

pour le raccourcir. De ces deux effets, celui que nous nommons *hygrométrique* est beaucoup plus sensible que l'autre, et sa prédominance augmente, à mesure que l'humidité devient plus considérable. Il suit de là que tout compensé, l'élévation de température, dans un espace où la quantité de vapeur est supposée constante, fait toujours marcher l'hygromètre vers le point de l'extrême sécheresse, et que l'abaissement de température lui imprime toujours un mouvement contraire vers le point de l'humidité extrême. Ces variations sont seulement un peu moins sensibles que dans l'hypothèse où l'action pyrométrique serait nulle.

334. Supposons qu'un hygromètre, situé d'abord dans une plaine, marque  $50^d$  d'humidité, par une température qui soit, par exemple, de  $15^d$  au-dessus de zéro, sur le thermomètre dit de Réaumur, et qu'ensuite le même instrument porté sur une montagne, marque  $56^d$ , tandis que le thermomètre n'est plus qu'à  $8^d$ . Le physicien qui désirerait savoir si l'air de la montagne serait plus humide ou plus sec que celui de la plaine, se trouverait embarrassé, à moins qu'il n'eût les données nécessaires pour résoudre ce problème. Car, en supposant que l'air renfermât de part et d'autre la même quantité de vapeurs, le seul abaissement de température aurait suffi pour faire avancer le cheveu vers l'humidité extrême, par l'excès de l'effet hygrométrique sur l'effet pyrométrique (333). Seulement il aurait fait plus de chemin dans le même sens, si l'air de la montagne était plus humide que celui de la plaine. Mais il serait possible qu'il eût encore suivi la même marche, quoique d'une manière moins sensible, si l'air de la montagne étant plus sec que celui de la plaine, l'effet de cette différence pour raccourcir le cheveu avait été plus petit que celui de l'abaissement de température pour l'allonger.

La question se réduit donc à savoir de combien de degrés cet abaissement de température aurait fait monter l'hygromètre vers l'humidité, en supposant qu'il y eût partout uniformité dans la quantité de vapeurs. Si le nombre de degrés dont il s'agit était égal à la différence 6 entre les deux indications de l'instrument, on en conclurait que l'air de la montagne est aussi chargé de

vapeurs que celui de la plaine ; s'il était plus petit ou plus grand que 6, on aurait la preuve que l'air de la montagne est plus humide ou plus sec que celui de la plaine.

335. Pour mettre les physiciens à portée de résoudre ce problème, Saussure a construit une table de correction, qui fait connaître de combien le cheveu, parvenu à tel degré de son échelle, s'allonge ou se raccourcit, par l'excès de l'effet hygrométrique sur l'effet pyrométrique, lorsque la température s'abaisse ou s'élève d'un degré (1). On voit, en examinant cette table, que les variations de l'hygromètre suivent une marche assez régulière depuis le 25<sup>e</sup> degré de l'échelle de cet instrument jusqu'au 72<sup>e</sup> ; dans cet intervalle, elles croissent ou décroissent, à très peu près, en progression arithmétique, de manière que la différence entre deux termes consécutifs est égale à environ la trentième partie d'un degré. D'après cette observation, pour avoir la solution du problème proposé, nous n'avons besoin que de connaître le nombre qui représente la variation de l'hygromètre pour un degré du thermomètre, lorsque l'instrument est au 50<sup>e</sup> degré de son échelle. Ce nombre étant 1,283 ou plus simplement 1,3, nous le considérons comme le premier terme d'une progression arithmétique, dans laquelle la différence est  $\frac{1}{50}$  ou 0,033, et le nombre des termes est 7 comme l'indique l'abaissement de température. En faisant usage de ces données, on trouve pour la somme des termes  $9^d,8$ , lesquels ajoutés à  $50^d$  font  $59^d,8$ . Tel serait donc le point que marquerait l'hygromètre sur la montagne, dans l'hypothèse où l'air qu'on y respire renfermerait la même quantité de vapeurs que celui de la plaine. Mais l'hygromètre ne marquait sur la montagne que  $56^d$ , d'où l'on conclura que l'air y était plus sec que dans la plaine.

336. Un autre problème dont la solution complète doit être regardée comme l'objet final de l'hygrométrie, est celui qui consiste à trouver le rapport entre les degrés de l'hygromètre, ceux du thermomètre, et les quantités de vapeurs contenues dans une portion déterminée de la masse d'air environnante. Saussure a

---

(1) Essais sur l'Hygrométrie, nos 86 et suiv.

ébauché le travail relatif à cette détermination : Deluc a été conduit beaucoup plus loin par ses nombreuses expériences dans lesquelles il a porté une sagacité et une constance égales à leur délicatesse. Mais l'hygromètre employé par ce célèbre physicien était celui dont la pièce principale est, comme nous l'avons dit, une bandelette de baleine, et il est au moins douteux que la marche de cet instrument s'accorde avec celle de l'hygromètre à cheveu, auquel les physiciens paraissent avoir donné la préférence.

L'hygromètre a été long-temps négligé dans les observations météorologiques; on juge aisément, d'après tout ce qui précède, combien il est nécessaire de l'associer au thermomètre et au baromètre, pour être en état de débrouiller la complication des différentes causes qui influent sur les variations de l'atmosphère; et ce ne sera qu'à l'aide d'une longue suite d'observations, faites par le concours de ces divers instrumens, jointes à toutes les indications qui se tirent de l'état du ciel, que nous obtiendrons des données pour présager, avec une grande vraisemblance, les changemens de temps, et parvenir à une théorie plausible sur cet objet si intéressant, et naturellement fait pour piquer notre curiosité. Nous sommes dans une dépendance continuelle de l'atmosphère et de l'alternative des jours sereins et pluvieux, pour les travaux de l'agriculture, pour nos voyages, pour nos diverses entreprises, et même pour nos fêtes. Nous trouverions à la fois l'utile et l'agréable dans un genre de connaissances qui nous mettrait à portée de nous précautionner contre ce qui fait nos craintes, et d'aller au-devant de ce qui fait nos espérances.

### *Des Tubes capillaires.*

337. Toutes les eaux tranquilles ont leur surface de niveau, lorsque leurs molécules ne sont sollicitées que par les actions de la pesanteur, dont les directions sont toujours perpendiculaires à cette même surface. Mais il suffit de plonger un corps dans le liquide, pour que ce niveau soit altéré. Si le corps est, par exemple, une lame de verre, la partie adjacente du liquide s'infléchit en se relevant vers chaque face, de manière que tous ses

points de contact avec elle forment une ligne horizontale située au-dessus du niveau. Dans la figure 25, *abeg* représente une coupe de la lame de verre, faite par un plan vertical, perpendiculairement aux grandes faces de cette lame; *Mc'cN* le niveau de l'eau, et *hf*, *h'f'* les deux courbures de ce liquide.

338. Si l'on substitue un tube à la lame de verre, l'eau s'élèvera de même au dedans et au dehors, en formant deux petites concavités dont les bords supérieurs coïncideront avec deux anneaux du tube situés au-dessus de celui qui répond au niveau. Mais nous ne nous occuperons guère dans la suite que de la concavité qui est produite à l'intérieur.

Tant que le tube aura un diamètre d'une certaine étendue, la concavité ne sera sensible qu'auprès de ses parois, en sorte que l'eau paraîtra encore de niveau dans toute la partie moyenne de la surface circonscrite par le tube. A mesure que l'on choisira des tubes plus étroits, la concavité s'infléchira davantage; il y aura un terme où le point qui répond à l'axe du tube commencera à dépasser visiblement le niveau; et enfin, si l'intérieur du tube représente un cylindre très délié, le liquide, au moment de l'immersion, s'y élancera, et y demeurera suspendu à une hauteur considérable. Cette expérience qui place le phénomène dans une des circonstances où il est le plus frappant, a fait naître la dénomination qu'on lui a donnée de *Phénomène des tubes capillaires*, quoiqu'il soit soumis, comme les autres, à la loi de continuité, et marche par un progrès de nuances imperceptibles.

339. Les mêmes effets ont lieu, proportion gardée, par rapport à tous les autres liquides susceptibles de mouiller le verre, ce qui n'est pourtant pas aussi généralement vrai qu'on l'avait cru d'abord, comme nous l'expliquerons dans la suite. Mais si l'on emploie le mercure, les changemens de figure et de position que subira la surface de ce métal liquide se feront en sens opposé. Dans l'expérience d'une simple lame de verre, la partie adjacente du mercure s'infléchira de part et d'autre, de manière que les extrémités de chaque courbure *fh* ou *f'h'* (fig. 26) seront sur une ligne horizontale abaissée au-dessous du niveau. En employant un

tube, surtout s'il est étroit, on verra la surface du métal liquide prendra l'intérieur une figure convexe dont les bords adhéreront à un anneau du tube inférieur au niveau; mais cet effet suppose que l'on prenne le tube tel qu'il se présente; car nous verrons dans la suite, qu'au moyen de certaines précautions on peut obtenir de même l'élévation du mercure au-dessus du niveau.

340. La loi du phénomène, telle que la donne l'expérience, consiste en ce qu'un même liquide s'élève dans différents tubes homogènes, à des hauteurs qui sont à très peu près en raison inverse des diamètres de ces tubes (1); et s'il s'agit du mercure, son abaissement au-dessous du niveau est soumis au même rapport.

341. L'observation fait voir encore que les hauteurs auxquelles différents liquides s'élèvent dans un même tube, n'ont pas lieu en raison de la légèreté spécifique de ces liquides; par exemple, l'alcool et les huiles s'y élèvent moins que l'eau.

342. Enfin, si l'on enduit l'intérieur du tube d'une couche mince de matière grasse, telle que le suif, le liquide dans lequel on plonge ce tube s'abaisse d'abord au-dessous du niveau, en formant une légère convexité à sa surface supérieure. Mais peu à peu il monte dans le tube, arrive au niveau, puis s'élève au-dessus, quoique d'une moindre quantité que si l'intérieur du tube était net; et alors sa surface supérieure est concave.

### Diverses causes dont on a fait dépendre les effets des Tubes capillaires.

343. L'explication des phénomènes que nous venons de décrire a fort exercé la sagacité des physiciens. Les uns ont essayé d'en

(1) Pour que ces expériences, qui sont délicates, donnent des résultats comparables, il faut d'abord plonger le tube entièrement dans le liquide, et après l'avoir retiré, le secouer à plusieurs reprises, ou le frapper avec un autre corps, jusqu'à ce que ses parois ne soient plus que légèrement humectées. La nécessité de ces précautions avait été sentie par Hauksbée, et c'est parce que plusieurs physiciens les ont négligées, que l'on trouve tant de diversités dans les hauteurs auxquelles ils disent avoir vu l'eau, et d'autres liquides, s'élever dans des tubes d'un diamètre donné.

rendre raison, en supposant que l'air ne pouvant s'introduire dans le tube que difficilement et en petite quantité, y exerçait sur la colonne intérieure, une pression moins forte que celle de l'air environnant sur le liquide extérieur; et si on leur objectait que les mêmes effets ont lieu dans le vide, ils répondaient que, comme on ne pouvait jamais faire un vide parfait, l'air qui restait sous le récipient dans toutes les parties extérieures au tube, conservant le même rapport avec l'air intérieur, l'inégalité de pression et la différence de niveau qui en était la suite, devaient encore subsister: d'autres avaient recours à un fluide subtil, pour expliquer le phénomène, et les opinions se partageaient de nouveau sur la manière d'agir de ce fluide. Suivant les uns, ses parties étaient d'une forme globuleuse qui ne leur permettait pas de s'arranger exactement dans un tube d'un petit diamètre, pour exercer, sur la colonne qui occupait ce tube, une pression égale à celle que les colonnes extérieures éprouvaient de la part du même fluide; selon d'autres, la matière subtile formait de petits tourbillons, dont les molécules ayant un mouvement circulaire dans des plans qui passaient par l'axe du tube, et venant à rencontrer l'orifice inférieur, poussaient de bas en haut la colonne renfermée dans ce tube.

Une seule considération suffisait pour renverser toutes ces hypothèses; c'est que les hauteurs auxquelles s'élèvent différentes liqueurs dans un même tube, ne sont pas en rapport avec la légèreté spécifique de ces liqueurs, ce qui aurait pourtant lieu dans ces mêmes hypothèses, puisque le fluide subtil qui produirait les phénomènes de quelque manière qu'il agit, devrait favoriser davantage l'élevation des liquides moins denses, qui seraient par là moins susceptibles de s'opposer à son action.

Ainsi, les physiciens s'agitaient inutilement pour trouver, dans des agens extérieurs et invisibles, la véritable cause du phénomène; tandis que cette cause existait dans le tube même qu'ils avaient entre les mains, et dépendait de cette espèce d'attraction que l'on a désignée par le nom d'*attraction dans les petites distances*.

344. Newton, après avoir trouvé, dans la gravitation uni-

verseille, le principe des mouvemens célestes et des phénomènes où la nature agit en grand sur des masses, quelquefois séparées par d'immenses intervalles (39), avait observé aussi les effets d'une certaine attraction qui n'agissait que près du contact, et de molécule à molécule. Les chimistes, qui avaient continuellement sous les yeux des exemples de l'action de cette force, dans la composition et la décomposition des corps, l'adoptèrent sous le nom d'*affinité*. Les physiciens ont été plus tardifs à la reconnaître dans d'autres effets, où les substances qu'elle sollicite, conservent leur état naturel, comme cela a lieu par rapport au phénomène des tubes capillaires. Ils aimaient mieux attribuer ces effets à la pression de quelque effluve, ou de quelque tourbillon de matière subtile, qui s'offrait sous l'apparence spécieuse d'une cause mécanique, mais que les phénomènes démentaient toujours par quelque endroit, quoiqu'on fût le maître de l'y adapter d'avance, en la modifiant à volonté. C'était comme le dernier refuge des tourbillons qui, après avoir été bannis des espaces célestes, cherchaient à se maintenir dans les recoins de la nature où l'attraction, reproduite sous une autre forme, leur disputait encore la place. On comparait cette attraction à la première; et comme elle semblait en différer par sa manière d'agir, à raison des distances, et que d'ailleurs elle se modifie suivant la diversité des circonstances où elle agit, on accusait les physiciens qui l'adoptaient, de la multiplier arbitrairement, et d'imaginer autant d'attractions particulières qu'il se présentait de nouveaux faits à expliquer. Mais un examen attentif suffisait pour faire reconnaître qu'en supposant même que cette attraction soit distinguée de la gravitation universelle, elle n'en est pas moins une force unique dans son genre, qui s'étend à une classe nombreuse de phénomènes, et dont les diversités dépendent de celles qui existent entre les corps mêmes sur lesquels son action s'exerce. Newton remarquait que cette force une fois admise, la nature entière devenait simple et partout d'accord avec elle-même; tandis que l'Astronomie physique d'une part, et la Physique ordinaire de l'autre, avaient chacune leur attraction, et partageaient entre ces deux forces l'explication des mouvemens qui, de loin,

frappent nos regards, et de ceux qui demandent à être suivis de près. Mais peut-être même n'est-ce pas en dire assez, puisqu'à l'aide d'une hypothèse plausible dont nous avons parlé plus haut (86), on parviendrait à simplifier encore le tableau, en ramenant les deux attractions à l'unité.

345. La plupart des physiciens modernes s'accordent à regarder l'attraction dans les petites distances comme la véritable cause des phénomènes que présentent les tubes capillaires. Mais ils diffèrent entre eux dans leur manière de concevoir le mécanisme à l'aide duquel cette cause élève l'eau au-dessus de son niveau. Suivant Hauksbée, aussitôt qu'un tube capillaire entre dans l'eau par une de ses extrémités, l'anneau de verre, situé au même endroit, agissant par des forces perpendiculaires sur la petite lame de liquide que l'immersion a mise en contact avec son intérieur, la rend spécifiquement plus légère; la pression de cette lame sur les parties situées au-dessous d'elle se trouvant ainsi diminuée, celle du liquide environnant, qui est devenue prépondérante, pousse la lame d'eau dans l'intérieur de l'anneau suivant, et fait entrer une nouvelle lame à sa place dans l'intérieur de l'anneau terminal. Les deux anneaux exerçant alors des actions semblables à la première, sur la portion de liquide qui les baigne, la pression de l'eau environnante fait monter une nouvelle couche d'eau dans le tube, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la colonne de liquide soit parvenue à une telle hauteur, que son poids, diminué par l'attraction, fasse équilibre à la pression du liquide environnant (1).

Jurin, qui a fait une suite d'expériences intéressantes sur les effets des tubes capillaires, attribue au contraire l'élévation de l'eau à l'attraction de l'anneau situé immédiatement au-dessus de la colonne que forme ce liquide. Dans cette hypothèse, la force qui fait monter l'eau, et celle qui la tient ensuite suspendue à sa plus grande hauteur, s'exercent constamment de bas en haut, dans des directions à peu près parallèles à l'axe du tube, ce qui

---

(1) Expériences physico-mécaniques sur différens sujets. Paris, 1754, t. II, p. 142 et suiv.

s'écarte moins de la vérité que le mécanisme imaginé par Hauksbée, pour expliquer le même phénomène (1).

Veitbrecht a publié sur le même sujet un travail fort étendu, dans lequel il procède méthodiquement, par une suite de propositions, dont l'enchaînement donne une apparence spécieuse à sa théorie (2). Il se rapproche de l'opinion de Jurin, sur la partie du tube dans laquelle réside l'action principale, et il établit une distinction, dont on sentira dans la suite la justesse, entre la couche d'eau qui baigne le tube, jusqu'à la distance à laquelle s'étend l'attraction du verre, et le cylindre formé par la partie du liquide que cette couche enveloppe. Selon lui, cette même couche est soutenue par l'anneau de verre situé au-dessus d'elle tandis qu'elle soutient, à son tour, à l'aide de la cohérence, les molécules qui composent le cylindre intérieur.

346. Les auteurs de ces hypothèses ont cru pouvoir démontrer rigoureusement le rapport inverse entre les élévations ou les abaissemens d'un même liquide, et les diamètres des tubes que l'on y plongeait, en supposant ces tubes homogènes. Par exemple, dans l'hypothèse de Jurin, lorsque le liquide s'élevait au-dessus du niveau, dans deux tubes différens, les attractions étaient entre elles comme les circonférences de ces tubes, ou ce qui revient au même, comme leurs diamètres; mais elles étaient en même temps comme les poids des cylindres de liquide suspendus dans les tubes, c'est-à-dire comme les carrés des diamètres multipliés par les hauteurs, ce qui donne le rapport inverse entre le diamètre et la hauteur (3).

Le grand défaut de ces hypothèses et de plusieurs autres que nous omettons, provenait des abstractions que leurs auteurs se permettaient, en sorte qu'un fait réellement compliqué d'une multitude d'actions différentes et inégales, devenait d'une sim-

(1) Voyez les Leçons de Physique expériment., par Côtés, p. 410 et suiv.

(2) Mémoires de l'Académie de Pétersbourg, t. ix.

(3) Soient  $D, d$ , les diamètres, et  $H, h$  les hauteurs; on aura par la supposition,  $D : d :: D^2 \times H : d^2 \times h$ ; d'où l'on tire  $H : h :: d : D$ .

PLICITÉ ILLUSOIRE, par la manière vague dont ils le considéraient. Il semblait que le principe eût été arrangé, pour arriver aux conséquences indiquées par l'observation des phénomènes.

347. Clairaut est le premier qui ait entrepris de soumettre ces phénomènes à une analyse vraiment rigoureuse. Il envisagea, dans leur ensemble, les diverses forces qui concourent à les produire, telles que la pesanteur, l'attraction des molécules du tube sur les molécules du liquide, et les attractions mutuelles de ces dernières; et, de plus, il eut égard à une circonstance essentielle, négligée par les autres physiciens, savoir, la figure concave ou convexe que prend la surface supérieure du liquide renfermé dans le tube (1). Mais sa théorie, conçue d'ailleurs avec beaucoup de sagacité, ne résout la question que d'une manière incomplète. Il se contente de faire voir qu'il y a une infinité de lois d'attraction admissibles, parmi lesquelles on pourra toujours en choisir une qui donne le rapport inverse entre le diamètre du tube et l'élévation du liquide au-dessus du niveau. Ainsi il prouve bien que sa formule renferme le mot de l'énigme, mais sans pouvoir le donner. L'imperfection de sa méthode tient à ce qu'il supposait que l'attraction du tube capillaire s'étendait à des distances sensibles, ce qui l'a conduit à faire entrer dans sa théorie des termes qui s'évanouissent, et dont il eût fallu la débarrasser.

### Théorie de Laplace.

348. Le travail de Clairaut qui, malgré ce qu'il laisse à désirer, efface tout ce qu'on avait fait jusqu'alors en ce genre, disparaît à son tour devant celui de Laplace. Ce savant illustre, en considérant l'action du tube capillaire comme sensible seulement à des distances imperceptibles, a d'abord restreint le problème à ses véritables données, et les géomètres en état de suivre ses calculs, reconnaîtront doublement l'auteur de la *Mécanique céleste*, dans une solution où il s'est servi des mêmes formules qu'il avait

---

(1) Théorie de la figure de la Terre, p. 105 et suiv.

créées pour expliquer les plus grands phénomènes de la nature (1). Dans l'exposition raisonnée que nous allons donner des résultats auxquels il est parvenu, nous suivrons la marche qu'il a bien voulu lui-même nous tracer.

*Action d'une masse de Liquide sur une colonne  
située à l'intérieur.*

349. Nous supposons d'abord que la masse de liquide dont nous avons à considérer l'action ait une base plane, parce que cette action entre comme élément dans la détermination de celle qu'exerce un liquide convexe ou concave.

Représentons par *abcd* (fig. 27) la masse dont il s'agit, et examinons l'effet de son attraction, à des distances imperceptibles, sur une colonne infiniment déliée *or* renfermée dans son intérieur, et perpendiculaire à la base *ab*. Ayant pris dans la partie supérieure *oz* de cette colonne une molécule *m*, située à une distance de *ab* moindre que le rayon de la sphère d'attraction sensible du liquide, si nous menons, en dessous de la molécule, un plan *lk*, dont elle soit autant éloignée que du plan *ab*, il est visible qu'elle sera également attirée vers le haut et vers le bas, par la petite masse de liquide qu'interceptent les deux plans *ab*, *lk*, puisqu'il y a égalité entre les quantités de liquide situées de part et d'autre. Mais le liquide inférieur au plan *lk*, et dont l'action n'est balancée par aucune autre, attirera la molécule *m* vers le bas, et cet effet aura lieu jusqu'à une distance égale au rayon de la sphère d'attraction sensible du liquide. Le même raisonnement s'applique à toute autre molécule éloignée de *ab* d'une quantité plus petite que la distance dont nous venons de parler. Or, comme la partie *oz* de la colonne agit à son tour sur les parties inférieures, en les poussant vers le bas, nous pouvons considérer l'effet de l'attraction comme une pression que la colonne exercerait sur une base située dans l'intérieur de la même colonne,

---

(1) Théorie de l'Action capillaire, ou Supplément au dixième Livre du Traité de Mécanique céleste. Paris, 1806.

perpendiculairement à ses côtés, et à une distance sensible de la surface  $ab$ .

350. Il ne sera pas inutile de considérer aussi l'action de la masse  $abcd$  sur une colonne infiniment déliée  $or'$  renfermée dans un canal situé au-dessus du plan  $ab$ , de manière que son axe coïncide avec le prolongement de celui de la colonne  $ro$ . Choisissons, dans la première, une molécule  $m'$  dont la distance au plan  $ab$  soit la même que celle de la molécule  $m$  en sens contraire. La masse  $abcd$  agira sur la molécule  $m'$ , d'où nous concluons que la molécule  $m'$  est aussi tirée vers le bas. On pourra étendre la même comparaison à toute autre molécule située dans la colonne  $or'$ , à une distance convenable de  $ab$ , en supposant une nouvelle molécule placée à la même distance dans la colonne  $or$ , et en transportant, par la pensée, le plan  $lk$ , de manière que la nouvelle molécule en soit autant éloignée que du plan  $ab$ , d'où l'on conclura que l'action de la masse plane  $abcd$  sur la colonne  $or'$  produit dans la partie inférieure de cette colonne une tendance à descendre, qui se communique à la colonne entière.

351. Concevons maintenant que la masse du liquide, au lieu d'être plane, soit terminée par une convexité sphérique  $qol$  (fig. 28) d'un rayon quelconque, tangente au plan  $ab$ , et voyons ce que devient la première action, par la suppression de l'espèce de ménisque  $ablq$ . Ainsi la question se réduit à déterminer l'action de ce ménisque, et à la retrancher de celle de la masse plane. Soit  $s$  une molécule prise à volonté dans l'intérieur du ménisque, à une distance du point  $o$ , moindre que le rayon de la sphère d'activité du liquide. Menons la ligne  $so$ , puis la ligne  $sh$ , de manière que le triangle  $osh$  soit isocèle. La molécule  $s$  exerce sur le point  $o$  une force oblique dont une partie agit pour tirer ce même point vers le bas. Mais la molécule  $s$  exerce sur le point  $h$  une autre force oblique dont une partie a une action égale pour tirer ce dernier point vers le haut, en sorte que cette action détruit celle qui tend à faire descendre le point  $o$ . On peut concevoir dans l'intérieur du triangle d'autres lignes menées du point  $s$  sur la base  $oh$ , à des distances égales de ses extrémités, et en appliquant le même raisonnement aux forces qui s'exercent suivant

ces lignes, on en conclura que l'action de la molécule  $s$  est nulle pour faire descendre ou monter la partie  $oh$  de la colonne  $or$ .

Mais cette molécule exerce aussi des actions obliques sur les points situés en dessous de  $h$ , jusqu'à la distance où l'attraction cesse d'être sensible, et parce que l'angle  $shr$  est obtus, ces actions réduites dans le sens vertical tendent à tirer en haut les points dont il s'agit. Ce que nous disons ici de la molécule  $s$  a également lieu pour toutes les autres molécules situées dans l'intérieur du ménisque  $aoblq$ , à des distances convenables de la colonne  $or$ , d'où il suit que l'action totale du ménisque s'exerce pour faire mouvoir cette colonne de bas en haut. Or nous avons vu (349) que l'action de la masse terminée par le plan  $ab$  sollicite au contraire cette colonne à descendre. Donc la suppression du ménisque augmente l'action de la masse pour pousser la colonne vers le bas, d'une quantité équivalente à l'action de ce ménisque en sens opposé, ou, ce qui revient au même, l'action de la masse convexe est égale à l'action de la masse plane plus à celle du ménisque.

352. Prenons au-dessus du plan  $ab$  un nouveau ménisque  $fogba$ , dont la concavité soit tournée vers le haut, et cherchons aussi l'action de ce ménisque sur la colonne  $or$ . Si du point  $o$  nous menons  $on$  parallèle et égale à  $hs$ , une molécule placée en  $n$  agira sur les molécules situées au-dessous de  $o$ , comme la molécule placée en  $s$  agit sur les molécules inférieures à  $h$ , et parce que la même comparaison a lieu entre tous les autres points semblablement situés dans l'intérieur des deux ménisques, nous en concluons que l'action totale du ménisque  $fogba$  tend aussi à faire monter la colonne  $or$ , ou ce qui revient au même, à détruire une partie de l'action produite par la masse plane. Or cet effet devient ici négatif par l'addition du ménisque. Donc l'action de la masse terminée par la surface concave  $fog$  est égale à l'action de la masse plane, moins l'action du ménisque  $fogba$ .

353. Si l'on suppose que la ligne  $ab$  qui mesure la corde de l'arc  $fog$  ou  $qol$  étant constante, la courbure de cet arc devienne plus sensible, ou forme une plus grande partie de la circonférence, le rayon de celle-ci deviendra toujours plus petit. En même temps le nombre des molécules contenues dans chacun des

deux ménisques augmentera , et , par une suite nécessaire , l'action du ménisque s'accroîtra elle-même. Or M. de Laplace démontre par l'analyse que cette action est en raison inverse du rayon de la surface sphérique (1).

354. Ces résultats ont conduit M. de Laplace à un très beau théorème dont nous allons essayer de donner une idée. Imaginons un corps terminé par une surface curviligne d'une figure quelconque, et prenons, dans l'intérieur de ce corps un canal infiniment délié perpendiculaire à la surface dans un point quelconque. Si nous supposons cette même surface coupée dans tous les sens par des plans qui lui soient perpendiculaires et qui passent par le point dont il s'agit, ces plans intercepteront diverses courbes dont chacune aura un cercle osculateur au point dont il s'agit, et parmi tous les rayons de courbure relatifs aux différens cercles, le plus grand et le plus petit seront situés dans deux plans perpendiculaires entre eux. Or l'action du corps sur le canal dont nous avons parlé est égale à la demi-somme des actions que deux sphères qui auraient pour rayons le plus grand et le plus petit des rayons de courbure, exerceraient chacune sur un canal semblable situé à l'intérieur. Dans le cas où le canal que renferme le corps répondrait au point situé comme  $o$ , et où le solide serait de révolution, autour de la perpendiculaire à ce même point, il est visible que tous les rayons de courbure étant égaux, il y aurait aussi égalité entre les deux sphères dont les actions, prises par moitié, donnent celles du corps, d'où il suit que l'action sera la même que celle d'une des deux sphères.

355. La même théorie sert à déterminer la figure de la courbe

(1) Soit  $H$  une quantité constante, et  $b$  le rayon de la surface sphérique. L'action du ménisque sera en général  $\frac{H}{b}$ , et si nous désignons par  $K$  l'action de la masse plane, celle de la masse convexe sera  $K + \frac{H}{b}$ , et celle de la masse concave sera  $K - \frac{H}{b}$ . Nous observerons que  $K$  est beaucoup plus grand que  $\frac{H}{b}$ . La manière dont  $H$  et  $K$  dépendent de la loi d'attraction est développée dans le Mémoire de M. de Laplace.

que produit la section de la surface du liquide par un plan vertical. Lorsque ce liquide est renfermé dans un vase indéfini, la courbe dont il s'agit est semblable à celle que les géomètres nomment *élastique*, parce que c'est la figure que prend une lame de ressort fixée horizontalement, par une de ses extrémités, à un plan vertical, et chargée, à l'extrémité opposée, d'un poids dont l'action force cette lame de s'infléchir. L'analogie entre la figure de la section dont nous venons de parler et celle de l'élastique, provient de ce que dans l'une et l'autre la force due à la courbure est réciproque au rayon du cercle osculateur.

356. Dans les tubes étroits, la surface du liquide approche de celle d'un segment sphérique, à mesure que le diamètre de ces tubes est plus petit, et le changement de figure se fait alors d'une manière si peu sensible, que quand les tubes sont en même temps homogènes, les segments sont à très peu près semblables. C'est ce que l'on concevra, si l'on fait attention que la distance à laquelle l'action du tube cesse d'être appréciable est presque nulle : « en sorte, dit M. de Laplace, que si, par le moyen d'un » très fort microscope, on parvenait à la faire paraître égale à un » millimètre, il est vraisemblable que le même pouvoir amplifiant » donnerait au diamètre du tube une grandeur apparente de plusieurs mètres. » La surface du tube peut donc être considérée comme étant plane à très peu près dans un intervalle mesuré par cette distance. Le liquide qui répond à cet intervalle, s'élèvera donc ou s'abaissera depuis la surface à très peu près comme si elle était plane, d'où il résulte que les premiers élémens de la courbure auront sensiblement la même inclinaison dans les différens tubes.

Au-delà, le liquide n'étant plus soumis qu'à l'action de la pesanteur et à son action sur lui-même, la première n'a qu'une très légère influence pour troubler l'autre, soit parce que la différence de niveau est très peu sensible dans le petit espace qui répond au diamètre du tube, soit parce que l'action du liquide sur lui-même a d'autant plus de supériorité sur celle de la pesanteur, que le rayon de courbure de la surface est plus petit. Dans ce cas, la surface sera, à très peu près, celle d'un segment

sphérique, dont les côtés extrêmes étant les mêmes que ceux de plans situés à l'extrémité de la sphère d'attraction, sont également inclinés aux parois du tube, quel que soit son diamètre; d'où il suit que tous les segmens seront aussi à très peu près semblables entre eux. Il résulte de cette similitude, que les rayons des surfaces convexes ou concaves du liquide, dans les tubes étroits, sont sensiblement proportionnels aux diamètres de ces tubes. On verra bientôt où tend cette conséquence remarquable.

357. Si le tube est incliné à l'horizon, la surface du liquide est encore à très peu près celle d'un segment sphérique, auquel l'axe du tube est perpendiculaire, parce que l'action de la pesanteur dans les tubes très étroits, peut être négligée relativement à l'action capillaire.

### *Application de la Théorie précédente aux Phénomènes des Tubes capillaires.*

358. Soit *epcd* (fig. 29) la coupe d'un tube capillaire plongé verticalement dans l'eau, dont le niveau est indiqué par l'horizontale MN; soit *fog* la surface concave de l'eau contenue dans le tube, et *or* une colonne infiniment déliée de ce liquide, située à l'endroit de l'axe du tube. Prenons de même dans l'eau environnante une colonne verticale *hs*, infiniment déliée, et assez éloignée du tube, pour qu'il n'ait point d'influence sur elle, puis imaginons un canal horizontal *sr*, à l'aide duquel les deux colonnes soient en communication. Il s'agit de prouver que les forces qui sollicitent ces colonnes et les tiennent en équilibre l'une avec l'autre, déterminent dans la colonne *or* une élévation au-dessus du niveau, qui est en raison inverse du diamètre du tube.

Il suit de ce qui a été dit ci-dessus (352), que si la colonne *or* avait une hauteur simplement égale à celle de la colonne *hs*, sa pression sur la base *r* serait moindre que celle de la colonne *hs* sur la base *s*, la première colonne étant terminée par une surface concave, tandis que la seconde l'est par une surface plane; ainsi le liquide s'élèvera dans le tube au-dessus de son niveau, pour compenser la différence de pression, par l'augmentation de poids.

Or cette compensation dépend de l'action négative du ménisque *fgba*, laquelle est en raison inverse du rayon de courbure au point *o* (353). Mais dans les tubes étroits, les surfaces des ménisques ont à très peu près la figure d'un segment de sphère, et de plus sont semblables entre elles (356), en sorte que leurs rayons sont proportionnels aux diamètres des tubes et en même temps aux rayons de courbure. Donc l'action du ménisque suit aussi la raison inverse du diamètre du tube, et par conséquent l'élévation du liquide au-dessus du niveau est soumise au même rapport.

Il résulte d'une expérience citée par Newton (1), que dans un tube de verre dont le diamètre était de  $\frac{1}{50}$  de pouce anglais ( $0^{\text{mil.}},508$ ), l'eau s'élevait à un pouce anglais ( $25^{\text{mil.}},4$ ). Nous avons obtenu, en employant un tube dont le diamètre était de 2 millimètres, une élévation d'environ  $6^{\text{mil.}},75$  (2), résultat qui, comparé à celui de Newton, donne à peu près le rapport inverse entre les élévations du liquide et les diamètres des tubes (3); avec un autre tube dont le diamètre était de  $1^{\text{mil.}},33$ , l'élévation a été d'environ 10 millimètres. Nous avons trouvé que l'élévation de l'huile d'orange était à peu près la moitié de celle de l'eau.

359. Supposons maintenant que la surface du liquide intérieur, au lieu d'être concave, soit convexe, comme on le voit (*fig. 30*). Alors la pression de la colonne infiniment déliée *or* sur la base *r*, étant plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que celle d'une colonne *hs*, prise dans le liquide environnant, sur la base *s* (351), l'effet de la compensation qui en résulte est de raccourcir la colonne *or*. Cette compensation est due à l'action positive qui provient de la suppression d'un ménisque semblable à *aoblq* (*fig. 28*), et l'on prouvera par un raisonnement analogue à celui que nous avons fait pour le cas représenté (*fig. 29*), que

(1) Optice lucis, lib. III, quæst. 31.

(2) Nous avons fait cette expérience, ainsi que la plupart de celles dont nous parlerons dans la suite, conjointement avec M. Trémery, ingénieur des mines et professeur de Physique, et avec M. Tonelli, savant napolitain, attaché au Muséum d'Histoire naturelle.

(3) On trouve, par le calcul,  $6^{\text{mil.}},45$ , en partant du résultat de Newton.

quand les tubes sont étroits, l'action dont il s'agit suit la raison inverse de leurs diamètres, d'où l'on conclura que l'abaissement du liquide au-dessous de son niveau est soumis au même rapport.

Nous avons employé, pour les expériences de ce genre, les mêmes tubes qui nous avaient servi pour celles que nous avons faites sur l'eau. Avec le tube de deux millimètres de diamètre, le mercure s'est abaissé de  $3^{\text{mil}},66$  au-dessous de son niveau ; avec le tube de  $1^{\text{mil}},33$  de diamètre, l'abaissement a été de  $5^{\text{mil}},5$ .

### Cause de l'abaissement du Mercure au-dessous de son niveau.

360. Les résultats des expériences ordinaires faites avec le mercure dans lequel on plonge un tube capillaire, semblent, au premier coup-d'œil, déterminer une nouvelle ligne de séparation entre les propriétés de ce métal et celles des liquides aqueux. Mais diverses observations prouvent que l'abaissement du même métal au-dessous du niveau, lorsqu'il a lieu, est l'effet d'une légère couche d'humidité qui tapisse la surface intérieure du tube, et dont l'interposition affaiblit très sensiblement la vertu attractive du verre à l'égard du mercure. Casbois, professeur de Physique à Metz, est parvenu, par un procédé ingénieux, à renfermer du mercure parfaitement desséché dans un siphon de verre, dont une des branches était capillaire, et l'autre avait un diamètre d'une certaine étendue ; elles étaient scellées toutes les deux à leurs extrémités, et purgées d'air à l'intérieur. Le siphon étant situé de manière que sa convexité regardait la terre, le mercure s'élevait de 2 ou 3 lignes plus haut dans la branche étroite que dans l'autre. Un baromètre capillaire, qui avait été construit en même temps, offrait une différence égale dans l'élévation de la colonne de mercure qui occupait le tube, lorsqu'on le comparait avec un baromètre ordinaire (1).

361. Laplace et Lavoisier ayant soumis du mercure à une longue ébullition, avant de l'introduire dans le tube d'un de ces

---

(1) Dictionnaire encyclopédique, Supplement, t. IV, p. 981.

derniers baromètres, ont fait disparaître la convexité qui termine communément la colonne de ce métal liquide. Ils sont même parvenus à rendre cette colonne plane, à l'endroit de sa base. Mais ils ont toujours rétabli l'effet de la capillarité, en introduisant une goutte d'eau dans le tube. Ainsi le mercure ne prend une marche opposée à celle de l'eau, que par l'intervention d'une cause qui est étrangère et à ce métal liquide et au tube. C'est un effet analogue à celui que l'eau subit de son côté, lorsque le tube que l'on y plonge a été enduit intérieurement d'une matière grasse, qui dérobe au contact du verre les molécules aqueuses, et n'ayant par elle-même qu'une faible action sur le liquide, détermine la circonstance où sa surface devient convexe, et où, par une suite nécessaire, il se tient au-dessous du niveau.

### Cas où le Liquide est terminé par une surface cylindrique.

362. Il est facile de conclure de tout ce qui a été dit jusqu'à présent, que l'élévation de l'eau au-dessus du niveau doit avoir lieu aussi entre deux lames de verre situées parallèlement l'une à l'autre, de manière à laisser entre elles un petit intervalle, et plongées dans le liquide par leurs extrémités inférieures. La surface de ce liquide forme alors une espèce de sillon, semblable à une portion détachée d'un cylindre creux parallèlement à l'axe. La section de la surface dont il s'agit, prise dans un sens perpendiculaire aux faces des deux lames, est encore un arc de cercle, lorsque les lames sont très rapprochées, et cet arc est le même que dans un tube dont le diamètre serait égal à la distance entre les lames, parce que, comme on l'a vu (356), les côtés extrêmes de la courbure ont les mêmes positions relativement à un plan que relativement aux parois d'un tube. Concevons maintenant, à l'endroit le plus bas de la surface concave du liquide intérieur, un canal infiniment délié, qui se repliant en dessous des lames, aille aboutir à la surface du liquide environnant. Pour faciliter cette conception, on peut supposer que *pc*, *ed* (fig. 29), soient les sections des deux lames, prises perpendiculairement aux

faces de ces mêmes lames; *ors/h* représentera le canal dont il s'agit.

Or le liquide s'élève entre les deux lames, en raison de l'action du ménisque compris entre un plan horizontal *ab*, mené à l'endroit le plus bas de la surface concave *f<sub>og</sub>* du liquide et cette même surface. L'action dont il s'agit est, d'après le théorème (354), égale à la demi-somme des actions des ménisques formés semblablement par deux surfaces sphériques, dont l'une aurait pour rayon celui de la section qu'offre la figure, et l'autre celui de la section perpendiculaire à la précédente; mais parce que cette dernière section est une ligne droite, son rayon est infini, et par conséquent le ménisque qui lui correspond devient nul. Il ne reste donc plus, pour représenter l'élévation du liquide, que la moitié de l'action du ménisque formé par la première sphère, tandis que relativement à un tube dont le diamètre est égal à la distance qui sépare les deux lames, l'élévation du liquide est représentée par l'action entière du ménisque. Ainsi le liquide doit s'élever une fois moins entre les deux lames que dans le tube dont il s'agit. M. de Laplace a généralisé ce résultat, en l'étendant au cas de deux tubes cylindriques emboîtés l'un dans l'autre, de manière que leurs axes se confondent, et que l'intervalle entre la surface intérieure du plus gros et la surface extérieure du plus mince soit capillaire. L'élévation du liquide dans cet intervalle est encore la moitié de celle qui aurait lieu dans un tube, dont le diamètre serait égal à la distance entre les deux tubes dont nous venons de parler. Le cas de deux lames parallèles est renfermé dans le théorème général dont nous venons de parler; car il suffit de supposer les rayons des deux tubes infinis, pourvu que l'espace intermédiaire reste capillaire.

363. Le célèbre auteur de la théorie, après avoir découvert ce rapport remarquable, désirait qu'on le vérifiât par l'observation. Il a reconnu depuis, en parcourant l'Optique de Newton', que ce grand physicien semblait avoir prévenu son désir, dans des expériences faites avec beaucoup de soin en présence de la Société royale de Londres, et qui lui avaient présenté la même égalité entre l'intervalle qui sépare deux lames de verres parallèles

l'une à l'autre, et le demi-diamètre d'un tube dans lequel l'eau s'élevait de la même quantité (1). Ce tube, dont nous avons déjà parlé (358), avait  $\frac{3}{10}$  de pouce anglais ( $6^{millim.},508$ ) de diamètre, et l'eau s'y élevait d'un pouce ou  $25^{mill.},4$ ; or l'élévation du liquide était la même entre deux lames distantes l'une de l'autre de  $\frac{1}{10}$  de pouce anglais ou de  $6^{mill.},254$ . Dans une expérience que nous avons faite avec des lames séparées par une distance d'un millimètre, l'eau s'est élevée à  $6^{mill.},5$ , quantité qui est à peu près la même que celle qui avait mesuré l'élévation du liquide dans notre tube de deux millimètres de diamètre.

Nous avons soumis aussi à l'expérience deux tubes emboîtés l'un dans l'autre, dont les axes coïncidaient. Le diamètre intérieur du plus large était de 8 millimètres, et le diamètre extérieur du plus étroit était de  $5^{mill.},5$ , ce qui donne  $1^{mill.},25$  pour la distance entre l'un et l'autre. L'eau s'est élevée un peu au-dessus de 5 millimètres dans l'intervalle mesuré par cette distance. Deux autres tubes avaient, l'un son diamètre intérieur de 5 millimètres, l'autre son diamètre extérieur de 3 millimètres, ce qui donne un millimètre de distance. L'élévation de l'eau a été un peu moindre que 7 millimètres. Ces résultats s'accordent à peu près avec ceux qu'on obtiendrait, en employant des tubes simples, dont le demi-diamètre serait égal à la distance entre les deux tubes. Ainsi le théorème général se trouve vérifié dans les deux cas extrêmes.

Les physiciens qui avaient essayé de donner une explication des phénomènes produits par les tubes capillaires, ne s'étaient point occupés de comparer l'action qui a lieu dans un de ces tubes avec celle qui s'exerce entre deux surfaces parallèles. La manière vague dont ils concevaient ceux de ces phénomènes qui se présentent comme d'eux-mêmes à l'observation, leur interdisait, en quelque sorte, l'approche de ces résultats plus éloignés, qui ne pouvaient être accessibles que pour une théorie susceptible d'être soumise au calcul.

---

(1) Optice lucis, lib. III, quest. 31.

### De la Courbe que forme la surface supérieure de l'Eau, entre deux lames réunies sous un petit angle.

364. On peut disposer les deux lames de verre de l'expérience précédente, de manière qu'elles se touchent par un de leurs bords, et forment entre elles un angle très aigu : si on les plonge dans l'eau de manière que leur ligne de jonction soit perpendiculaire à la surface de ce liquide, on le verra s'élever subitement entre les deux lames, en formant une courbe qui tournera sa convexité vers la ligne de jonction, et qui passera par les extrémités des différentes hauteurs auxquelles doit s'élever le liquide, à proportion que l'intervalle diminue entre les deux lames de verre. Or il est facile de concevoir que cette courbe doit être une hyperbole. Soit  $aa'x'x$  (*fig. 31*) une des deux surfaces de l'eau contiguës aux parois intérieures des lames de verre,  $ax$  étant la ligne de jonction de cette même surface avec celle de l'eau, dans laquelle les lames de verre sont plongées, et  $b'x'$  la courbe formée par les points les plus élevés de l'eau renfermée entre ces lames. Nous pouvons considérer cette eau comme un assemblage d'une infinité de petits cylindres, qui auront pour hauteurs les perpendiculaires  $xx'$ ,  $tt'$ ,  $rr'$ , etc., menées sur la ligne  $ax$  jusqu'à la rencontre de la courbe. Soit  $zax$  *fig. 32* la surface inférieure de l'eau renfermée entre les lames de verre, auquel cas la ligne  $ax$  sera la même que *fig. 31*. Si nous menons  $xz$ ,  $tz$ ,  $rz$ , etc. (*fig. 32*), perpendiculaires sur  $ax$ , de manière que les distances  $xz$ ,  $tz$ ,  $rz$ , soient les mêmes que (*fig. 31*), ces perpendiculaires pourront être considérées comme les diamètres des bases des petits cylindres, dont les hauteurs sont les lignes  $xx'$ ,  $tt'$ ,  $rr'$ , etc. Or, d'après la loi à laquelle est soumis le phénomène, les hauteurs  $xx'$ ,  $tt'$ ,  $rr'$ , etc., sont en raison inverse des diamètres  $xz$ ,  $tz$ ,  $rz$ , etc., (*fig. 32*) des bases; mais ces diamètres sont entre eux comme leurs distances  $ax$ ,  $az$ ,  $ar$ , etc., au point  $a$ . Donc les lignes  $xx'$ ,  $tt'$ ,  $rr'$ , etc. (*fig. 31*) sont aussi en raison inverse des lignes  $ax$ ,  $az$ ,  $ar$ , etc.; d'où il suit que la courbe  $b'x'$  est une hyperbole, qui a pour asymptotes les

lignes  $ax$ ,  $aa'$ , de manière que les lignes  $xx'$ ,  $tt'$ ,  $rr'$ , etc., sont les ordonnées à l'asymptote  $ax$ , et les lignes  $ax$ ,  $at$ ,  $ar$ , etc., les abscisses. C'est une suite du rapport inverse dont nous avons déjà parlé. Cette expérience, comme on le voit, est intéressante, en ce qu'elle généralise son objet, et présente une expression géométrique du phénomène, tracée par le liquide même qui le produit.

### DU MOUVEMENT DES LIQUIDES DANS LES TUBES CONIQUES, OU ENTRE DEUX LAMES INCLINÉES SOUS UN PETIT ANGLE.

365. Si l'on prend un tube conique, ouvert par ses deux extrémités, et que l'ayant disposé de manière que son axe soit horizontal, on fasse couler dans son intérieur une petite colonne d'eau, ou mieux encore d'huile d'orange, on voit à l'instant celle-ci s'avancer vers le sommet du tube. Il est facile d'en concevoir la raison, d'après la théorie de M. de Laplace. Car, soit  $acdb$  (fig. 33) une section du tube, prise en passant par l'axe  $pr$  (1), et soit  $fgnm$  la petite colonne de liquide, dans une position quelconque, entre les extrémités du tube. Les deux bases de cette colonne étant concaves, le ménisque auquel appartient la concavité  $fg$ , dont la courbure est plus sensible, parce qu'elle répond à un plus petit diamètre, agit avec plus de force, pour tirer la colonne vers le sommet, que le ménisque terminé par la concavité  $mn$ , dont le rayon est plus grand, n'agit pour tirer la même colonne vers la base (353). Ainsi, la première action étant prépondérante, la colonne s'approchera de l'extrémité  $cd$ , de manière que sa vitesse s'accroîtra de plus en plus. C'est une suite de ce que le rapport entre les deux courbures devient toujours plus grand, pendant le mouvement de la colonne, soit parce qu'elle s'allonge continuellement, à mesure qu'elle approche du sommet, soit parce que la différence des deux ménisques tend toujours d'elle-même à s'accroître.

Ce sera le contraire si l'on substitue le mercure à l'eau ou à

---

(1) Le tube est ici représenté sous la forme d'un cône tronqué, dont la partie supprimée serait  $chd$ .

l'huile d'orange. Dans ce cas, les deux bases de la colonne étant convexes, et la plus grande courbure étant celle de la base supérieure, cette différence déterminera une tendance plus forte de la colonne à s'avancer vers la base du tube, qu'à se porter vers le sommet, et ce mouvement se fera avec une vitesse qui ira toujours en retardant.

358. Si, au moment où une colonne de liquide tend vers le sommet du tube, on incline peu à peu ce tube à l'horizon, de manière, par exemple, que le point  $p$  de l'axe restant fixe, le point  $r$  s'abaisse de plus en plus, le mouvement de la colonne se ralentira, parce que sa tendance à monter sera balancée par l'action contraire de la pesanteur, et il y aura un terme où les deux forces étant en équilibre, la colonne restera immobile. Or, comme d'une part la pesanteur agit davantage, lorsque l'axe du tube est plus incliné, et que d'une autre part la force qui tire la colonne vers le haut du tube est plus grande dans la proximité du sommet, on conçoit qu'en général il faut moins abaisser le tube vers l'horizon, pour obtenir l'équilibre, lorsque la colonne est plus éloignée du sommet, et l'abaisser au contraire davantage, lorsque la colonne est plus voisine du sommet. M. de Laplace a démontré par l'analyse, que quand la longueur de la colonne est très petite, relativement à la distance du milieu  $o$  de cette colonne au sommet  $h$  du tube, et que cependant elle est considérable, relativement au diamètre qui répond à ce même milieu, le sinus de l'angle que fait l'axe du tube avec l'horizon, dans le cas de l'équilibre, est à très peu près en raison inverse du carré de la distance du milieu de la colonne au sommet (1).

---

(1) Ayant mené les lignes  $ky$ ,  $uz$ , tangentes aux arcs  $fg$ ,  $mn$ , et la ligne  $st$  parallèle aux précédentes, par le milieu de  $tx$ , désignons  $ho$  par  $x$ ,  $ol$  ou  $ox$  par  $a$ , et représentons par  $\frac{b}{f}$  le rapport constant entre l'axe du tube et son demi-diamètre. Nous aurons  $ty : hl = x - a :: f : b$ , ce qui donne  $ty = \frac{b}{f}(x - a)$ . Or l'action du ménisque  $fhvq$ , pour élever une colonne infiniment déliée dont l'axe se confond avec la ligne  $tx$ , étant en raison inverse du demi-diamètre du tube, à l'endroit du point  $L$ , nous pouvons la représenter par  $\frac{H}{ty}$ .

367. Le même phénomène a lieu, proportion gardée, lorsque l'on emploie deux lames de verre réunies par un de leurs bords, et qui forment entre elles un petit angle. Dans ce cas, on dispose les lames, de manière que leur bord de jonction soit horizontal, puis on introduit entre elles une goutte de liquide. Si l'on conçoit dans l'intervalle qui les sépare, une ligne qui, étant perpendiculaire sur le bord de jonction, divise par moitié l'angle d'inclinaison des lames, cette ligne est l'axe qui représente celui du cône. Newton, en citant des expériences de ce genre faites par

ou  $\frac{Hb}{f(x-a)}$ . On trouvera, par un calcul semblable, que l'action du ménisque *muzn*, pour tirer en bas la même colonne, est  $\frac{Hb}{f(x+a)}$ . Soit  $g$  la pesanteur et  $\theta$  l'angle qui mesure l'inclinaison de l'axe du tube. Si l'on ajoute à l'action qui tire la colonne en bas le poids relatif  $2ga \cdot \sin \theta$  de cette colonne, on aura pour la force avec laquelle elle tend à descendre,  $\frac{Hb}{f(x+a)} + 2ga \cdot \sin \theta$ , ce qui donne l'équation  $\frac{Hb}{f(x-a)} = \frac{Hb}{f(x+a)} + 2ga \cdot \sin \theta$ , d'où l'on tire,  $2ga \cdot \sin \theta = \frac{Hb}{f} \left( \frac{1}{x-a} - \frac{1}{x+a} \right)$ . Si l'on développe les deux fractions en séries, et que l'on supprime les dénominateurs qui passent le second degré, l'équation devient  $2ga \cdot \sin \theta = \frac{Hb \cdot 2a}{f \cdot x^2}$ . Donc,  $\sin \theta = \frac{Hb}{gf x^2}$ . Donc  $H, b, g, f$  étant des quantités constantes, le sinus de l'angle d'inclinaison est en raison inverse du carré de la distance  $x$  entre le milieu de la colonne et le sommet du cône.

Cherchons maintenant la valeur absolue du sinus. Dans un tube dont le demi-diamètre serait  $\frac{1}{2}b$  ou  $\frac{f}{2}(x-a)$ , l'action du ménisque aurait pour expression  $\frac{Hb}{f(x-a)}$ ; donc dans un tube dont le demi-diamètre serait  $ot$ , l'action du ménisque devient  $\frac{Hb}{fx}$ . Soit  $l$  la hauteur à laquelle le liquide s'élèverait dans ce tube; on aura  $\frac{Hb}{fx} = gl$ . Si l'on substitue la seconde valeur dans l'équation  $\sin \theta = \frac{Hb}{gf x^2}$ , celle-ci devient  $\sin \theta = \frac{l}{x}$ , et ainsi ce sinus est à très peu près égal à une fraction qui aurait pour dénominateur la distance du milieu de la colonne au sommet du cône, et pour numérateur la hauteur à laquelle le liquide s'élèverait dans un tube cylindrique dont le diamètre serait celui du cône au milieu de la colonne.

Hauksbée, remarque qu'elles avaient donné le rapport inverse dont nous venons de parler, et qui a lieu ici entre le sinus de l'angle d'élevation, et le carré de la distance du milieu de la goutte à la ligne de jonction des deux lames. Ce grand géomètre essaie d'expliquer le même rapport, par l'attraction du verre sur le liquide. Mais il faut convenir que son raisonnement ne répond pas à la justesse du résultat qui en est l'objet (1):

### Des Effets de la Capillarité sur les parois des corps qui renferment le Liquide.

Nous avons supposé jusqu'ici que les tubes ou les lames dont l'action déterminait le liquide à s'élever au-dessus du niveau, ou à s'abaisser au-dessous, avaient leurs parois fixes et immobiles,

---

(1) Optice Lucis, lib. III, quæst. 31. Dans le cas dont il s'agit, le sinus de l'angle d'inclinaison est égal à une fraction qui aurait pour dénominateur la distance du milieu de la goutte à la ligne de jonction, et pour numérateur la hauteur à laquelle le liquide s'éleverait entre deux lames parallèles dont la distance respective serait la même que celle des lames inclinées, prise au milieu de la goutte.

Hauksbée a fait diverses expériences de ce genre; en employant l'huile d'orange, dont le mouvement est plus libre que celui de l'eau. Les résultats qu'il a obtenus s'accordent assez bien en général avec le rapport que nous venons d'indiquer; et celui qui offre comme le moyen terme entre tous les autres, parce que le milieu de la goutte répondait à celui de l'axe, est d'une justesse remarquable. La distance entre les deux lames, à leurs extrémités, était de  $\frac{1}{8}$  de pouce anglais, et la longueur de chaque lame était de 20 pouces. Au moment de l'équilibre, la ligne qui représentait l'axe se trouvait inclinée de 55° à l'horizon, et la distance entre le milieu de la goutte et la ligne de jonction des deux lames était de 10 pouces; d'où il suit que les lames étaient éloignées entre elles de  $\frac{1}{2}$  de pouce, à l'endroit du milieu de la goutte. Or l'eau se serait élevée d'un pouce entre deux lames parallèles situées à une distance respective de  $\frac{1}{100}$  de pouce (362), et ainsi l'élevation de l'huile d'orange, dans le même cas, aurait été de  $\frac{1}{2}$  pouce; donc elle ne serait parvenue qu'à  $\frac{1}{100}$  de pouce, entre deux lames parallèles distantes l'une de l'autre de  $\frac{1}{2}$  de pouce. Mais la distance entre le milieu de la goutte et la ligne de jonction était de 10 pouces. Donc la fraction qui représente le sinus de l'angle que fait l'axe avec l'horizon, est  $\frac{16}{100.10}$  ou  $\frac{16}{1000}$ , ce qui donne 55° pour l'angle dont il s'agit, conformément à l'expérience d'Hauksbée.

en sorte que la résistance de ces parois détruisait la tendance qu'elles auraient pu avoir à prendre du mouvement. Nous allons maintenant considérer ces mêmes parois comme étant libres d'obéir aux forces qui les poussent dans un sens ou dans l'autre, et les développemens qui naîtront de ce nouvel état de choses achèveront de prouver la justesse de la Théorie de M. de Laplace.

368. Concevons que *ed*, *pc* (fig. 30), représentent les sections de deux lames plongées dans un liquide, parallèlement l'une à l'autre, à la distance où l'action capillaire a lieu d'une manière sensible, et supposons que le liquide soit du mercure, auquel cas il s'abaissera au-dessous du niveau *MN*, en formant une convexité *gol*. Supposons de plus, que les lames soient susceptibles de céder à une légère pression. Nous avons déjà vu (363) qu'il y a équilibre entre les deux colonnes verticales infiniment déliées de liquide *or*, *hs*, situées, la première à l'endroit de l'axe du tube, la seconde dans le liquide environnant, et agissant l'une sur l'autre par l'intermédiaire du canal *sr*. Prenons maintenant à volonté sur les deux surfaces de la partie plongée d'une des lames, telle que *ed*, deux points opposés *k*, *u*, et imaginons à la hauteur de ces points deux autres canaux infiniment déliés *iu*, *kx*, qui soient parallèles au canal *sr*. Il est facile de voir que les actions du liquide transmises à ces mêmes points par les deux canaux, se détruisent mutuellement. Car les portions de colonne *ox*, *hi*, ayant leurs bases inférieures également distantes de celles des colonnes entières *or*, *hs* qui se font équilibre, agissent avec des forces égales sur les canaux *xk*, *iu*, pour pousser l'un vers le point *k* et l'autre vers le point *u*. Mais il y a aussi égalité entre les forces avec lesquelles les canaux réagissent contre les colonnes *ox*, *hi*, parce que ces forces sont celles de deux masses planes dont les pressions dépendent uniquement des molécules voisines des points *k*, *u* (353). Donc, ces points n'ont aucune tendance à se mouvoir, en vertu des actions que le liquide exerce sur eux, et il est évident que les pressions qu'éprouve le liquide de la part de l'air soit extérieur, soit intérieur, se détruisent aussi mutuellement. Le même raisonnement s'applique à tous les autres points situés depuis *d* jusqu'en *q*. Mais au-dessus de ce dernier point, la lame *ed* est pressée latéra-

lement au dehors par le liquide, sans qu'il y ait rien à l'intérieur qui balance cette pression, et comme la même chose a lieu en sens contraire par rapport à la lame  $pc$ , les deux lames s'approcheront l'une de l'autre.

369. Supposons maintenant que le liquide s'élève au-dessus du niveau, entre les lames  $ed$ ,  $pc$  (*fig. 29*), en formant à sa partie supérieure la concavité  $fog$ . Il semblerait d'abord que ces lames dussent s'écarter l'une de l'autre. Car jusqu'à présent nous avons vu les actions des masses convexes et concaves produire des effets opposés; cependant l'expérience prouve que les deux lames se rapprochent l'une de l'autre dans le cas présent, comme dans celui qui précède. Mais ce paradoxe, dont l'explication avait été tentée inutilement par quelques physiciens, ne laisse plus lieu aujourd'hui à d'autre surprise que celle de voir avec quelle facilité il s'éclaircit, d'après la théorie de M. de Laplace.

370. Reprenant ici l'hypothèse de deux canaux horizontaux,  $iu$ ,  $kx$ , dont les positions soient soumises aux mêmes conditions que ceux de la figure 30, on concevra aisément, à l'aide d'un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour le cas précédent, que les points  $u$ ,  $k$  (*fig. 29*), et tous les autres situés de deux côtés opposés, au-dessous du niveau, étant en équilibre, la lame  $ed$ , considérée sous ce rapport, n'a aucune tendance à se mouvoir dans un sens ou dans l'autre.

Reste à examiner ce qui se passe aux endroits où la lame n'est pas baignée par le liquide extérieur. Soit  $tz$  un nouveau canal horizontal pris à une hauteur quelconque au-dessus du niveau. La colonne partielle  $oz$  agit sur le point  $t$ , par l'intermédiaire du canal, avec la force du plan  $ab$  moins celle du ménisque  $fogba$ , et de plus avec celle que la pesanteur exerce sur elle; et si les deux dernières forces, qui s'exercent en sens opposé, étaient égales, il ne resterait que l'action du plan  $ab$ , avec laquelle l'action du canal  $tz$ , qui est aussi celle d'une masse plane, serait en équilibre, et alors le point  $t$  n'aurait aucune tendance à prendre du mouvement. Mais la force du ménisque qui est égale au poids de toute la colonne  $oy$  qu'elle tient suspendue au-dessus du niveau, agit pour soulever la colonne partielle  $oz$  avec un excès mesuré par la diffé-

rence  $zy$  entre  $oz$  et  $oy$ . Cet excès détruit donc une partie de la force du plan  $ab$ , d'où il suit que celle du canal  $tz$  l'emporte sur la pression de la colonne  $oz$ , et ainsi le point  $t$  est sollicité à se mouvoir vers la lame  $pc$ , et il en faut dire autant de tous les autres points situés au-dessus du liquide environnant. Or la pression de l'air extérieur et celle de l'air intérieur sur les deux surfaces de la lame étant égales et contraires, leurs actions ne peuvent troubler l'effet de la tendance dont nous venons de parler, et comme tous les points correspondans du liquide en contact avec la lame  $pc$  ont une pareille tendance en sens opposé, les deux lames que nous supposons mobiles s'approcheront l'une de l'autre, par une suite de leur cohérence avec le liquide.

On voit aisément, d'après ce que nous venons de dire des actions exercées par l'air, que le phénomène doit avoir lieu également dans le vide.

371. L'analyse démontre que si le liquide s'élève entre les deux lames, la force avec laquelle chacune d'elles tend vers l'autre, équivaut à la pression d'une colonne du même liquide, dont la hauteur serait la demi-somme des lignes  $\mu\mu$ ,  $f\mu$ , qui mesurent les quantités dont les points extrêmes des concavités extérieures et intérieures du liquide s'élèvent au-dessus du niveau, et dont la base serait la partie de la surface de la même lame comprise entre deux lignes horizontales menées par les points  $f$ ,  $\mu$ . Si au contraire le liquide s'abaisse entre les lames, la pression qui poussera chacune d'elles vers l'autre est égale à celle d'une colonne du même liquide, dont la hauteur serait la demi-somme des lignes  $\mu\mu$ ,  $q\mu$  (*fig. 30*), qui mesurent les quantités dont les points extrêmes des convexités extérieures et intérieures du liquide s'abaissent au-dessous du niveau, et dont la base serait la partie de la surface de la lame comprise entre deux lignes horizontales menées par les points  $\mu$ ,  $q$ .

## Application aux Attractions et aux Répulsions apparentes des petits corps qui flottent sur un Liquide.

On doit rapporter à des actions du même genre que celles qui produisent les phénomènes des tubes capillaires, les mouvements à l'aide desquels deux petits corps qui flottent sur un liquide, à une petite distance l'un de l'autre, s'approchent jusqu'au contact, ou se fuient, suivant les circonstances. Ces corps étant de ceux qui sont à l'état de solidité, ne peuvent exercer l'un sur l'autre aucune attraction ou répulsion sensible; et ce qui se passe dans les phénomènes dont il s'agit ici, est uniquement dû à l'action des molécules du liquide en contact avec ces mêmes corps.

372. Si aucun des deux corps n'est susceptible d'être mouillé par le liquide; si ce sont, par exemple, deux globules de cire qui flottent sur l'eau, et que la distance qui les sépare soit assez petite, on les verra s'approcher et se réunir. Pour en concevoir la raison, on peut observer que, dans ce cas, la surface *bd* (*fig. 34*) du liquide commence à s'infléchir en partant d'un point *d* ou *g* situé à une certaine distance de celui où se fait l'immersion du globule *a*; en sorte qu'elle forme en cet endroit une courbe, dont la convexité est tournée vers le haut. La même chose a lieu par rapport au globule *c*, qui flotte sur le même liquide. Tant que les deux globules sont à une distance respective assez grande, pour qu'une partie de la surface intermédiaire du liquide, telle que *db*, conserve son niveau, les pressions latérales que ce liquide exerce de part et d'autre sur chaque globule étant égales, l'équilibre subsiste; mais si l'on suppose que la distance diminue continuellement entre les deux globules, il y a un terme où tout le liquide compris dans l'espace qui les sépare, subit un abaissement analogue à celui qui a lieu par rapport au mercure, lorsqu'on y plonge deux lames *pc*, *ed* (*fig. 30*), situées parallèlement entre elles à une petite distance. Alors les pressions latérales qui agissent du côté opposé à celui par lequel les globules se regardent, devenant prépondérantes, poussent ces globules l'un vers l'autre.

373. Si l'un des deux globules, tel que  $a$  (fig. 35), est susceptible d'être mouillé, et que l'autre globule  $b$  ne le soit pas; par exemple, si le premier est de liège et l'autre de cire, le liquide s'élevera autour du globule  $a$ , tandis qu'au contraire il formera un enfoncement autour du globule  $b$ ; en sorte que si on les fait avancer l'un vers l'autre jusqu'à une petite distance, la pression qui agit latéralement sur  $b$ , du côté de  $d$ , étant plus forte que celle qui a lieu dans la partie opposée  $g$ , à cause de l'élévation du liquide entre  $d$  et le globule  $a$ , l'autre globule  $b$  sera forcé de reculer, comme s'il était repoussé par le globule  $a$ .

On peut varier cette expérience, en plaçant sur l'eau un globule de cire, puis en plongeant dans cette eau, à quelques millimètres du globule, l'extrémité d'un corps susceptible d'être mouillé, tel qu'un petit bâton de bois, de même diamètre que le globule. Celui-ci s'éloignera du bâton; et si l'on réitère les immersions toujours à la même distance, on pourra diriger à volonté le mouvement du globule, par une action qui paraîtra s'exercer à distance sur ce petit corps.

374. Enfin, si les globules sont tous les deux susceptibles d'être mouillés, ils se porteront l'un vers l'autre, et finiront par s'unir. Cet effet qu'il paraissait très difficile de concilier avec celui que présentent deux globules qui, au contraire, ne sont pas susceptibles d'être mouillés, vient comme de lui-même se placer à côté de ce dernier, dans la Théorie de M. de Laplace. L'intervalle entre les deux globules peut être alors assimilé à celui qui sépare deux lames de verre parallèles  $pc$ ,  $ed$  (fig. 29), entre lesquelles l'eau s'élève au-dessus du niveau. Or, nous avons vu (370) que ces lames sont tirées l'une vers l'autre par les forces qu'exerce le liquide intermédiaire. Le même effet a donc lieu par rapport aux deux globules, lorsqu'ils sont assez rapprochés pour que l'action capillaire s'étende dans tout le petit espace situé entre les portions de surface par lesquelles ils se regardent.

On peut substituer aux globules deux aiguilles délicées que l'on posera doucement sur l'eau, où elles flotteront, par l'effet de la petite couche d'air qui est adhérente à leur surface, comme cela a lieu en général pour tous les corps. Le volume de cet air étant

comparable au volume de l'aiguille, fait croître ce dernier dans un rapport plus grand que celui de l'augmentation de poids ; en sorte que le tout est spécifiquement plus léger qu'un pareil volume d'eau. Si l'on fait avancer une des aiguilles vers l'autre, dans une direction oblique, jusqu'à ce que les deux extrémités se touchent, elles s'inclineront l'une sur l'autre, de manière que l'angle qu'elles formaient au moment du contact, diminuera peu à peu, et elles finiront par adhérer entre elles dans toute leur longueur. Si lorsqu'elles se sont rencontrées, l'extrémité de l'une a touché un point situé, par exemple, au milieu de la longueur de l'autre, le point de contact restera fixe jusqu'à ce que les deux aiguilles adhèrent ensemble, en se dépassant mutuellement de la moitié de leur longueur, et à l'instant elles glisseront l'une sur l'autre pour se mettre de niveau par leurs extrémités.

Tous ces divers phénomènes, que plusieurs physiciens ont attribués aux actions réciproques des corps qui les présentent, dépendent donc uniquement de l'attraction qu'exercent les molécules de l'eau, soit entre elles, soit par rapport aux corps eux-mêmes ; et ce liquide est ici le véritable moteur déguisé sous l'apparence d'un simple véhicule.

### Des circonstances qui déterminent la concavité ou la convexité de la surface du Liquide.

375. La plupart des physiciens ont cru pouvoir expliquer la différence que présentent, en général, les liquides qui s'élèvent au-dessus du niveau, avec ceux qui s'abaissent au-dessous, en supposant que, dans le premier cas, l'action du tube sur le liquide était plus grande que celle du liquide sur lui-même, et que dans le second cas elle était plus faible. C'était un de ces principes qui paraissent si évidens au premier coup-d'œil, qu'il faut être conduit, sans s'y attendre, par des méthodes rigoureuses, à en découvrir la fausseté. C'est ce qui arriva à Clairaut, lorsqu'il déduisit de ses formules cette conséquence singulière, que quand même l'attraction du tube capillaire sur le liquide aurait une intensité moindre que celle du liquide pour lui-même, pourvu

qu'elle surpassât la moitié de cette dernière, le liquide ne laisserait pas de monter (1).

Ce résultat, qui est aussi un corollaire de la théorie de M. de Laplace, peut être démontré d'une manière très simple. Soit *pedc* (fig. 36, pl. 3) la coupe verticale d'un tube plongé dans l'eau MN par sa partie inférieure *hgcd*, et dont l'action sur ce liquide soit égale à la moitié de l'action réciproque des molécules de l'eau. Divisons par la pensée ce tube, à l'endroit du niveau MN, en deux tubes partiels *epgh*, *ghdc*, et imaginons qu'un nouveau tube que nous désignerons par A, étant de la même nature et de la même forme que *ghdc*, le pénètre intimement. Si nous faisons abstraction, pour un instant, du tube *epgh*, il est évident que la surface de l'eau intérieure sera de niveau, en vertu des actions qu'exerce sur elle l'ensemble des deux tubes A et *ghdc*, puisque cet ensemble équivaut à un tube d'eau de mêmes dimensions. Maintenant, pour remettre les choses dans leur premier état, il faut d'une part supprimer l'action du tube A, et de l'autre faire intervenir l'action du tube *epgh*. Voyons donc en quoi consistent ces actions dans l'hypothèse où les deux tubes existeraient seuls. Soit *o* un point pris à la surface de l'eau, et *s*, *r* deux points pris sur les surfaces des deux tubes et également éloignés du point *o*, de manière que leurs distances à ce point soient moindres que le rayon de la sphère d'activité sensible du tube. Représentons par *os* la force oblique que le point *s* exerce sur le point *o*. Cette force se décompose en deux, l'une *oh* qui est horizontale, l'autre *ou* qui est verticale. La force oblique du point *r*, représentée par *or*, se décompose de même en une force verticale *oz*, égale à *ou*, et une force horizontale *oh*, la même que la première. Or la suppression du tube A fait disparaître la force *oh*, tandis que l'intervention du tube *epgh* la rétablit, d'où l'on voit que tout demeure comme auparavant dans le sens horizontal, en sorte qu'il n'y a de changement que dans les forces qui agissent verticalement (2).

(1) Théorie de la Figure de la Terre, L. X, p. 121.

(2) Si l'on désigne par *p* chacune des lignes *ou*, *oz*, le changement qui a lieu dans les forces verticales sera représenté par  $-2p$ .

Ainsi le liquide n'étant encore sollicité que par des actions perpendiculaires à sa surface, ce qui est, d'après les lois de l'Hydrostatique, la condition nécessaire pour que l'équilibre subsiste, le niveau ne sera point altéré.

Au-delà de cette limite, qui répond au terme où l'attraction du tube sur l'eau est la moitié de celle que les molécules de l'eau exercent les unes sur les autres, l'élévation du liquide sera toujours plus sensible, à mesure que l'action du tube diffèrera moins de celle de l'eau, et en deçà de la même limite, le liquide s'abaissera de plus en plus, à mesure que l'action du tube approchera davantage d'être égale à zéro.

376. L'élévation du liquide au-dessus du niveau, ou son abaissement au-dessous, n'ont lieu qu'en conséquence de ce que, dans le premier cas, le rapport qui existe entre l'attraction du tube sur le liquide, et l'attraction du liquide sur lui-même, détermine la surface de celui-ci à prendre une figure concave, tandis que dans le second cas le rapport entre les deux attractions, détermine la même surface à former une convexité. Tout dépend, ainsi que nous l'avons déjà vu, de l'action négative du ménisque ajouté à la masse plane (356), ou de l'action positive due à l'absence du ménisque retranché de la masse plane (355); d'où il suit que si, par un moyen quelconque, on parvient à faire varier à volonté la figure du liquide, les effets de sa pression subiront des changemens analogues.

377. Ceci nous conduit à expliquer le résultat d'une expérience intéressante imaginée par le père Abat, qui a beaucoup travaillé sur les phénomènes des tubes capillaires, et à qui l'on serait tenté de savoir gré d'avoir voulu en bannir l'attraction, parce que les faits qu'il a accumulés contre elle ont augmenté le nombre de ceux qui déposent le plus en sa faveur.

Ce physicien ayant pris un tube capillaire AB (*fig. 37*) recourbé en siphon, dont une des branches était plus courte que l'autre, le plongea dans l'eau, la courbure en bas, de manière que l'extrémité de la branche A la plus courte, se trouvait au-dessous du niveau. Le liquide s'éleva aussitôt à l'ordinaire dans la branche B. Le père Abat retira ensuite le siphon, et passa le bout du

doigt sur l'extrémité de la branche A, pour enlever la goutte d'eau qui s'y était formée, jusqu'à ce que la surface du liquide fût devenue plane en cet endroit. Il observa alors que l'eau s'élevait dans la branche B au-dessus du niveau  $cdh$ , à une hauteur telle que  $or$ , la même que quand le siphon était plongé. Enfin il introduisit avec le bout du doigt quelques gouttes d'eau dans la branche B, jusqu'à ce que la surface de l'eau contenue dans la branche A, en débordant au-dessus de  $cd$ , y eût formé une petite convexité  $csd$ , et il remarqua que l'eau parvenue en  $xz$  dans la branche B, était à une distance  $xz$  d'une horizontale menée par le sommet  $s$  de la convexité  $csd$ , plus grande que la distance  $ho$  entre le premier niveau  $cdh$ , et la hauteur à laquelle l'eau s'était arrêtée dans la branche B, quand sa surface était plane en  $cd$  (1).

378. Cette expérience, que nous avons répétée plusieurs fois, fait ressortir d'une manière frappante la différence entre les actions du liquide, suivant la diversité des figures que prend sa surface supérieure. Quand la colonne renfermée dans la branche A est plane à son sommet, l'action qu'elle exerce sur l'autre colonne contenue dans la branche B, et dont le sommet est concave, est la même que celle d'une masse de liquide, dans laquelle on plonge un tube capillaire. Détermine-t-on la colonne de la branche A à s'arrondir vers son sommet; ce petit changement de figure lui donne plus de force pour agir de haut en bas, et pousser en sens contraire le liquide renfermé dans la branche B, que dans le cas même où elle aurait une épaisseur uniforme depuis sa base jusqu'au point  $s$ , et où par conséquent elle serait composée d'une plus grande quantité de liquide. Pour l'amener à cette dernière figure, il faudrait ajouter à sa partie supérieure un ménisque tel que  $ablq$  (fig. 28), dont l'action affaiblirait la sienne, en y introduisant une quantité négative.

---

(1) Amusemens philosophiques sur diverses parties des Sciences. Amsterdam, 1763, p. 537, expér. XII.

## De l'influence du Frottement sur la Capillarité.

Le frottement que les parois du tube font éprouver à une colonne du liquide, tandis que celle-ci s'élève ou s'abaisse, peut aussi occasionner dans la courbure terminale des variations qui modifient l'effet capillaire. C'est surtout à l'égard du mercure que cette modification est sensible.

379. Soit AB (fig. 38) un tube de verre recourbé dans lequel on ait introduit du mercure; si on secoue un peu le tube, le métal liquide se mettra de niveau avec lui-même dans les deux branches, où il se terminera par deux convexités semblables *cd*, *ef*. Supposons maintenant que la pression de l'air augmente peu à peu sur la colonne renfermée dans la branche A; cette colonne s'abaissera, et en même temps celle qui occupe la branche B s'élèvera d'autant. Or, d'une part, le frottement des parois du tube contre cette dernière colonne ralentit le mouvement ascensionnel de la couche en contact avec le tube, d'où il résulte que les parties intérieures de la colonne qui n'éprouvent pas la même gêne, s'élèvent avec un petit excès de vitesse. Par une suite nécessaire, les premiers plans de la surface supérieure du liquide, ou ceux qui sont contigus au verre, font un plus petit angle avec les parois du tube, ce qui détermine cette surface à prendre une forme plus bombée telle que *hk*. D'une autre part, tandis que le frottement qui s'exerce sur la colonne renfermée dans la branche A oppose une résistance sensible à la descente de la couche en contact avec le tube, les parties intérieures, dont le mouvement est plus libre, descendent un peu plus vite, et ainsi les premiers plans de la surface supérieure de la colonne faisant un angle moins aigu avec les parois du tube, cette surface prend une forme plus surbaissée, telle que *lo*.

Il suit de là que l'action du mercure renfermé dans la branche B, pour pousser vers le bas une colonne infiniment déliée, située à l'endroit de l'axe, est plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que celle du mercure renfermé dans la branche A, sur une colonne prise de même à l'endroit de l'axe, ou en d'autres

termes, l'effet de la capillarité est augmenté dans la branche B et diminué dans la branche A.

380. On peut observer ces variations de l'action capillaire, à l'aide d'une expérience remarquable, dont l'idée est encore due au père Abat (1). Après avoir introduit du mercure dans le siphon renversé AB, de manière que ce métal soit à la même hauteur dans les deux branches, on incline le siphon, en faisant descendre, par exemple, l'extrémité de la branche B vers l'horizon, jusqu'à ce que le mercure soit arrivé à cette même extrémité, puis on relève très doucement le siphon, et on lui rend sa première position. On remarque alors que le mercure est plus élevé dans la branche B que dans la branche A. Pour saisir la raison de cette différence, il suffit de considérer que, pendant le mouvement qui ramène le siphon à sa position primitive, le mercure que renferme la branche B est dans un cas semblable à celui de la colonne descendante de l'expérience précédente, tandis que le mercure de la branche A peut être assimilé à celui de la colonne ascendante. Ainsi, au moment où le siphon a été remis dans sa première position, la surface de la colonne de mercure contenue dans la branche B ayant une plus petite courbure, que celle de la colonne qui occupe la branche A, il en résulte, dans l'action que la première exerce du haut vers le bas, une diminution qui est compensée par une plus grande élévation de cette colonne.

381. Si l'on observe avec attention les mouvemens de la colonne de mercure dans le baromètre, on reconnaît qu'elle a une tendance à monter ou à descendre, en ce que sa surface supérieure devient ou plus convexe ou plus surbaissée. On fait disparaître cet effet du frottement, en secouant légèrement le tube de l'instrument. Dans le premier cas, la surface du mercure perd de sa convexité, et la colonne s'élève un peu; dans le second cas, la convexité augmente, et la colonne descend d'une petite quantité.

382. On voit, par ce qui a été dit jusqu'ici, combien il est

---

(1) Amusemens philosophiques, p. 515.

important, lorsqu'on fait des observations barométriques, de mesurer la hauteur du mercure, depuis le sommet de la convexité terminale; car l'élevation de ce sommet est encore moindre que celle qui aurait lieu, dans le cas où la surface étant plane, la colonne serait exempte des effets de la capillarité.

Tel est l'exposé d'une théorie, à l'aide de laquelle les résultats de nombreuses expériences faites sur les tubes capillaires, se déduisent du principe de l'attraction, non plus par des considérations vagues et incertaines, mais par une suite de raisonnemens précis et rigoureux, qui ne laissent aucun lieu de douter qu'elle ne soit la véritable théorie. Lorsque d'un côté on la compare à tout ce qui a paru jusqu'ici dans ce genre, et que de l'autre on la considère en elle-même, on y voit, à la fois, un des pas les plus importans que la Géométrie ait fait faire à la Physique, et une des plus belles applications de ses sublimes méthodes.

### Analogie de divers Effets connus avec ceux des Tubes capillaires.

383. L'action capillaire se manifeste à l'égard d'une multitude de corps, qui n'ont besoin que d'être en contact avec l'eau, pour que ce liquide s'insinue dans les petits intervalles situés entre leurs molécules. Il n'y a guère que les métaux et les substances dont le tissu est vitreux, qui se refusent à cette action, et l'on est étonné de voir un petit phénomène, dont la cause est resserrée dans un espace imperceptible, s'agrandir en quelque sorte, à l'infini, par sa généralité. Les éponges sont remarquables entre les corps qui peuvent être cités comme exemples, par l'augmentation de poids et la dilatation considérables que l'imbibition leur fait subir. C'est à l'aide de l'action capillaire que l'eau s'introduit dans l'intérieur des végétaux, et comme cet effet dépend de leur tissu, il subsiste encore dans les parties que l'on a détachées de la plante, ainsi qu'on peut l'observer sur un tronçon de branche d'arbre, qui plongé dans l'eau par une de ses extrémités, s'imbibe de ce liquide. Des effets analogues se répètent continuellement sous nos yeux : tels sont ceux que présentent un

morceau de sucre que l'on plonge par une pointe dans le café, et qui en un instant, se trouve humecté jusqu'au haut, ce qui a lieu aussi promptement avec l'alcool, quoique le sucre n'y soit presque pas soluble; un morceau de sable ou de cendre dont le pied est dans l'eau, qui le pénètre de toutes parts, et arrive peu à peu jusqu'à la cime; la mèche de coton qui sert de véhicule à l'huile, pour aller alimenter la flamme d'une lampe, et ainsi d'une multitude de corps que Muschenbroeck appelait *les aimans des fluides*, dénomination très impropre, si ce physicien l'eût prise à la rigueur. Toutes les substances hygrométriques viennent ici se ranger sur une même ligne, qui commence aux tubes capillaires.

384. Les dendrites ou herborisations qui ornent la surface de certaines pierres calcaires ou marneuses, sont dues à une cause semblable. Parmi ces pierres, les unes sont pleines de fissures, dans lesquelles un liquide chargé de molécules de manganèse ou autres, s'est introduit et a laissé de petits dépôts métalliques; et comme les fissures forment des espèces de ramifications qui, même assez souvent, communiquent à une fissure principale, l'artiste a soin de couper la pierre dans le sens convenable, pour que toutes ces ramifications se développent sur un même plan, en sorte qu'elles s'offrent sous l'aspect d'un petit arbre, dont le tronc est à l'endroit de la fissure principale. Il y a d'autres pierres composées de feuillet entre lesquels un liquide semblable a pénétré, et s'est étendu par veines, en formant des dendrites composées de particules métalliques rangées à la file les unes des autres. Dans ce cas, on se contente de détacher les feuillet, et l'on a, sur chacune des faces qui se joignaient, un petit tableau qui est tout entier l'ouvrage de la nature.

## 2. De l'Eau à l'état de Glace.

La congélation de l'eau, que nous avons déjà prise pour exemple, en parlant du passage de la liquidité à la solidité (210), est précédée et accompagnée de circonstances particulières, dont le développement trouve ici naturellement sa place. Nous y join-

drons quelques détails relatifs au même phénomène offert par d'autres substances, dans le cas où il en résultera des rapprochemens propres à fixer l'attention.

### *Formation de la Glace.*

385. Lorsqu'une masse d'eau exposée dans un vase, à une température convenable, passe à l'état de solide, et que la congélation n'est pas trop hâtée, on voit d'abord naître à la surface, de petites aiguilles triangulaires, dont une des faces est de niveau avec l'eau. A mesure que ces aiguilles se multiplient, elles s'insèrent les unes sur les autres, et les interstices qu'elles laissent se trouvant occupés successivement par de nouvelles aiguilles, tout cet assemblage finit par ne plus former qu'un même corps.

Dans le cas d'une congélation très lente, les aiguilles ont des espèces de dentelures, et imitent, par leur assortiment, les cristallisations ébauchées que le refroidissement qui succède à la fusion fait naître sur la surface de la plupart des métaux, et que l'on a comparées à des rameaux de fougère. On observe aussi de ces congélations ramifiées à la surface des vitres pendant les temps de gelée.

Une circonstance remarquable de ces mêmes assortimens, est la tendance des aiguilles à se réunir sous l'angle de  $120^{\text{d}}$  ou de  $60^{\text{d}}$ . Cette disposition se montre, avec un caractère particulier de symétrie, dans la neige, qui tombe assez souvent en forme de petites étoiles à six rayons, exactement situés comme ceux d'un hexagone régulier.

386. Descartes, pour expliquer ce phénomène, pensait que les molécules de l'eau étant sphériques, six globules de cette eau s'arrangeaient d'abord autour d'un septième, et servaient ensuite comme de points d'attache à des files de globules semblables, dirigées suivant des lignes qui passaient par les centres des premiers et par celui du globule du milieu. Mais cette explication ressemblait à beaucoup d'autres, qui amènent le fait à elles, au lieu d'être amenées par le fait lui-même.

Mairan, dans sa Dissertation sur la Glace, où l'on trouve une

suite d'observations très soignées, réunie à ce que la théorie pouvait alors dire de mieux, se borne à regarder la disposition angulaire dont il s'agit, comme l'effet d'une certaine tendance qui dépend de la figure des molécules, qu'il présume être de petites aiguilles; et il cite, entre autres exemples qui viennent à l'appui de son opinion, celui de la pyrite cubique, dont les faces sont striées alternativement dans trois directions perpendiculaires l'une à l'autre (1). Cette pyrite n'est, selon lui, qu'un assemblage d'aiguilles déterminées par elles-mêmes à affecter constamment ces directions croisées; mais nous avons prouvé depuis (2) que la pyrite striée est, comme les autres, un assemblage de molécules cubiques, et doit être regardée comme une cristallisation ébauchée du dodécaèdre à plans pentagones (124).

387. On pourrait plutôt présumer que les molécules de l'eau sont des tétraèdres réguliers, tellement assortis qu'ils composent des octaèdres réguliers, comme cela a lieu dans certaines substances minérales du nombre desquelles est la chaux fluatée (3). Cette structure paraîtrait être indiquée par l'aspect des congélations qui offrent des naissances de formes régulières, et ont un rapport marqué avec les dendrites métalliques, que nous savons être des assemblages d'octaèdres réguliers implantés les uns dans les autres par un de leurs angles solides, de manière que les axes de tous ceux qui appartiennent à un même rameau sont rangés sur une seule ligne.

Dans la même hypothèse, les étoiles à six rayons que présente la cristallisation de la neige, pourraient être ramenées à l'analogie avec les ramifications de la glace; car soit *gd* (fig. 39) un octaèdre régulier, divisé en deux moitiés, à l'aide d'un plan mené par le centre *z*, parallèlement aux deux triangles *geb*, *psd*. Il est aisé de voir que la section sera un hexagone régulier *hknxco*. Par le centre de cet hexagone, menons les droites *zu*, *zy*, *zL*, etc.,

(1) P. 156 et suiv.

(2) Traité de Minér., t. 1<sup>r</sup>, p. 75.

(3) *Ibid.*, t. 11, p. 249.

perpendiculaires sur les côtés  $kn$ ,  $ho$ ,  $oc$ , etc., auquel cas ces droites feront entre elles des angles de  $60^{\circ}$ .

Maintenant, si nous supposons qu'il y ait un octaèdre au centre de l'étoile, et que les rayons de cette étoile soient situés à son égard, comme les lignes  $zu$ ,  $zt$ ,  $zl$ , etc., par rapport à l'octaèdre  $gd$ , nous pourrons considérer les rayons de l'étoile comme des assemblages de petits octaèdres rangés à la file les uns des autres, et dont chacun aura ses faces situées parallèlement à celles de l'octaèdre central, d'où il suit que dans tous ceux d'une même file, les faces supérieures et les inférieures seront situées sur des plans qui répondront l'un au triangle  $geb$ , l'autre au triangle  $psd$ , et que de plus les petits octaèdres s'appliqueront deux à deux l'un contre l'autre, par leurs faces latérales analogues aux triangles  $ped$ ,  $bde$ ,  $gpe$ , etc.

Au reste, les étoiles ayant été produites pendant leur chute, par l'effet d'une cristallisation précipitée, ne peuvent offrir que des ébauches très imparfaites des formes qu'ils auraient prises dans le cas où leurs molécules eussent été libres de s'arranger conformément aux lois d'une aggrégation régulière, en sorte que ce qui précède ne peut passer que pour une simple conjecture, dont le but est d'indiquer une corrélation entre la cristallisation de la neige et celle des ramifications dont nous avons parlé d'abord.

388. L'eau qui tient un sel en dissolution le laisse précipiter, lorsqu'elle se convertit en glace. Dans quelques contrées du Nord on profite du froid de l'atmosphère, comme d'un moyen préparatoire, pour extraire le sel des eaux de la mer. On fait entrer une couche d'eau peu épaisse, dans des fosses pratiquées à cet effet : une partie de cette eau, en se congelant, abandonne les molécules salines, qui se concentrent dans la portion encore liquide, en sorte que celle-ci n'a plus besoin que d'être exposée à une chaleur modérée, pour que son évaporation permette au sel dont elle est chargée, de se cristalliser.

*Circonstances où l'Eau reste liquide au-dessous  
du terme de la Congélation.*

389. Nous avons parlé plusieurs fois du degré de la congélation et nous avons désigné par là le terme où, soit que la glace commence à se fondre, soit que l'eau liquide commence à se glacer, la liqueur du thermomètre répond à zéro; c'est effectivement ce qui a toujours lieu. Mais il ne s'ensuit pas que la température de l'eau ne puisse descendre au-dessous de zéro, sans que cette eau ne se congèle. Fahrenheit observa le premier, et ce ne fut pas sans surprise, que l'eau contenue dans un matras de verre, dont le tube était fermé par le haut, conservait encore sa fluidité après avoir été exposée, pendant un jour et une nuit, à une température de beaucoup inférieure au terme de la congélation. Ayant cassé la pointe du tube, il vit à l'instant une multitude de petits glaçons se former au milieu de l'eau, et il attribua d'abord cet effet au contact de l'air; mais une autre fois qu'il portait un semblable matras, où l'eau était encore liquide, il fut tiré d'erreur par un accident assez singulier, en faisant un faux pas, qui produisit dans l'eau une agitation suivie d'une congélation subite.

Cet effet est analogue à ce qui se passe dans la cristallisation des sels. Un mouvement léger imprimé au vase dans lequel est contenue une dissolution saline, où l'on ne voyait encore rien paraître, quoiqu'elle eût déjà passé le point de saturation, suffit pour déterminer tout à coup la naissance d'une multitude de petits cristaux.

On peut concevoir que dans ce cas, l'agitation du liquide, en même temps qu'elle aide les molécules salines à se dégager d'entre les molécules aqueuses qui opposent encore un petit obstacle à leur réunion, occasionne dans les premières une multitude de mouvemens divers, d'où résultent, pour un certain nombre d'entre elles, les positions qui donnent le plus d'avantage à l'affinité.

On a remarqué aussi qu'un petit cristal de sel placé dans une

dissolution du même sel, favorise la cristallisation, parce que les molécules qui composent ce cristal ayant déjà les positions respectives qu'exige l'affinité pour être satisfaite, sollicitent ensuite leurs voisins aux mouvemens les plus favorables à l'action de la même force, et cette disposition se communique de proche en proche, à toutes celles qui faisaient effort pour cristalliser. La présence d'un petit glaçon, que l'on place de même dans une eau qui est déjà au-dessous du degré de la congélation, devient comme le signe de ralliement de toutes les molécules qui ont une tendance prochaine à se réunir.

390. Les deux effets dont nous venons de parler, savoir, l'abaissement de température que l'eau peut subir au-dessous du terme de la congélation, en restant toujours liquide, et le passage subit à l'état solide, en vertu de certaines circonstances, ont été le sujet d'une suite intéressante d'observations faites par M. Blagden, de la Société royale de Londres (1). Ce savant a remarqué qu'en général les substances qui altèrent la pureté et la transparence de l'eau, déterminent un moindre abaissement dans la température que ce liquide peut atteindre, sans se congeler, que s'il eût été pur et limpide. Ainsi l'eau distillée était celle qui donnait, à cet égard, comme le *maximum* d'abaissement de température; et de plus il y avait cette différence entre l'eau distillée que l'on avait fait bouillir et celle qui n'avait point subi l'ébullition, que la première pouvait être refroidie plus que l'autre sans se congeler. Celle qui avait subi l'ébullition parvenait avant d'entrer en congélation, à 22<sup>d</sup> de Fahrenheit, près de —5<sup>d</sup> de Réaumur, tandis que celle qui n'avait pas bouilli n'atteignait qu'une température de 24<sup>d</sup> de Fahrenheit, environ —3<sup>d</sup>  $\frac{5}{9}$  de Réaumur, avant de se congeler. M. Blagden attribue cette différence à l'air que l'eau renferme naturellement, et qui se dégage pendant l'ébullition. L'eau qui n'avait point été distillée se congelait, après être parvenue à une température toujours moins basse, à proportion que cette eau était moins pure; et M. Blagden ayant soumis à l'expérience de l'eau de rivière très chargée de

---

(1) Philosophical Transact., vol. LXXVIII, an. 1788, p. 125.

particules limoneuses, ne put jamais l'amener à descendre au-dessous de 32<sup>d</sup> de Fahrenheit, ou du zéro du thermomètre en 80 parties, avant de se congeler.

391. On entend dire assez communément que l'eau qui a bouilli se gèle plus facilement que celle qui n'a point été exposée au feu. M. Blagden aperçoit, dans les résultats de ses observations, ce qui a pu donner naissance à cette opinion : car si l'eau contient de la terre calcaire qui y soit tenue en dissolution par l'acide carbonique, ce qui a lieu très fréquemment par rapport aux eaux de source, la terre calcaire, en se précipitant par l'effet de l'ébullition, troublera la transparence de l'eau, qui acquerra ainsi une disposition plus prochaine à entrer en congélation.

Ces expériences faites sur l'eau commune, ont été suivies de beaucoup d'autres où l'eau était modifiée par différentes substances salines, acides ou alcalines, susceptibles d'être dissoutes par ce liquide, ou combinées chimiquement avec lui. On savait déjà que l'union de ces substances avec l'eau avait la propriété de faire baisser plus ou moins son point de congélation. M. Blagden a observé de plus, qu'en vertu de cette même union, l'eau pouvait aussi être refroidie au-dessous de son nouveau point de congélation, en restant toujours liquide, et il détermine l'abaissement de température qui a lieu dans chaque cas particulier.

392. Pour compléter le tableau de toutes les circonstances relatives à cet objet, nous remarquerons qu'il y a ici deux effets distincts qui dépendent du calorique : d'abord la température du liquide s'abaisse au-dessous de zéro, parce que les corps environnans, qui sont plus froids que l'eau, lui enlèvent le calorique, par leur affinité prépondérante pour ce fluide; mais dès qu'une fois l'eau est déterminée à se congeler, en vertu d'une cause quelconque, il se fait un dégagement particulier de la quantité de calorique qui doit se développer, pour que la congélation ait lieu.

393. On sait que l'eau congelée absorbe, en se fondant, 60<sup>d</sup> de chaleur; car si l'on mêle ensemble un kilogramme d'eau à 60<sup>d</sup>, et un kilogramme de glace à zéro, toute la chaleur de l'eau sera employée à fondre la glace : par un effet contraire, une masse d'eau qui se congèle développe 60<sup>d</sup> de chaleur.

D'après cela, on peut expliquer pourquoi l'eau, dont la température descend au-dessous de zéro, reste liquide; car si les circonstances sont telles, que le calorique qui se développerait par l'effet de la congélation dût mettre beaucoup de lenteur à se communiquer aux corps environnans, il en résultera une cause de retard par rapport à la congélation elle-même, parce que plus la portion de calorique qui, en la supposant développée, tendrait à rester dans la masse est considérable, et plus elle contrarie une des conditions nécessaires à la congélation; savoir, que la température ne s'élève pas au-dessus de zéro, puisqu'à ce terme la glace commence à se fondre.

Cet obstacle, que la transmission lente du calorique forme à la congélation, est tel, que si l'on suppose l'eau exactement renfermée dans un vase non conducteur du calorique, elle ne pourra se congeler tout entière, dans cette hypothèse mathématique, qu'à une température au moins de  $66^{\text{d}} \frac{2}{3}$  au-dessous de zéro, en supposant, avec M. Kirwan et plusieurs autres physiciens, que les chaleurs spécifiques de la glace et de l'eau à l'état de liquide soient entre elles dans le rapport de 9 à 10; car la quantité de chaleur que développe l'eau pendant qu'elle se congèle, est, comme nous l'avons dit, égale à celle qui élèverait de  $60^{\text{d}}$  la température de ce liquide. Or, lorsque le développement de cette quantité de chaleur, que nous supposons rester tout entière dans l'eau, a déterminé le point de la congélation, la glace est dans le même cas que si sa température ayant été primitivement d'un nombre  $n$  de degrés au-dessous de zéro, elle s'était élevée jusqu'à zéro, par un accroissement de chaleur capable de faire monter de 60 degrés la température de l'eau. Donc, puisque les élévations de température de deux corps, par un même accroissement de chaleur, suivent le rapport inverse des chaleurs spécifiques (195), on aura cette proportion,  $60^{\text{d}} : n :: 9 : 10$ , ce qui donne  $n = 66^{\text{d}} \frac{2}{3}$ ; c'est-à-dire, que l'élévation de température qui ferait naître la congélation dans l'hypothèse présente, serait de  $66^{\text{d}} \frac{2}{3}$ , ou, en d'autres termes, il faudrait que la température de l'eau eût été originellement de ce nombre de degrés.

Si, dans la même hypothèse, la température était plus voi-

sine de zéro, il pourrait encore y avoir congélation, mais seulement par rapport à une partie de l'eau; et l'on trouverait une infinité de cas possibles d'équilibre, en supposant que tout ce qui serait susceptible de congélation, se congelât en effet; en sorte que l'on pourrait déterminer, à l'aide d'un calcul simple, la partie qui se congèlerait par chaque degré de température. Mais ces circonstances n'ont point lieu dans la nature, parce que les corps environnans prennent toujours leur part du calorique développé (1).

394. A l'égard de la congélation occasionnée par l'agitation de la liqueur, M. Blagden, en essayant des mouvemens de différentes espèces, est parvenu à distinguer ceux dont l'effet est le plus sûr pour commander, en quelque sorte, la réunion subite des molécules aqueuses. Il a observé qu'en général cet effet dépend d'une agitation particulière produite dans le liquide, plutôt que d'un mouvement rapide imprimé à toute la masse. Ainsi l'on réussira, en frappant légèrement avec le fond du vase la table qui le soutient, ou en froissant les parois intérieures ou le fond du même vase avec un tube ou avec une plume. Mais de tous ces excitateurs de la congélation, celui qui manque le plus rarement son effet, est un petit morceau de cire avec lequel on frotte les parois du vase, dans quelques points inférieurs au niveau de l'eau, de manière à faire naître des espèces de vibrations sonores. On voit paraître à l'instant une croûte de glace à l'endroit du vase situé au-dessous de la cire.

### *Du Maximum de densité de l'Eau.*

395. Pendant que l'eau passe à l'état de glace, son volume subit différentes variations, dont la marche mérite d'être suivie avec attention. Si l'on expose à la gelée un matras rempli d'eau jusque vers le milieu de sa hauteur, on verra cette eau descendre

---

(1) Voyez le Mémoire publié par Lavoisier et Laplace, parmi ceux de l'Académie des Sciences, 1780, p. 355 et suiv.

d'abord à mesure qu'elle se refroidira; arrivée à un certain terme, elle y restera stationnaire pendant quelques instans, puis elle commencera à monter; en sorte qu'au moment de sa congélation, elle se trouvera au-dessus de son premier niveau.

On voit par là que le volume de l'eau congelée est plus grand que n'était celui de la même eau à l'état de liquide. Il en résulte que la pesanteur spécifique de l'eau diminue par la congélation, ce qui est d'ailleurs prouvé par la propriété qu'ont les glaçons de nager sur l'eau qui les charie.

396. L'observation que nous venons de citer indiquait déjà que la dilatation de l'eau, à l'état de glace, n'était pas produite tout à coup, et comme par un saut brusque, au moment même de la congélation, mais qu'elle commençait plus tôt; en sorte que le point de la plus grande contraction était à quelques degrés au-dessus du zéro du thermomètre.

On pouvait objecter cependant, qu'il y avait ici un effet qui n'était qu'apparent, et qui provenait de ce que le verre se condensant en même temps que l'eau, à mesure qu'il se refroidissait, éprouvait aux approches de la congélation, une contraction qui était plus grande à proportion que celle de l'eau. C'est ainsi que le fait a été expliqué par plusieurs physiciens qui ont pensé que dans ce cas l'eau paraissait seulement acquérir une extension de volume, qui était due à l'excès de la contraction du verre sur celle de l'eau elle-même.

Mais les expériences faites par M. Lefèvre-Gineau, avec le cylindre qui lui a servi à déterminer la nouvelle unité de poids, ne laissent aucun lieu de douter que la dilatation de l'eau ne soit réelle. Ce physicien a pesé le cylindre dont il s'agit, à diverses reprises et avec un soin extrême, tandis que la température de l'eau dans laquelle cet instrument était plongé, variait en se rapprochant du terme de la glace fondante. Il a trouvé que le cylindre commençait à perdre toujours davantage de son poids, à mesure que l'eau se refroidissait, et cela jusque vers le quatrième degré au-dessus de zéro du thermomètre centigrade; qui répond à  $3\frac{1}{2}$  sur le thermomètre en 80 parties. Depuis ce terme, la perte de poids diminuait à mesure que la température approchait du

point de la congélation. Dans le premier cas , la force de l'eau ; pour soutenir le cylindre , allait en croissant ; d'où il suit que ce liquide se contractait de plus en plus. La même force diminuait dans le second cas , ce qui indiquait une dilatation dans le liquide ; et ainsi le *maximum* de densité répond à peu près au quatrième degré de chaleur sur le thermomètre centigrade.

397. La marche ordinaire du thermomètre est toujours un peu compliquée du double effet de la température , pour dilater ou resserrer en même temps le liquide et le verre qui le contient ; en sorte que la variation du mercure paraît moindre qu'elle n'est réellement : mais cette différence n'influe pas sur les résultats des observations ordinaires , parce qu'on suppose qu'entre les deux termes fixes auxquels se rapporte la construction du thermomètre , les degrés de dilatation ou de contraction du mercure et du verre suivent sensiblement le même rapport.

398. Selon les observations de M. Blagden, la dilatation que subit l'eau par l'effet du refroidissement , depuis un certain terme, est susceptible de s'accroître encore , lorsque le liquide continue de se refroidir au-dessous du point de la congélation , sans passer à l'état de solidité. Il a paru même à ce savant que l'expansion avait une marche croissante , en sorte qu'elle était beaucoup plus grande vers les derniers degrés du refroidissement qu'elle ne l'avait été au commencement.

399. Une circonstance remarquable qui accompagne la formation de la glace , est le dégagement de l'air renfermé dans l'eau. Cet air s'échappe sous la forme de petites bulles qui se réunissent plusieurs ensemble , pour former des bulles plus considérables , dont le diamètre a quelquefois jusqu'à six lignes ou même un pouce de longueur.

Quelquefois les bulles ont la forme de petits tubes plus ou moins inclinés , par rapport à l'axe du vase où s'opère la congélation : c'est ce qu'on observe en particulier dans l'eau distillée qui passe à l'état de glace.

400. L'augmentation de volume que subit la glace peut être attribuée en partie au dégagement de l'air. Il en serait ici de l'eau et de l'air , comme de certaines substances qui paraissent

se pénétrer en se mêlant, de manière que la somme de leurs volumes, pris séparément, était plus grande avant le mélange.

Mais l'eau que l'on a purgée d'air le plus exactement qu'il a été possible, avant de la faire congeler, ne laisse pas d'augmenter sensiblement de volume; ainsi cet effet dépend en grande partie du nouvel arrangement que prennent entre elles les molécules intégrantes du liquide, en se réunissant par leur force d'affinité; et l'on sait que ce même effet n'est point particulier à l'eau. Réaumur a observé que le fer acquiert un volume plus considérable par le refroidissement qui suit la fusion de ce métal et qui le congèle, tandis que le mercure, au contraire, dans le même cas, se contracte d'une quantité très sensible.

401. Mairan attribue la dilatation de l'eau congelée à une espèce de désordre produit par le mouvement plus ou moins rapide qui agite les molécules tandis qu'elles se réunissent. Il en résulte, selon lui, qu'elles se croisent et s'embarrassent mutuellement sous une infinité de positions différentes, en laissant de petits vides entre elles, ce qui tend à leur faire occuper un plus grand espace que dans l'état de simple liquidité.

On conçoit effectivement que toutes choses égales d'ailleurs, une cristallisation confuse, en donnant lieu à une multitude de petits interstices qui auraient été remplis, dans le cas d'une cristallisation plus lente et mieux graduée, puisse tendre à augmenter le volume de la masse solide produite par cette opération. Mais il paraît que l'acte seule de la cristallisation est par lui-même, au moins relativement à certaines substances, et en particulier à l'égard de l'eau, une cause immédiate d'augmentation de volume. Telle est, dans ces sortes de cas, la figure des molécules, jointe aux autres circonstances, que pour suivre les espèces d'alignemens qui détermine leurs nouvelles positions respectives, elles sont forcées de se développer dans un espace plus étendu que celui qu'exigeait l'état de liquidité.

*Force expansive de la Glace.*

402. Mairan ayant cherché la pesanteur spécifique de la glace, au moyen de la balance hydrostatique, a trouvé que le volume de l'eau augmentait d'environ  $\frac{1}{11}$  par la congélation : mais cet effet varie suivant les circonstances ; et comme il provient en général d'un arrangement particulier que prennent tout à coup les molécules de l'eau, en vertu de l'affinité, qui dans ce cas agit très puissamment pour les fixer, on entrevoit comment il peut en résulter dans la glace une force expansive considérable. De là les efforts qu'elle exerce contre les parois des différens vases qui la contiennent. Si le vase est d'une forme plate et présente une large ouverture, la force de la glace s'exerce en partie sur la croûte supérieure, qu'elle soulève vers le milieu, en lui faisant prendre une figure convexe ; en sorte que les parois du vase n'ayant à soutenir que le résidu de la même force, lui opposent ordinairement une résistance suffisante : mais si le vase est étroit, il arrive rarement qu'il ne soit pas rompu par l'effort de la glace, qui alors agit presque entièrement dans le sens latéral ; et il n'est personne qui n'ait eu plus d'une fois sous les yeux des vases d'un usage ordinaire mis hors de service par la congélation du liquide que l'on y avait laissé séjourner.

403. Plusieurs physiciens ont désiré d'éprouver jusqu'où pourrait aller cette force d'expansion. Un canon de fer, épais d'un doigt, rempli d'eau et fermé exactement, ayant été exposé par Buot à une forte gelée, se trouva cassé en deux endroits au bout de douze heures. Les philosophes de Florence firent crever, par la même cause, une sphère de cuivre très épaisse, et Muschenbrock ayant calculé l'effort qui avait dû occasionner la rupture, a trouvé qu'il aurait été capable de soulever un poids de 27720 livres.

404. Lorsqu'à la suite d'un dégel le retour de la gelée convertit en glace l'eau dont la terre était imbibée, cette glace, qui a subi une augmentation de volume, serre les végétaux naissans par le collet de leur racine, et attaque d'une manière funeste cette partie, qui leur sert à pomper les sucs nourriciers que la

terre leur fournit. Un froid vif qui survient pendant le printemps, produit aussi des effets nuisibles dans l'intérieur même des plantes qui déjà commencent à se développer. La sève, composée d'eau en grande partie, se dilate en se congelant, tandis qu'au contraire les fibres de la plante éprouvent une contraction, et il en résulte des espèces de déchirures qui occasionnent un dérangement dans l'organisation.

La même cause étend son influence destructive jusque sur les êtres inorganiques. Les pierres qui ont été mouillées avant la gelée s'exfolient, les marbres qu'on a fait sauter au moyen de la poudre à canon, et où il s'est formé des gerçures par l'ébranlement qu'ils ont éprouvé, sont sujets, dans le même cas, à éclater en divers endroits. Il est bon que les artistes connaissent la cause de ces accidens, pour être à portée de les prévenir.

### *De la Congélation du Mercure.*

405. Le mercure est, après l'eau, celui de tous les liquides dont la congélation ait donné lieu aux observations les plus intéressantes. Cette substance, qui paraît jouer un rôle si singulier dans la nature, n'est réellement qu'un métal capable d'entrer en fusion par une température incomparablement moins élevée que celle qu'exigent les métaux ordinaires pour se fondre, ce qui seul indique que le degré de froid nécessaire pour le solidifier est bien en deçà du zéro de nos thermomètres. Déjà Delisle et Gmelin avaient vu le mercure se congeler naturellement en Sibérie, dans les thermomètres dont ils faisaient usage. Mais ce phénomène était resté inconnu, ou avait été révoqué en doute, lorsqu'au mois de décembre 1759, M. Braun, membre de l'Académie de Pétersbourg, ayant profité d'un froid très rigoureux qui régnait alors dans cette ville, et qui était de  $-31^{\text{d}}$  de Fahrenheit (ce qui répond à  $29\frac{1}{3}$  au dessous de zéro du thermomètre en 80 parties), parvint à l'aide d'un mélange de glace pilée et d'acide nitrique, à faire descendre le mercure dans le tube de son thermomètre, jusqu'à  $-69^{\text{d}}$  de Fahrenheit ( $-44^{\text{d}}\frac{8}{9}$  du thermomètre en 80 parties). Il vit alors qu'une partie du mer-

cure s'était congelée, et encouragé par ce premier succès, il poursuivit ses expériences, en substituant de la neige à la glace; le mercure continua de descendre, et parvint, dans une dernière expérience, jusqu'à  $-352^d$  ( $-170^d \frac{2}{3}$  du thermomètre en 80 parties). M. Braun ayant retiré du mélange son thermomètre, et en ayant soigneusement examiné la boule, n'y aperçut aucune fissure; en même temps il vit que le mercure était immobile, ce qui dura pendant environ douze minutes. Quelques jours après il répéta l'expérience avec *Æpinus*; et étant encore parvenu à fixer le mercure, il brisa la boule de son thermomètre, et en retira le métal sous la forme d'une masse solide brillante, qui s'étendit par la percussion, en rendant un son sourd semblable à celui du plomb, dont elle se rapprochait aussi beaucoup par sa dureté (1).

On ne pouvait plus douter alors que le mercure ne fût susceptible d'une congélation proprement dite, mais on était loin de connaître le véritable degré de froid qui suffisait pour la produire. M. Braun et plusieurs autres physiciens ont jugé ce degré beaucoup plus bas qu'il n'était en effet, pour avoir confondu deux effets très distincts; savoir, la température qu'avait ce métal au moment de la congélation, et la contraction considérable qu'il éprouvait en achevant de se fixer, ce qui le mettait en contraste, sous ce rapport, avec l'eau, qui, comme nous l'avons vu, éprouve au contraire une dilatation, avant d'atteindre le terme où elle se congèle.

406. L'idée qui devait conduire à la détermination de cette limite, qui est relativement au mercure ce qu'est à l'égard de l'eau le zéro du thermomètre en 80 parties, se présenta en même temps à *Black* et à *Cavendish*, deux des hommes les plus faits pour se rencontrer. Ils raisonnèrent du mercure comme de l'eau elle-même, dont la température est sensiblement constante, depuis le moment où ce liquide commence à se congeler, jusqu'à celui où toute la masse est devenue solide. M. *Cavendish*, pour rendre encore plus frappante l'analogie suggérée par cette

---

(1) *Nov. Comment. Acad. Scient. imper. Petropol.*, t. XI.

observation, en fit l'application à des métaux aisément fusibles, tels que le plomb et l'étain; et il trouva qu'un thermomètre plongé dans l'un ou l'autre de ces métaux, demeurait stationnaire pendant tout le temps du passage de la liquidité à la solidité (1).

L'appareil destiné pour les expériences relatives au mercure, consistait en un petit thermomètre à mercure, que l'on introduisait dans un matras de verre dont la boule était remplie du même métal, et environnée d'un mélange de matières frigorigènes. On voyait le mercure descendre progressivement dans le tube du thermomètre, jusqu'au moment où commençait la congélation de celui qui était dans le matras, et s'arrêter ensuite au même point, pendant tout le temps qu'elle continuait de s'opérer. On trouva que le terme indiqué alors par le mercure du thermomètre répondait environ à  $-39^{\text{d}}$  de Fahrenheit ( $-31^{\text{d}}\frac{1}{2}$  du thermomètre en 80 parties). Si l'on employait un thermomètre à alkohol construit d'après cette même division, on avait à peu près 28 degrés au-dessous de zéro, pour le terme correspondant.

407. L'expérience de la congélation du mercure a été répétée plusieurs fois à Paris depuis quelques années. Les personnes qui ont eu le courage de prendre avec la main le métal figé, ont éprouvé une sensation douloureuse, dont elles n'ont pu donner une plus juste idée qu'en la comparant à celle que produit une forte brûlure. Rien ne justifiait mieux le langage des poètes qui, pour peindre un froid très vif, l'ont appelé un *froid brûlant*.

## Cristallisation des Substances métalliques par le refroidissement.

408. La plupart des métaux, en se solidifiant après avoir été fondus, subissent une cristallisation régulière. Le calorique agit ici par rapport à un métal en fusion, comme les liquides ordinaires à l'égard d'un sel qu'ils tiennent à l'état de dissolution.

---

(1) Philosoph. Transact., 1783, p. 313.

Dans l'un et l'autre cas, c'est la retraite de la substance d'abord interposée entre les molécules métalliques ou salines, qui leur permet de se rapprocher et de s'unir sous des formes géométriques, lorsqu'elle se fait assez lentement pour leur donner le loisir de prendre l'arrangement qui s'accorde avec les lois de la cristallisation.

Les premiers indices que l'on ait observés de ces phénomènes, paraissent avoir été ces espèces d'étoiles branchues qui se forment sur la surface de l'antimoine. Ce fut aux yeux des alchimistes qu'elles se présentèrent d'abord, et ils expliquèrent le fait en alchimistes : c'était une étoile d'heureux présage, qui leur promettait la métamorphose de l'antimoine en or.

Les expériences faites sur le bismuth par Brongniart, professeur au Muséum d'Histoire naturelle, ont offert le premier exemple d'un métal converti en cristaux saillans, par un procédé semblable à celui que Rouelle avait employé par rapport au soufre, et qui consiste à laisser d'abord figer la surface du métal, puis à percer cette espèce de croûte et à survider le creuset. Lorsqu'on brise ensuite ce creuset, après l'entier refroidissement, on en trouve la cavité toute tapissée de cristaux, qui présentent, suivant les circonstances, des groupes d'octaèdres ou de cubes disposés sur des lignes perpendiculaires entre elles, et rentrantes comme les contours d'une volute.

On a cru que le vide laissé par le métal qui était sorti du creuset, en donnant accès à l'air, favorisait la production des cristaux. La vérité est que ces cristaux se forment au milieu même du métal encore en fusion, par le rapprochement des parties qui se refroidissent les premières. Il en est de ce métal, à peu près comme de l'eau qui se congèle au milieu de l'eau même encore liquide. On ne fait autre chose, en survivant le creuset, que mettre à nu les cristaux déjà formés, et les dégager de la matière métallique enveloppante, avec laquelle ils ne feraient bientôt plus qu'une masse solide après le refroidissement. C'est ce dont on peut s'assurer en cernant, avec la pointe d'un canif, la croûte qui s'est formée à la surface; on retirera cette croûte couverte en dessous de cristallisations semblables à celles que nous avons

décrites. Le bismuth est un des métaux qui se prêtent le plus facilement à ce genre d'observations.

### 3. De l'Eau à l'état de Vapeur.

Nous nous sommes déjà occupés de ce sujet, en traitant du calorique, qui est le principal agent des phénomènes qu'il présente. Il ne nous reste plus qu'à exposer plusieurs détails que nous n'avons point fait entrer d'abord dans le tableau de ces phénomènes, pour y répandre plus de netteté, en n'y laissant distinguer, à la première vue, que ceux qui ont une liaison plus étroite avec les principes de la théorie. Nous nous bornerons aux résultats qui concernent la vapeur considérée en elle-même, et nous réserverons pour l'article de l'air d'autres détails qui dépendent de l'union de la vapeur avec ce fluide.

409. Lorsque l'ébullition, qui annonce l'instant où la vapeur parvient à son *maximum*, est produite au moyen du feu, que nous supposons agir en dessous du vase qui contient le liquide, la couche inférieure de celui-ci recevant immédiatement le calorique qui s'introduit dans le vase, doit aussi être la première à se vaporiser. Mais le même effet a lieu sous un récipient où l'on fait le vide, pour déterminer l'ébullition par une température beaucoup plus basse que celle qui serait nécessaire sous la pression de l'atmosphère (220). Dans ce cas, le refroidissement occasionné par la raréfaction de l'air renfermé sous le récipient (229), agit sur la couche supérieure, et de proche en proche sur les suivantes, par des degrés toujours décroissans; d'où il suit que la couche la plus basse qui conserve le plus de chaleur, doit encore fournir les premières bulles.

410. Lorsque l'eau vaporisée rencontre les corps voisins dont la température est beaucoup plus basse que la sienne, elle leur cède à l'instant une grande partie du calorique qui la tenait à l'état de fluide élastique, et reprenant l'état de liquide, elle adhère à la surface de ces corps sous la forme d'une couche d'humidité. De là cette vive impression de chaleur que ressent la main ou toute autre partie du corps qui se trouve exposée subitement à la vapeur de l'eau.

411. L'extinction du feu, produite par l'injection de l'eau sur les corps embrasés, n'est autre chose, dans les idées du vulgaire, que l'effet d'une espèce de lutte entre deux substances ennemies, dont l'une arrête les progrès de l'autre. La véritable explication du phénomène est que l'eau intercepte d'une part le contact de l'air avec le corps combustible, et d'une autre part enlève, en se vaporisant, une partie du calorique nécessaire pour produire entre les molécules du même corps un écartement qui les dispose à s'unir avec l'oxygène de l'air.

412. Tandis que l'eau encore liquide s'échauffe de plus en plus, ses dilatations varient dans un rapport sensiblement plus grand que les accroissemens de chaleur, et cette différence est surtout marquée aux approches de l'ébullition. C'est ce que l'on concevra en faisant attention que quand la distance entre les molécules aqueuses s'est accrue à un certain point, par la force élastique du calorique, l'affinité, qui n'agit très sensiblement que près du contact, doit diminuer toujours plus rapidement, même en supposant des augmentations égales de chaleur, en sorte que les dilatations, au contraire, croîtront dans un très grand rapport. Cependant l'effet total de la dilatation, depuis le terme de la glace fondante jusqu'à celui de l'eau bouillante, se borne à augmenter d'environ  $\frac{1}{26}$  le volume de l'eau. Mais au moment de l'ébullition, la dilatation fait un saut brusque; et suivant les expériences les plus modernes, la vapeur se développe rapidement dans un espace dix-sept cent vingt-huit fois plus grand que celui qu'occupait l'eau dans l'état de simple liquidité, en sorte que chaque pouce cube de cette eau produit un pied cube de vapeur.

413. C'est à cette grande expansion de l'eau vaporisée qu'est dû l'effet de l'éolipyle, que l'on a si long-temps attribué à la dilatation de l'air. On appelle ainsi un vase de métal en forme de poire creuse, dont la queue est un tube recourbé. On chauffe le vase pour chasser une grande partie de l'air qu'il renferme, puis on plonge l'orifice du tube dans l'eau, jusqu'à ce que ce liquide, que la pression de l'air environnant introduit dans la capacité du vase, en remplisse la moitié ou au plus les deux tiers. On place ensuite l'éolipyle, le fond tourné en bas, sur des charbons ardents,

et l'on anime le feu jusqu'à ce qu'un souffle violent sorte par l'orifice du tube. Enfin on incline l'éolipyle de manière que son tube soit situé verticalement, l'orifice en haut, et l'on continue de le chauffer. Aussitôt la partie de l'eau encore liquide, chassée par la vapeur, s'élançe sous la forme d'un jet qui s'élève quelquefois à la hauteur de 8 mètres ou d'environ 25 pieds. Si la liqueur est de l'alcool, on aura un jet de feu en présentant un flambeau allumé à peu près à un décimètre au-dessus de la naissance du jet.

414. La vapeur de l'eau devient capable de produire des effets beaucoup plus étonnans par sa force expansive. On trouve dans les Mémoires de l'Académie des Sciences pour l'année 1707, des observations communiquées par Vauban, d'où il résulte que 140 livres d'eau convertie en vapeur, produisent une explosion capable de faire sauter une masse de 77000 livres, tandis que 140 livres de poudre ne peuvent opérer un semblable effet que sur une masse de 30000; en sorte que la force de l'eau en vapeur serait plus que double de celle de la poudre.

### *Des Machines à Vapeur.*

Des effets aussi puissans que ceux dont nous venons de parler ne devaient pas demeurer stériles pour les besoins des arts: c'était une nouvelle force motrice que la Mécanique demandait au génie qui l'avait créée, et en avait mesuré l'énergie. Cette science, pendant long-temps, n'avait employé l'eau, sous ce rapport, qu'en profitant de son cours naturel, ou en lui ménageant une chute, pour lui soumettre le jeu des machines qu'elle dirigeait par une impulsion toujours renaissante. Les expériences entreprises sur la force de l'eau réduite en vapeur, firent naître l'idée de l'appliquer avec d'autant plus d'avantage au même objet, qu'indépendamment de sa grande énergie, elle peut être transportée partout où l'appelleront les intérêts du commerce et de l'industrie.

415. L'exécution des machines à vapeur a eu, comme celle de toutes les autres machines, ses différentes époques, auxquelles

répondent successivement de nouveaux degrés de perfection. Diminuer, autant qu'il est possible, la quantité de l'évaporation nécessaire à l'effet qu'on a en vue, et par là, ménager le combustible; joindre à cette première économie celle de la matière et de la main-d'œuvre, en resserrant les dimensions des pièces, sans nuire aux résultats; prévenir les explosions, par de sages précautions prises contre un agent dont la puissance devient destructive quand elle n'est pas limitée : tels sont en général les objets qui ont fixé l'attention des constructeurs, et excité entre eux une sorte de rivalité. Nous nous bornerons aux moyens de perfection qui marquent le plus, et nous n'entrerons dans la description des machines, qu'autant qu'elle sera nécessaire pour l'intelligence de l'effet principal.

Tous les mouvemens de la machine à vapeur tirent leur origine du jeu d'un piston qui s'élève et s'abaisse alternativement dans un tuyau cylindrique, en communication avec une chaudière où la vapeur se forme par l'action du feu que l'on entretient en dessous. La manière dont la vapeur contribue au jeu du piston varie suivant les différentes méthodes; et notre objet est surtout de comparer ces méthodes, et de faire voir les nouveaux avantages qu'elles amenaient avec elles à mesure qu'elles se succédaient l'une à l'autre.

416. La première méthode dont le succès se soit annoncé par un empressement général à l'imiter, est celle qu'on attribue communément à un Anglais, nommé Savery, mais dont l'invention est due à deux autres Anglais; l'un s'appelait Newcomen, et l'autre Jean Cawley. La machine qui appartient réellement à Savery, avait beaucoup de rapport avec la fontaine de compression que nous décrirons à l'article de l'Air, et dans laquelle ce fluide condensé exerce sur l'eau une pression qui la détermine à s'élaner par un canal qui lui offre une libre issue; toute la différence consistait en ce que Savery substituait la force de la vapeur à celle de l'air comprimé. Savery, en s'associant Newcomen, s'empara de sa découverte, et son ambition éclipsa bientôt l'homme simple et modeste qui bornait la sienne à bien faire.

Pour concevoir le jeu de la machine dont il s'agit, supposons

que le piston soit descendu au point le plus bas de sa course; à l'instant la communication s'ouvre entre la chaudière et le fond du cylindre, par un mouvement de côté que fait un cercle nommé *régulateur*, qui, auparavant, fermait cette communication; la vapeur s'introduit en dessous du piston, et le pousse de bas en haut par sa force expansive. Lorsqu'il a fini de monter, le régulateur se remet à sa place et, au moyen d'un robinet qui s'ouvre à l'instant, un jet d'eau froide sort d'un tuyau abouché au cylindre, et va frapper la base inférieure du piston, d'où retombant sous la forme d'une pluie, il condense la vapeur, et en détruit l'effet. Alors l'air atmosphérique, qui agit par sa pression sur la base supérieure du piston, le détermine à descendre; après quoi l'émission de la vapeur et les autres effets se succèdent de nouveau, de manière à perpétuer les mouvemens alternatifs du piston.

Le haut de la tige du piston est attaché à l'une des extrémités d'un balancier, dont l'extrémité opposée fait mouvoir en sens contraire la tige d'un second piston adapté à une véritable pompe, dans laquelle l'eau s'élève à l'ordinaire.

Cette machine avait surtout deux inconvéniens dont on ne tarda pas à s'apercevoir: d'une part l'injection d'eau froide en se faisant dans le cylindre même, en refroidissait les parois; d'une autre part, on était obligé de tenir la base supérieure du cylindre toujours couverte d'eau, tant pour empêcher le dessèchement des cuirs, que pour fermer tout accès à l'air dans la partie inférieure du cylindre où s'introduisait la vapeur; d'où il arrivait que le piston, pendant sa descente, humectait à son tour les parois du cylindre. Pour compenser l'effet du refroidissement produit par les deux causes dont nous venons de parler, il fallait fournir une plus grande quantité de vapeur, d'où résultait un double défaut d'économie dans l'emploi du métal dont on faisait la chaudière qui devait avoir une plus grande capacité, et dans la consommation du combustible.

417. La machine imaginée par le célèbre Wats, réunit à l'avantage de faire disparaître ces inconvéniens, une perfection qui semble l'avoir rendue neuve sous tous les rapports. Ce qui

la distingue principalement , est le double emploi de la vapeur ; dont une partie s'introduit en dessous du piston , comme dans la machine attribuée à Savery , et l'autre en dessus du même piston , en sorte que l'intérieur du cylindre n'a aucune communication avec l'air atmosphérique , qui n'entre pour rien dans le jeu de la machine. De plus, l'extrémité du balancier , opposée à celle qui conduit le piston du cylindre à vapeur , est chargée d'un contre-poids dont nous verrons l'usage dans un instant. Enfin le bas du cylindre communique avec un tuyau nommé *condenseur* , qui est placé de côté , et dans lequel s'opère la condensation.

Supposons maintenant le piston arrivé au point le plus haut de sa course , en sorte qu'il y ait un vide dans toute la partie du cylindre située en dessous , et que le piston ne soit retenu dans sa position que par l'action du contre-poids dont nous avons parlé. Dans cet état de choses , la vapeur entre par dessus le piston , et sa force prépondérante , à l'égard de celle du contre-poids , détermine le piston à descendre jusqu'à ce qu'il ait terminé son jeu. A l'instant une nouvelle vapeur s'introduit en dessous du piston , et le force de monter jusqu'à ce qu'il se trouve en équilibre entre les deux vapeurs : alors il continue de s'élever par l'action du contre-poids , que rien n'empêche plus d'obéir à la pesanteur. A mesure que le piston monte , il refoule la vapeur qui est en dessus , et qui va se rendre sous sa base inférieure , pour remplir l'espace qu'il laisse vide par son ascension. Ce mouvement terminé , le condenseur s'ouvre , et permet à la vapeur de s'introduire dans sa cavité , où elle est condensée par une injection d'eau froide ; le piston redescend ensuite , et remonte alternativement , en vertu d'une combinaison semblable des différentes actions produites par les deux vapeurs et par le contre-poids.

On voit aisément que cette construction est beaucoup mieux ordonnée que la précédente , pour prévenir la dépense superflue de vapeur et de combustible occasionnée par le refroidissement du cylindre. La machine de Chaillot , près Paris , dans laquelle on l'a employée , et dont l'exécution est due aux talents des frères Perrier , a pour objet , comme l'on sait , d'élever l'eau d'un pui-

sard qui communique avec la Seine , pour la distribuer ensuite dans différens quartiers de Paris. Suivant le prospectus publié par les auteurs , cette machine peut fournir , dans l'espace de 24 heures , environ treize mille sept cent onze mètres cubes , ou quatre cent mille pieds cubes d'eau.

418. On ne connaissait encore ici rien de plus parfait en ce genre , lorsqu'en 1788 Bétancourt ayant fait un voyage à Londres , y vit une nouvelle machine à vapeur , exécutée par les soins de Wats et de Belton. On se contenta de lui dire que cette machine avait beaucoup d'avantages sur les autres ; mais du reste , on lui fit mystère du mécanisme , et le secret était bien gardé par la machine elle-même , pour un observateur qui ne faisait guère que passer devant un ensemble de pièces , les unes tout-à-fait intérieures , les autres masquées en partie par la disposition du bâtiment. Cependant Bétancourt devina le principe , et , de retour à Paris , il construisit un modèle où il fit l'application de ce principe par des moyens également simples et ingénieux.

Dans cette nouvelle machine , la vapeur s'introduit aussi en dessous et en dessus du piston ; mais la perfection du mécanisme consiste en ce que l'injection d'eau froide se répète des deux côtés en sorte qu'elle condense tour à tour la vapeur supérieure , en laissant à celle qui agit par dessous toute sa force pour élever le piston , et la vapeur inférieure , pour donner lieu à celle qui passe dans le haut du cylindre d'exercer de même tout son effort sur la base supérieure du piston. Il en résulte que le piston est poussé avec la même force , en montant et en descendant ; et de là naissent plusieurs avantages très marqués.

D'abord le contre-poids se trouve supprimé , et c'est une surcharge de moins pour la machine ; ensuite , l'égalité d'impulsion qui a lieu dans quelque sens que se meuve le piston , permet de l'appliquer comme une puissance uniforme à un mouvement de rotation qui agit sans interruption pour produire l'effet que l'on a en vue. Ainsi au lieu que , dans la première machine , le piston ne contribue à l'effet principal que quand il s'abaisse , ici le piston , soit en montant , soit en descendant , agit toujours

efficacement. Supposons que celui de la première machine ait une base double de celle du piston de la seconde ; la colonne de vapeur, qui presse sur la base de celui-là, exercera, toutes choses égales d'ailleurs, une pression double de celle qu'éprouve la base de l'autre. Mais dans les deux mouvemens du premier, il y en a un qui n'est que de renvoi ; d'où il suit que si le second piston, qui travaille sans cesse utilement, agit sur un levier double, il fera en deux temps ce que l'autre ne produit que pendant sa descente.

De là résulte d'abord une épargne sur la matière du cylindre, et ensuite sur celle des pièces qui en dépendent. De plus, on peut diminuer la capacité et l'épaisseur de la chaudière, parce que la vapeur n'a pas besoin de s'y accumuler comme dans l'autre, d'où elle ne sort que par intervalles. Enfin la surface de l'eau, encore liquide dans la chaudière, y étant moins comprimée par la vapeur qui se forme au-dessus, cette eau se vaporise à son tour par un moindre degré de chaleur, ce qui, joint aux autres causes, procure une grande économie de combustible.

Nous n'avons pu qu'ébaucher la description de cette machine, ainsi que des précédentes. Nous passerions les bornes que nous sommes obligés de nous prescrire, si nous entreprenions de parcourir tous les différens accessoires employés à introduire ou à condenser la vapeur, et de faire connaître les moyens qui ont été pris pour entretenir l'uniformité du mouvement, pour prévenir les accidens que pourrait occasionner une trop forte condensation, etc. Nous devons observer, à ce sujet, que dans les premiers essais de la machine à feu, il fallait des hommes spécialement chargés de tourner à chaque instant les robinets qui donnent passage à la vapeur ou à l'injection de l'eau froide. Aujourd'hui tout se réduit à la surveillance de celui qui entretient le feu ; le reste marche de soi-même. La force de la vapeur qui anime le corps de la machine, se transmet aux différentes pièces qui lui tiennent lieu de bras et de mains ; et le même génie qui a su convertir un peu d'eau pénétrée de chaleur en un agent capable de produire les mouvemens qui exigent de puissans efforts, est parvenu encore à pouvoir s'en reposer sur cette cause aveugle, de

ceux mêmes qui semblent demander une attention vigilante et des soins assidus.

Ainsi, en comparant les effets de l'eau dans ses deux états extrêmes, celui de solidité et celui de fluidité élastique, on voit, avec une double surprise, la grande énergie qu'elle déploie pour rompre ses barrières, soit lorsque ses molécules restent abandonnées à la force qui agit pour les enchaîner, soit lorsqu'elles sont lancées par la force qui tend à les écarter les unes des autres.

## V. DE L'AIR.

419. APRÈS avoir exposé les propriétés du liquide qui baigne la surface de notre globe ou coule dans son intérieur, nous allons considérer celles du fluide invisible qui l'environne jusqu'à une grande hauteur. Ici un intérêt très vif se mêle à celui que la science inspire par elle-même, pour nous solliciter vers l'étude de ce fluide, au milieu duquel nous sommes continuellement plongés, qui agit sur nous de tant de manières différentes, et auquel nous sommes redevables à la fois et de la conservation de notre vie, et de ce qui en fait un des principaux agrémens, puisque c'est à lui que nous confions d'abord nos pensées, pour les transmettre à nos semblables, avec la parole qui en est le signe.

420. On avait remarqué, de tout temps, que l'air est toujours chargé d'une quantité plus ou moins considérable de principes hétérogènes, d'émanations de différentes espèces, et surtout de vapeurs aqueuses. Mais l'air, en le supposant dégagé de toutes ces matières étrangères qui altèrent sa pureté, était regardé comme un être simple, et un des quatre élémens dans lesquels tous les corps se résolvaient en dernière analyse. Il est prouvé aujourd'hui que ce fluide est formé de deux principes très différens, dont l'un a été nommé *gaz oxigène*, et l'autre *gaz azote*. Le premier, s'il existait seul, serait trop respirable et consumerait notre vie; le second, lorsqu'on l'a obtenu isolément, suffoque les animaux qui y sont plongés. Du mélange des deux se forme un fluide parfaitement assorti aux fonctions de l'économie animale. Les détails relatifs à cet objet, ainsi que la manière dont l'air se décom-

pose par la respiration, appartiennent encore à la science qui nous a dévoilé la véritable nature de ce fluide. Nous ne l'envisagerons ici que dans son état ordinaire, et nous ramènerons à quatre points de vue les connaissances que nous avons à développer. Le premier nous offrira les propriétés dont l'air jouit le plus constamment, telles que sa pesanteur et son élasticité; le second comprendra celles qui résultent de sa dilatation par une surabondance de calorique; le troisième sera relatif à son union avec l'eau, dont il est le dissolvant; le dernier aura pour objet ce mouvement particulier de vibration, à l'aide duquel l'air devient le véhicule du son.

### 1. De la Pesanteur et du Ressort de l'Air.

421. Galilée, dont le nom se présente comme de lui-même, toutes les fois qu'il s'agit des premières recherches sur la pesanteur, avait vérifié celle de l'air, qui était niée presque généralement avant lui, quoiqu'elle eût été reconnue par quelques philosophes de l'antiquité. Ce célèbre physicien ayant injecté de l'air dans un vaisseau de verre, de manière qu'il y restât comprimé, trouva que le vaisseau pesait davantage que quand l'air y était dans son état naturel. Il chercha même, par une autre expérience, la pesanteur de ce fluide comparée à celle de l'eau; mais il la trouva seulement dans le rapport de l'unité à 400, beaucoup trop faible, comme nous le verrons dans l'instant.

#### *Idee de la Machine pneumatique.*

422. On ne connaissait point encore la machine pneumatique, à l'époque dont nous venons de parler. C'est à Otto de Guericke, le burgomestre de Magdebourg, que nous sommes redevables de l'invention de cette belle machine, qui n'a pas, comme les autres, un rang à part dans la Physique expérimentale, dont presque toutes les branches ont besoin d'elle.

Cette machine, réduite à sa plus grande simplicité, est composée d'un cylindre vertical de cuivre, dans lequel se meut un

piston, et dont la base supérieure porte un robinet, au-dessus duquel est soudée une platine circulaire, située horizontalement. C'est sur cette platine que l'on place les récipients que l'on veut purger d'air, ce qui s'exécute en faisant descendre et monter alternativement le piston. Dans le premier cas, le robinet est ouvert de manière à établir une communication entre la capacité du récipient et celle du cylindre; lorsque le piston est descendu, on ferme le robinet, dont la clef est percée d'une ouverture tellement disposée, qu'elle donne une issue à l'air que le piston chasse en se relevant, sans lui permettre de rentrer dans le récipient. On a beaucoup varié la construction de cette machine, et les Anglais en ont imaginé une à deux corps de pompe, dont les pistons jouent au moyen d'une manivelle et d'une roue dentée; diverses soupapes ouvrent et ferment alternativement la communication entre le récipient et les corps de pompe, et entre ces derniers et l'air extérieur, en sorte que l'on ne fait mouvoir le robinet que deux fois, l'une avant l'expérience, pour donner un passage à l'air qui doit sortir du récipient, l'autre à la fin, pour maintenir le vide.

### *Expériences sur la Pesanteur de l'Air.*

423. Munis de l'instrument que nous venons de décrire, les physiciens ont constaté la pesanteur de l'air, par une expérience très simple, qui consiste à peser d'abord un ballon plein d'air, puis à le peser de nouveau, après y avoir fait le vide : on s'aperçoit d'une diminution sensible dans le poids du ballon.

On a cherché aussi à déterminer exactement la pesanteur spécifique de l'air. Suivant les résultats de Deluc, le rapport entre les poids de l'air et de l'eau distillée, à la température de la glace fondante, sous une pression moyenne de 28 pouces de mercure, est celui de 1 à 760. M. Biot, dans une expérience plus récente, faite avec une extrême précision, a trouvé  $\frac{1}{770,30}$  pour le rapport dont il s'agit.

### *Cause de l'élevation de l'Eau dans les Pompes.*

424. La pesanteur de l'air une fois reconnue, il semble qu'il n'était pas difficile d'apercevoir que c'est à la pression de ce fluide qu'est due l'ascension de l'eau dans les corps de pompe. Mais il a fallu, pour amener là les physiciens, une de ces observations inattendues, faites pour exciter dans les esprits cette espèce d'inquiétude et d'agitation favorable aux découvertes.

On se rappelle que les anciens philosophes, quand on leur demandait pourquoi l'eau montait dans les pompes, se tiraient d'affaire, en répondant que la *nature avait horreur du vide* ; ce qui n'était autre chose qu'une manière fastueuse et imposante d'avouer qu'ils n'en savaient rien. Des fontainiers italiens, s'étant avisés de vouloir faire des pompes aspirantes dont les tuyaux avaient plus de trente-deux pieds de hauteur, remarquèrent, avec surprise, que l'eau refusait de s'élever au-dessus de cette limite. Ils demandèrent à Galilée l'explication de ce fait singulier ; et l'on prétend que ce philosophe, pris au dépourvu, répondit que la nature n'avait horreur du vide que jusqu'à trente-deux pieds. Torricelli, disciple de Galilée, ayant médité sur le phénomène, conjectura que l'eau s'élevait dans les pompes par la pression de l'air extérieur, et que cette pression n'avait que le degré de force nécessaire pour contre-balancer le poids d'une colonne d'eau de trente-deux pieds.

Il vérifia cette conjecture par une expérience dont la Physique lui a doublement obligation, parce qu'en servant à mettre en évidence une découverte importante, elle nous a procuré le baromètre. Torricelli vit le mercure s'arrêter à 28 pouces dans un tube de verre scellé à sa partie supérieure et situé verticalement ; et la hauteur dont il s'agit, étant à celle de trente-deux pieds dans le rapport inverse des densités de l'eau et du mercure, il en conclut que le phénomène appartenait à la Statique, et que c'était réellement, comme il l'avait deviné, la pression de l'air qui déterminait l'eau ou le mercure à s'élever jusqu'à ce qu'il y eût équilibre.

Ceci se passait en 1643. L'année suivante, la nouvelle de l'expérience de Torricelli se répandit en France par une lettre écrite d'Italie au père Mersenne. L'expérience fut faite de nouveau en 1646, par Mersenne et Pascal; et celui-ci imagina, en 1647, un moyen de la rendre encore plus décisive, en la faisant à différentes hauteurs. Il invita, en conséquence, son ami Périer à la répéter sur la montagne du Puy-de-Dôme, et à observer si la colonne de mercure descendrait dans le tube à mesure qu'on s'éleverait davantage. On voit par la lettre de Pascal à Périer, où il semble éviter de nommer Torricelli, qu'il n'avait pas encore tout-à-fait renoncé à la chimère de l'horreur qu'on avait attribuée à la nature pour le vide, et qu'en convenant que cette horreur n'était pas invincible, il n'osait assurer qu'elle n'eût pas lieu dans quelques circonstances. Le plein succès de l'expérience acheva de le désabuser. Mais cette expérience n'était que confirmative de celle de Torricelli, et ajoutait seulement un rayon de plus au trait de lumière qui en était sorti.

### *Effets de la Pression de l'Air sur le corps de l'Homme.*

425. La pression de l'atmosphère sur une surface donnée, étant à peu près la même qu'exercerait sur cette surface une colonne d'eau de trente-deux pieds de hauteur, on a calculé, d'après cette donnée, l'effet de la pression dont il s'agit, par rapport à un homme de moyenne grandeur, et on a trouvé qu'elle équivaut à un poids de 33600 livres, environ 16000 kilogrammes. Voilà le poids dont étaient chargés les anciens philosophes, qui niaient sérieusement la pesanteur de l'air.

Quelque considérable que soit ce poids, sa pression s'exerce, pour ainsi dire, à notre insu, parce qu'elle est continuellement balancée par la réaction des fluides élastiques renfermés dans les cavités intérieures du corps; et quoique l'air soit sujet à des variations continuelles, qui augmentent ou diminuent sa densité, par une suite du changement de température et de l'action de diverses causes naturelles, comme ces variations,

en général, sont renfermées entre des limites peu étendues, et qu'elles se font successivement et avec lenteur, elles ne nous affectent, pour l'ordinaire, que d'une manière peu sensible. Mais s'il arrive un changement brusque, comme lorsque l'homme s'élève à de grandes hauteurs, la rupture d'équilibre qui en résulte a une influence très marquée sur l'économie animale. On éprouve alors une fatigue extrême, une impuissance absolue de continuer sa marche, un assoupissement auquel on succombe malgré soi : la respiration devient pressée et haletante; les pulsations du pouls prennent un mouvement accéléré (1). Pour expliquer ces effets, on a considéré que l'état de bien-être, dans tout ce qui dépend de la respiration, exige qu'une quantité d'air déterminée traverse les poumons dans un temps donné. Si donc l'air que nous respirons devient beaucoup plus rare, il faudra que les inspirations soient plus fréquentes à proportion; ce qui rendra la respiration pénible, et occasionnera les divers symptômes dont nous avons parlé.

A l'égard des inconvéniens qui résulteraient d'un air trop condensé, l'homme n'y est pas exposé par l'action des causes naturelles; et il paraît qu'en général ils sont moindres que ceux qui ont pour cause la raréfaction de l'air. On ne peut citer ici comme une preuve de la grandeur de ces inconvéniens ce qui arrivait aux plongeurs, lorsqu'ils étaient renfermés sous une cloche qui descendait verticalement dans l'eau, et où l'air, pressé par le poids des colonnes environnantes, se contractait de plus en plus, à mesure que le vase se trouvait à une plus grande profondeur. Les accidens qui survenaient à l'homme qui avait séjourné pendant un certain temps sous la cloche, dépendaient, en grande partie, de l'altération produite dans l'air par la respiration, et ce qu'avait de plus dangereux ce fluide, était le défaut de renouvellement.

---

(1, Saussure. Voyage dans les Alpes, numéros 559 et 2021.

*Du Baromètre.*

426. Les détails relatifs à la construction du baromètre trouvent naturellement ici leur place. Cet instrument, ramené à sa plus grande simplicité, consiste dans un tube de verre de plus de trente pouces de hauteur, et scellé par le haut. On remplit ce tube de mercure, que l'on a soin de faire bouillir pour le purger d'air; puis en tenant le doigt appliqué sur l'orifice inférieur, on renverse le tube, et on le plonge, par le même côté, dans une cuvette de verre, où l'on a versé pareillement du mercure. On retire le doigt, et l'on voit à l'instant le mercure descendre dans le tube, à la hauteur d'environ 28 pouces; on attache ensuite le tube avec sa cuvette sur une planche divisée en pouces et en lignes, à partir du niveau que donne le mercure renfermé dans la cuvette. On a ainsi un moyen d'observer les variations que subit la pression de l'air, en vertu des causes d'où dépendent les phénomènes de la météorologie.

427. Cette construction est sujette à une imperfection qui empêche que les mouvemens de la colonne de mercure, estimés d'après les indications de l'échelle, ne soient exactement proportionnels aux différentes pressions de l'air; car, à mesure que cette colonne monte ou descend, elle détermine une petite portion du mercure que renferme la cuvette, à passer dans le tube, ou à rentrer dans cette cuvette, ce qui fait varier la position du niveau; en sorte qu'il ne répond pas constamment au zéro de l'échelle, qui est cependant le terme de départ auquel se rapporte l'observation de la hauteur à laquelle répond l'extrémité de la colonne sur la même échelle. Cette imperfection est d'autant moins sensible, que la cuvette a plus de largeur vers l'endroit de la ligne de niveau. On a imaginé différens moyens pour la faire disparaître: par exemple, dans certains baromètres; on a rendu l'échelle mobile dans le sens de sa hauteur; de manière qu'à l'aide d'une vis de rappel, on est toujours maître de ramener la ligne de niveau à se trouver exactement vis-à-vis le zéro de l'échelle. On substitue alors à la cuvette une portion du tube même de l'in-

strument, qui, dans ce cas, est recourbé par sa partie inférieure, la variation sensible de niveau qui en résulte, pouvant toujours être corrigée par le mouvement de l'échelle. D'autres physiciens emploient une seconde cuvette d'une plus grande capacité, et remplie en partie de mercure, dans laquelle la cuvette du baromètre est entièrement plongée. Lorsqu'on veut faire une observation, on élève le baromètre avec sa cuvette au-dessus du mercure environnant; et comme alors cette cuvette se trouve toujours pleine, la ligne de niveau donnée par la surface supérieure du mercure qu'elle contient, conserve une position fixe, par rapport à la graduation.

428. On voit par ce qui précède, que l'échelle du baromètre est réglée d'après un tout autre principe que celle du thermomètre. Les mouvemens de la liqueur, dans ce dernier instrument, se mesurent en parties proportionnelles à la distance entre les deux limites données par l'observation; ils diffèrent dans les divers thermomètres, quoique par des degrés semblables, quand les circonstances sont les mêmes: dans le baromètre, au contraire, où il n'y a qu'un terme fixe, savoir, le niveau qui s'établit de lui-même dès le premier instant, la hauteur de la colonne se mesure d'une manière absolue; et elle augmente ou diminue par des degrés égaux, dans les différens baromètres soumis aux mêmes variations de l'atmosphère.

429. Si l'on veut introduire la division décimale dans l'échelle du baromètre, les limites des variations de la colonne, qui s'étendent dans l'espace compris à peu près entre le 26<sup>m</sup> et le 29<sup>m</sup> pouce, répondront, l'une à 70, et l'autre à 78 centimètres, depuis la ligne de niveau, ce qui fait huit centimètres pour le champ de l'observation: dans le même cas, l'élévation de 28 pouces répondra à 758 millimètres.

430. La hauteur moyenne du baromètre étant, comme nous venons de le voir, d'environ 0<sup>m</sup> 76 et le rapport entre les pesanteurs spécifiques du mercure et de l'air, relatives à cette même hauteur, étant celui de 10475,68 à l'unité, d'après une expérience que nous citerons dans la suite, on déterminerait facilement la hauteur de l'atmosphère, si l'air dont celle-ci est com-

posée avait partout la même densité qu'auprès de la surface de la terre. Il suffirait, dans cette hypothèse, de multiplier le rapport dont il s'agit par  $0^{\text{m}^{\text{ét}}},76$  ce qui donnerait  $7961^{\text{m}^{\text{ét}}},5$ , ou environ 4084 toises, pour la hauteur cherchée. Mais cette détermination est bien éloignée de la véritable, à cause de la diminution que subit la densité de l'air, à mesure que ses différentes couches sont plus éloignées de la terre. Nous ferons connaître, en parlant des lois auxquelles est soumise la lumière, un autre moyen qui tend plus directement vers le même but, quoiqu'il laisse encore de l'incertitude sur le résultat que l'on en a déduit.

### *Expériences sur le ressort de l'Air.*

431. L'élasticité de l'air est constatée par diverses expériences très connues. Une des plus ordinaires est celle dans laquelle on emploie la machine appelée *fontaine de compression*. Elle consiste en un vase de métal d'une forme arrondie, dont le sommet est percé d'une ouverture, au moyen de laquelle on le remplit d'eau jusqu'aux deux tiers environ de sa capacité. On visse ensuite à l'endroit de la même ouverture un tube qui descend dans le vase jusqu'à une petite distance du fond, et dont la partie supérieure qui dépasse l'ouverture est garnie d'un robinet. On adapte à cette même partie une pompe foulante, et le robinet étant ouvert, on injecte une grande quantité d'air dans l'intérieur du vase : cet air, plus léger que l'eau, s'élève au-dessus, et son ressort augmente avec sa densité, à mesure qu'on donne de nouveaux coups de piston. On ferme le robinet, on dévisse la pompe, et on lui substitue une espèce de petit cône creux, ouvert par son sommet, qui est tourné en haut; dès que l'on ouvre de nouveau le robinet, l'air condensé déployant sa force sur la surface de l'eau, la chasse par le canal plongé dans ce liquide, qu'on voit s'élançer en dehors, sous la forme d'un jet de dix mètres (environ trente pieds) de hauteur ou davantage.

On peut obtenir un effet analogue, par le seul débânement du ressort naturel de l'air, en plaçant sous le récipient de la machine pneumatique un petit vase où tout soit semblable à ce

qu'offre la fontaine de compression, au moment où l'on ouvre le robinet pour donner un libre passage à l'eau, excepté que l'air situé au-dessus de ce liquide est dans son état ordinaire. Tandis que l'on fait le vide, l'air renfermé dans le vase, et dont la pression sur l'eau n'est plus balancée par celle de l'air extérieur, se dilate, et fait naître un jet qui s'élève sous le récipient.

*Divers Phénomènes produits par la Pesanteur et par le Ressort de l'Air.*

432. Si l'on suppose pour un instant, que l'air de l'atmosphère ait partout la même densité, et que l'on fasse attention ensuite à l'effet de la pesanteur sur les différentes couches de ce fluide élastique, il est aisé de concevoir que chaque couche, comprimée par le poids des couches supérieures, se resserrera dans le sens de sa hauteur, et que de plus, la densité des couches diminuera à mesure qu'étant à une plus grande distance de la surface de la terre, elles seront pressées par un plus petit nombre de couches supérieures. C'est effectivement ce qui a lieu par rapport à l'atmosphère. Nous ferons connaître dans la suite la loi de ce décroissement, et le parti qu'on en a tiré pour mesurer les hauteurs à l'aide du baromètre.

438. On concevra de même qu'une partie quelconque d'une colonne de l'atmosphère, prise à la surface de la terre, doit toujours faire équilibre, par son ressort, à la pression de la partie supérieure. Ainsi l'air, exactement renfermé dans une coupe que l'on aurait posée dans une situation renversée, sur un plan parfaitement uni, ferait autant d'effort pour pousser le fond du vase de bas en haut, que l'air extérieur pour le pousser en sens contraire; de sorte que l'on n'éprouverait aucune difficulté à soulever ce vase, ce qui est d'ailleurs conforme à l'observation.

Mais si l'on supprime une quantité plus ou moins considérable d'air intérieur, comme cela a lieu lorsqu'on fait le vide sous le récipient de la machine pneumatique, alors la pression de l'air extérieur n'étant plus équilibrée par l'action contraire de celui qui reste sous le récipient, il en résultera une difficulté d'autant plus

grande pour détacher ce récipient de la platine, que le vide approchera plus d'être parfait.

434. Il suit encore des principes établis précédemment, que si l'on prend à la surface de la terre une certaine quantité d'air dont le ressort fera par conséquent équilibre à une pression d'environ 76 centimètres de mercure, et qu'on introduise cet air dans un espace vide où il puisse se dilater, sa force de ressort, diminuée par la dilatation, sera à la force primitive, en raison inverse des volumes ou des espaces relatifs aux deux états successifs de ce fluide. Cette conséquence peut être vérifiée à l'aide d'une expérience intéressante, qui consiste à introduire dans un baromètre ordinaire une quantité d'air déterminée, en employant pour mesure un tube de même diamètre que celui du baromètre, et dont la hauteur soit connue. Cet air, parvenu au-dessus de la colonne de mercure, s'étendra par son ressort, dans le vide qui se trouve en cet endroit, et fera baisser le mercure jusqu'à ce que sa force de ressort, jointe au poids de ce qui restera de mercure dans le tube, fasse équilibre à la pression de l'atmosphère. On pourra déterminer d'avance, par un calcul simple, la hauteur de l'espace dans lequel cet air doit se répandre, ou, ce qui revient au même, la hauteur à laquelle s'arrêtera la colonne de mercure. Par exemple, si le tube a 90 centimètres de hauteur, et qu'on y introduise 8<sup>cent.</sup>,25 d'air, on trouve, en supposant que la pression de l'air atmosphérique à laquelle était d'abord soumis le mercure, fût de 76 centimètres, que ce liquide descendra à 57 centimètres au-dessus du niveau; en sorte que l'espace occupé par l'air sera de 33 centimètres (1).

---

(1) Soit en général,  $h$  la hauteur du tube, à partir de la ligne de niveau,  $p$  la pression de l'atmosphère,  $n$  la quantité d'air, ou la partie de la hauteur du tube qu'occuperait ce fluide s'il conservait sa densité primitive, et soit  $x$  la hauteur à laquelle le mercure s'arrêtera après la dilatation de l'air;  $h-x$  sera la partie de la hauteur du tube dans laquelle l'air se répandra en se dilatant. Or les espaces occupés par l'air dans ses deux états, étant en raison inverse des densités, on aura  $h-x : n :: p : \frac{np}{h-x}$ , qui exprimera la densité ou la force de l'air dilaté. Mais cette dernière quantité, augmentée de  $x$ ,

## Fontaine Intermittente.

435. Ce que nous venons de dire nous conduit à l'explication des effets produits par la fontaine à laquelle on a donné le nom d'*intermittente*, et dont voici la construction : ABC (*fig. 40*) est un globe de verre ou de toute autre matière, percé de plusieurs trous, auxquels sont adaptés de petits tubes  $n, o, r, s$ , et traversé dans le sens de son axe vertical par un tube CZ, dont la partie supérieure  $i$  s'élève jusqu'à une petite distance du sommet  $o$ , et dont la partie inférieure s'emboîte exactement dans un cylindre creux SD, fixé au fond d'une cuvette MT. Le bas de ce cylindre est échanuré latéralement en  $u$ , en sorte qu'il y a une communication libre entre l'air renfermé dans le vase ABC et l'air extérieur. La cuvette MT est percée d'un petit trou, au moyen duquel elle communique avec un réservoir K placé en dessous. Lorsqu'on veut faire usage de cette fontaine, on retire le tube CZ du cylindre SD, puis on le renverse, et l'on s'en sert pour introduire de l'eau dans le vase ABC, jusqu'à ce qu'il soit plein. On

---

qui exprime la hauteur et en même temps la force du mercure, doit faire équilibre à la pression de l'atmosphère. Donc  $\frac{np}{h-x} + x = p$ , d'où l'on tire  $x^2 - (h+p)x = np - hp$ , et  $x = \frac{h+p}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{4np + (h-p)^2}$ .

Si l'on fait  $h = 90^{\text{cent}}$ ,  $p = 76^{\text{cent}}$ ,  $n = 8^{\text{cent}}$ , 25 comme ci-dessus, on trouve  $x = 57$  et  $x = 109$ . La première valeur convient à la supposition présente, et elle donne  $76 - 57$ , ou 19 centimètres pour l'expression de la force de l'air dilaté. La seconde valeur est relative à un autre problème, dans lequel on supposerait un tube fermé par le bas, ouvert par le haut, et d'une hauteur égale à  $h$ . On supposerait de plus au fond du tube une colonne de mercure, dont la hauteur, ou ce qui revient au même, la pression, fût égale à  $p$ , puis au-dessus une colonne d'air qui, sous la pression de l'atmosphère, occuperait l'espace  $n$ , et enfin, au-dessus de cette dernière, une nouvelle colonne de mercure qui remplirait le reste du tube. On considérerait ce tube comme placé sous un récipient où l'on ferait le vide; alors l'air renfermé dans le tube se dilaterait, en chassant une portion de la colonne de mercure qui peserait sur lui, jusqu'à ce que son ressort fût équilibre à ce qui resterait de la même colonne. Dans ce cas, la quantité  $x$ , qu'il s'agirait de déterminer, serait la distance entre le bas du tube et le bas de la colonne supérieure de mercure, après la dilatation de l'air.

retourne ensuite le tube, et on le fait rentrer dans le cylindre SD : à ce moment l'air extérieur qui a un passage libre par l'échancrure  $u$ , exerce sa pression sur la surface  $ab$  du liquide, mais il agit avec une force sensiblement égale sur l'eau qui tend à sortir par les tubes  $n, o, r, s$ , en sorte qu'à cet égard l'eau est en équilibre entre les deux forces de l'air. Elle s'écoulera donc par les petits tubes, en vertu de son propre poids. A mesure que cette eau tombe dans la cuvette MT, il en sort une partie par le trou dont elle est percée; mais comme elle reçoit plus qu'elle ne perd, il y a un terme où l'échancrure  $u$  se trouve obstruée, en sorte qu'il ne peut plus entrer d'air dans le vase ABC. Cependant l'eau continue de couler pendant un instant, tandis que l'air intérieur se dilate, jusqu'à ce que son ressort soit tellement affaibli, que ce qui lui en reste, joint au poids de l'eau, soit en équilibre avec la pression de l'air, à l'orifice des tubes  $n, o, r, s$ ; alors l'écoulement qui se fait par ces tubes s'arrête tout à coup. Mais la cuvette MT continuant de se vider, il arrive bientôt que l'échancrure  $u$  redevient libre, et que l'air s'introduit de nouveau dans le vase ABC, en sorte que les petits tubes recommencent à jeter de l'eau. La fontaine coule ainsi et tarit alternativement, jusqu'à ce que le vase qui fournit l'eau soit épuisé.

### *Des Pompes.*

436. Nous nous sommes bornés à indiquer l'air en général, comme cause de l'élevation de l'eau dans les corps de pompe. Mais la manière dont la pression extérieure de ce fluide se combine avec une autre action, qu'il exerce à l'intérieur et qui dépend de son ressort, est susceptible de quelques détails d'autant plus propres à intéresser, qu'ils tendent à mieux faire connaître une des plus belles et des plus utiles productions de la Mécanique.

Toutes les pompes peuvent se rapporter à trois espèces; savoir, la pompe  *foulante* , la pompe  *aspirante* , et celle qu'on nomme  *foulante et aspirante* , parce qu'elle réunit les effets des deux premières.

437. La pompe foulante a son piston placé inférieurement

au niveau de l'eau. Elle se construit de deux manières ; dans l'une ; la tige  $t$  (*fig. 41*) du piston  $P$  est située en dessous , et celui-ci est percé d'une ouverture verticale , dont l'orifice supérieur est garni d'une soupape  $s$  à charnière. Lorsqu'il est en repos , il occupe le fond du corps de pompe , dans l'intérieur duquel l'eau s'introduit d'elle-même , à travers le piston , dont elle soulève la soupape , par sa tendance à chercher le niveau. Vers l'endroit  $mn$  de ce niveau , le corps de pompe est garni pareillement d'une soupape  $s'$  à charnière , qui fait l'office d'un second fond mobile de bas en haut ; cette soupape se nomme *dormante*. Tandis que le piston s'élève au moyen du mouvement communiqué à la tige , la soupape  $s$  demeure fermée , et l'eau dont il est chargé , monte avec lui jusqu'à la soupape dormante  $s$  , qui est forcée de s'ouvrir pour donner un passage à cette eau. La même soupape retombe ensuite par son poids , et empêche le liquide de sortir. Le piston va chercher , en descendant , une nouvelle charge d'eau , avec laquelle il remonte , pour la déposer au même endroit que la première ; en sorte que l'eau peut être élevée ainsi à une hauteur arbitraire , pourvu que le moteur ait une force suffisante.

438. Les pompes de la seconde construction diffèrent de la précédente , par la position de la tige , qui est située au-dessus du piston , et de plus , en ce que le piston est plein , et repose sur une soupape qui garnit le fond de la pompe. Lorsque le piston s'élève , l'eau le suit , pour se mettre de niveau ; pendant sa descente , il refoule cette eau dans un tuyau latéral , où elle s'ouvre un passage en soulevant une soupape , qui s'abaisse dès que le piston est arrivé au bas de sa course.

439. La pompe aspirante représentée (*fig. 42*) , a son piston  $P$  élevé au-dessus du niveau  $mn$  de l'eau , à une hauteur qui doit être moindre que 32 pieds. Ce piston est percé et garni d'une soupape  $s$  en dessus. Le corps de pompe a une séparation formée par une autre soupape  $s'$  à une certaine distance au-dessous du point  $k$  où nous supposons que se termine inférieurement le jeu du piston. Quand celui-ci est en repos à ce même point , l'air intérieur , compris entre la soupape dormante  $s'$  et le niveau  $mn$  de l'eau , fait équilibre par son ressort à la pression de l'air exté-

rieur. Quant à l'air renfermé dans l'espace  $klzo$ , au-dessus de la soupape dormante, et dont le ressort est sensiblement égal à celui de l'air inférieur, son effet se borne, pour le moment, à tenir cette soupape fermée. Lorsqu'ensuite le piston monte, l'air contenu dans l'espace  $klzo$  se dilate; celui qui est au-dessous de la soupape dormante la soulève par l'excès de son ressort, et une partie de cet air se répand dans l'espace  $klzo$ . En même temps l'eau s'élève jusqu'au terme où le ressort de l'air, affaibli par la dilatation, joint au poids de l'eau qui a dépassé le niveau, fait une somme égale à la pression de l'atmosphère. Ce terme ayant lieu au moment où le piston cesse de monter, la soupape dormante, qui se trouve entre deux airs également dilatés, se referme par son poids. Le piston, en descendant, resserre le volume de l'air compris entre sa base et la soupape dormante; et comme le volume de cet air excède le volume primitif d'une quantité égale à celle qui est entrée dans l'espace  $klzo$ , il est évident qu'il y a un point où il devient plus dense que dans son premier état; et alors il soulève, par son ressort, la soupape  $s$  placée au-dessus du piston, et une partie s'échappe au dehors, jusqu'à ce que le reste ait repris sa densité naturelle. A mesure que les deux mouvemens du piston se répètent, l'eau, continuant de monter, parvient jusqu'au piston, qui, en s'abaissant, la force de passer à travers son ouverture, pour l'élever ensuite avec lui; et ainsi successivement, jusqu'à ce qu'elle arrive à la hauteur désirée.

La construction de cette espèce de pompe exige des précautions, pour obvier à un inconvénient qui paraît d'abord singulier. C'est qu'il est possible que l'eau, avant de parvenir au piston, s'arrête tout à coup, et refuse de monter davantage, quoique le piston continue ses mouvemens. Pour concevoir cette possibilité, remarquons que le poids de l'eau, à partir du niveau, va toujours en augmentant à mesure qu'elle monte, tandis que la quantité d'air qui reste entre l'eau et la base du piston, et dont le ressort se déploie pendant que celui-ci s'élève, va au contraire en diminuant. Il en résulte que le rapport entre les deux forces qui réagissent ensemble contre la pression de l'atmosphère varie continuellement; et ainsi il peut se faire que la somme

de ces forces deviendra, à un certain terme, capable d'opposer à cette pression une plus grande résistance qu'auparavant. Supposons, par exemple, que l'eau soit arrivée en *hr*, et imaginons qu'elle y soit retenue par une puissance quelconque, tandis que le piston s'élève de *kl* en *fg*, qui est la limite de son mouvement. Si l'espace *hrgf* que celui-ci laissera vide est tel que le ressort de l'air, après sa dilatation, joint au poids de l'eau qui excède le niveau, fasse équilibre à la pression de l'atmosphère, il est aisé de voir que l'eau ne serait pas montée, dans le cas même où rien ne l'aurait retenue, puisque la condition requise pour l'équilibre est remplie par la seule dilatation de l'air.

Donc si la pompe est tellement construite qu'il y ait un point où l'hypothèse que nous venons de faire puisse être réalisée, l'eau restera stationnaire à ce point. Pour que l'hypothèse ne soit jamais admissible, et que la pompe fasse son service dans tous les cas, il faut qu'il y ait entre le jeu du piston et sa plus grande hauteur au-dessus du niveau, un certain rapport que l'on détermine facilement à l'aide du calcul (1).

440. L'eau s'élève dans la pompe aspirante et foulante, comme dans celle qu'on nomme simplement *aspirante*. Mais ici le piston est plein, et lorsque l'eau est parvenue jusqu'à sa base, il refoule cette eau en s'abaissant, et la force de passer dans un tuyau latéral, comme cela a lieu pour la seconde pompe foulante dont nous avons parlé.

Cette pompe ne diffère de la précédente qu'en ce que l'eau, au lieu de passer à travers le piston pendant qu'il s'abaisse, est chassée dans un tuyau particulier; en sorte qu'on a considéré cet effet du piston comme ayant quelque chose de plus marqué, et qui semble caractériser davantage l'action de fouler.

(1) La règle à laquelle conduit le calcul, est que le carré de la moitié de la plus grande hauteur du piston au-dessus du niveau de l'eau, ou de la distance entre *fg* et *mn*, doit être plus petit que trente-deux fois le jeu du piston, qui est mesuré par la distance entre *fg* et *kl*.

*Du Siphon.*

441. C'est encore à la pression de l'air que sont dus les effets du siphon qui sert à transvaser les liqueurs. On appelle ainsi un tube de verre recourbé, dont une branche est plus longue que l'autre. On tient cet instrument de manière que la partie recourbée tourne sa convexité vers le haut. On plonge la branche la plus courte dans le vase qui contient la liqueur; on applique la bouche à l'orifice de la plus longue branche; et l'on suce la liqueur, c'est-à-dire, qu'on enfle la poitrine, de manière à produire une dilatation dans l'air qui occupe l'intérieur du siphon; la liqueur s'introduit à l'instant dans celui-ci, par la pression de l'air extérieur. Lorsque le siphon est plein, on retire la bouche, et la liqueur continue de s'écouler par la longue branche, jusqu'à ce que le vase soit vide.

On conçoit aisément la raison de cet effet, en considérant que l'air qui répond à l'orifice de la plus longue branche, presse de bas en haut, suivant la loi de tous les fluides, la colonne d'eau contenue dans cette branche, tandis que l'air, qui repose sur la surface du liquide renfermé dans le vase, agit par l'intermède de ce liquide pour presser dans le même sens la colonne qui occupe la branche la plus courte; et il est clair qu'il n'a besoin de soutenir que la partie de cette colonne, qui s'élève au-dessus du niveau. Or, la différence entre cette même partie et la colonne renfermée dans la branche la plus longue, donne à celle-ci un excès de poids qui n'est pas, à beaucoup près, balancé par l'excès de longueur de la colonne d'air qui répond à l'orifice de la même branche, et ainsi toute la partie de la liqueur qui n'est pas soutenue par l'air, tombera; et comme elle est sans cesse remplacée par celle qui vient du vase, l'écoulement ne finira qu'avec la liqueur elle-même.

442. On connaît depuis long-temps une multitude de faits que l'on attribuoit à l'horreur de la nature pour le vide, et dont l'explication s'offre comme d'elle-même, d'après les détails dans lesquels nous sommes entrés sur la pesanteur et l'élasticité de l'air.

Lorsqu'on essaye de tirer le piston d'une seringue dont on a bouché l'ouverture, on éprouve une forte résistance, comme s'il était attaché au fond par un certain pouvoir, tandis que c'est le poids de l'air qui, en pressant sa base supérieure, l'empêche de monter. Par la même raison, on écarte difficilement les panneaux d'un soufflet dont on a fermé les ouïes et le tuyau. Lorsqu'on place entre les lèvres un tube dont la partie inférieure est plongée dans l'eau, et que l'on aspire l'air intérieur, pour déterminer l'ascension du liquide, la succion semble être une force qui agit par attraction, tandis qu'on ne fait autre chose que rendre prépondérante l'action de l'air extérieur pour faire monter l'eau dans le tube. On pourrait citer beaucoup d'autres effets du même genre, dont les apparences sont comme des pièges tendus à l'imagination.

### *De la Mesure des Hauteurs par le Baromètre.*

Après avoir montré combien la découverte de la pression que l'air exerce sur la surface des autres corps a contribué à perfectionner la théorie de ce fluide, il nous reste à faire connaître une application de cette découverte, qui a doublé les avantages du baromètre.

L'expérience de Torricelli avait donné cet instrument à la Physique, pour les observations journalières relatives à l'état de l'air. L'expérience de Pascal fit naître l'idée de le substituer, dans certaines circonstances, aux moyens géométriques pour la mesure des hauteurs.

443. La méthode la plus simple d'appliquer le baromètre à cet usage, est fondée sur une observation qui ne peut être regardée que comme un premier aperçu. Elle consiste à supposer qu'en général une ligne de diminution dans la colonne de mercure, répond à une différence de douze toises et demie en hauteur verticale. Ce résultat, traduit dans le langage des nouvelles mesures, donne 108 décimètres d'élévation pour chaque millimètre dont le mercure s'abaisse. Mais on a renoncé depuis long-temps à l'emploi de ce moyen, nécessairement très imparfait, même avec

la correction que l'on a tenté d'y faire, en ajoutant au résultat une quantité proportionnelle à l'abaissement du mercure.

### Principe fondamental de l'Opération.

444. La loi suivant laquelle décroissent les densités de l'air, a fourni une autre méthode qui approche beaucoup plus de la précision, et qui s'étend à toutes les hauteurs auxquelles nous pouvons parvenir. En partant du principe donné par l'observation, que l'air se comprime en raison des poids dont il est chargé, on prouve que quand les hauteurs sont en progression arithmétique, les densités correspondantes sont en progression géométrique; et il est visible que ces densités, à leur tour, sont en rapport avec les abaissemens du mercure dans le tube du baromètre.

445. On peut démontrer d'une manière fort simple cette relation entre les hauteurs et les densités de l'air qui leur correspondent. Soit  $abzs$  (fig. 43) une tranche d'air prise depuis la surface  $ab$  de la terre jusqu'à la limite  $sz$  de l'atmosphère. Divisons cette tranche en une infinité d'autres tranches d'une épaisseur infiniment petite, par des parallèles  $dc$ ,  $ef$ ,  $gh$ , etc., à la ligne  $ab$ , dont les distances respectives  $ad$ ,  $de$ ,  $eg$ , etc., soient égales entre elles; il est évident que les densités de ces différentes tranches iront en diminuant depuis la ligne  $ab$ , et que de plus, elles seront successivement comme les poids des quantités d'air situées au-dessus de chacune d'elles, en sorte, par exemple, que la densité de la tranche  $abcd$ , sera à celle de la suivante  $dcfe$ , comme le poids de l'air contenu dans  $dczs$  est à celui de l'air contenu dans  $efzs$ .

Concevons maintenant une courbe  $bpxs$  tellement tracée que si l'air contenu dans chaque espace  $abcd$ ,  $dcfe$ , etc., était réduit à n'occuper que l'espace correspondant  $abnd$ ,  $dnoe$ , etc., pris dans l'intérieur de la courbe, le fluide se trouvât distribué uniformément dans l'espace total terminé par cette courbe. On conçoit comment cette hypothèse peut avoir lieu, puisque les densités primitives de l'air et les espaces  $abnd$ ,  $dnoe$ , situés dans l'intérieur de la courbe, étant de part et d'autre en progression

décroissante, on est le maître de choisir une courbe d'une telle nature, que les portions d'air qui passeront des espaces  $bnc$ ,  $ncfo$ , etc., dans les espaces voisins  $abnd$ ,  $dnoe$ , fassent croître les densités de l'air qui occupait d'abord ces derniers espaces, de manière que leurs différences deviennent nulles.

Cela posé, il est visible que les espaces  $abnd$ ,  $dnoe$ , etc., étant d'autant plus petits que les densités primitives étaient elles-mêmes plus petites, leur rapport sera le même que celui de ces densités; de plus, les espaces  $dns$ ,  $eos$ , etc., situés au-dessus des premiers, seront entre eux successivement comme les poids des quantités d'air qui compriment celui que renferment les espaces  $abnd$ ,  $dnoe$ , etc. Et puisque l'air se condense en raison des poids dont il est chargé, il en résulte que les espaces  $dns$ ,  $eos$ , etc., seront aussi proportionnels aux espaces  $abnd$ ,  $dnoe$ , etc. Mais ceux-ci sont les différences entre les premiers, et il est démontré que quand des quantités sont entre elles comme leurs différences, ces quantités, et par conséquent leurs différences, sont en progression géométrique (1); donc les espaces  $abnd$ ,  $dnoe$ ,  $ecpg$ , etc., ou, ce qui revient au même, les densités de l'air qui répondent aux hauteurs  $ad$ ,  $ae$ ,  $ag$ , etc., suivent la loi d'une progression géométrique; et puisque ces hauteurs sont évidemment en progression arithmétique, à cause de l'égalité des distances,  $ad$ ,  $de$ ,  $eg$ , etc., nous en concluons que quand les hauteurs forment une progression arithmétique, les densités correspondantes de l'air sont en progression géométrique.

Or, les élévations du mercure dans le baromètre sont proportionnelles aux densités de l'air qui répondent aux différentes hauteurs où ces élévations ont lieu. Donc, si d'une part on exprime ces densités par les nombres de lignes qui les mesurent, à partir de la ligne de niveau, et si d'une autre part on représente

(1) Soit  $abs = a$ ,  $dns = b$ ,  $eos = c$ ,  $gps = d$ , etc., nous aurons, par l'hypothèse,  $b : a - b :: c : b - c :: d : c - d$ , etc. Donc  $ac - bc = b^2 - bc^2$  et  $bd - cd = c^2 - cd$ , d'où l'on tire  $ac = b^2$  et  $bd = c^2$ . Donc  $a : b :: b : c$ , et  $b : c :: c : d$ , c'est-à-dire, que les quantités  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , etc., sont en progression géométrique; d'où il suit que les différences  $a - b$ ,  $b - c$ ,  $c - d$ , etc., forment aussi une progression géométrique.

en toises les hauteurs auxquelles correspondent les élévations du mercure , on pourra considérer les nombres de toises comme les logarithmes des nombres de lignes.

Supposons, pour un instant, que l'on eût une table construite d'après ce système de logarithmes; voici comment on parviendrait à mesurer la hauteur d'une montagne. On prendrait les deux nombres de lignes que marquait le baromètre au point le plus bas et au point le plus haut; on chercherait dans la colonne des logarithmes les nombres de toises correspondans , et la différence entre ces deux nombres donnerait la distance verticale entre les deux stations , ou la hauteur cherchée.

### Méthode de Deluc.

446. Il a été facile aux physiciens de sentir que l'on pouvait se dispenser de construire la table dont nous venons de parler , et faire servir les logarithmes ordinaires à la détermination des hauteurs par le baromètre. Pour y parvenir, il ne s'agissait que d'avoir un facteur constant, dont la valeur fût telle, que son produit , par les logarithmes de nos tables, donnât des mesures conformes à l'observation. Les premières déterminations de ce genre étaient fondées sur l'observation elle-même ; c'est-à-dire, qu'après avoir choisi parmi les résultats de diverses opérations trigonométriques ceux qui paraissaient mériter le plus de confiance, on cherchait la valeur du facteur qui devait être introduit dans le calcul relatif aux indications du baromètre, pour que les résultats de ce calcul s'accordassent avec ceux dont la Trigonométrie avait fourni les données. Deluc, en suivant cette marche, a été conduit à une détermination d'une heureuse simplicité, en ce qu'elle ne laisse presque rien à faire, pour ramener aux nombres que ce savant regarde comme les véritables, ceux que donnent les tables ordinaires; elle consiste en ce que les logarithmes de ces tables, pris avec sept décimales, n'ont besoin que d'être multipliés par 10,000, pour représenter en toises les vrais logarithmes des nombres de lignes qui mesurent les observations correspondantes du baromètre. Ainsi, après avoir pris la différence

entre les deux logarithmes tabulaires des nombres de lignes dont il s'agit, on reculera de quatre rangs, vers la droite, la virgule qui suit la caractéristique, et l'on aura la distance verticale entre les deux stations, exprimée en toises et en parties décimales de la toise.

447. Mais ce résultat, et tous les autres du même genre, exigent plusieurs corrections, dont deux surtout ont fixé l'attention des physiciens. On sait que la température varie dans les différens points d'une même colonne d'air, de manière qu'en général les couches supérieures sont plus froides que les inférieures. Or les densités de l'air qui répondent à des hauteurs verticales en progression arithmétique, ne sont censées être exactement en progression géométrique, qu'autant que la température de l'air est uniforme; d'où l'on voit que dans le cas ordinaire où elle varie, il est nécessaire de corriger les hauteurs du baromètre. Mais d'une autre part l'inégalité de température influe immédiatement, par un effet thermométrique, sur la colonne même de mercure renfermée dans le baromètre, et y produit une augmentation ou une diminution de longueur, qui est étrangère aux indications de cet instrument, ce qui exige une nouvelle correction.

448. On a imaginé différens moyens de faire disparaître ces anomalies. En procédant par la méthode de Deluc, on supprime d'abord l'effet qui a pour cause l'influence immédiate de la température sur le baromètre, et l'on ramène les indications de cet instrument à ce qu'elles auraient été dans le cas d'une variation due à la seule pression de l'atmosphère. On cherche ensuite le nombre de toises qui donne l'élévation proposée, en partant des hauteurs corrigées du baromètre, puis on applique à ce même nombre la correction relative à l'action variable de la chaleur sur la colonne d'air renfermée entre les deux stations.

Pour déterminer la première correction, Deluc avait cherché, par l'observation, à quel degré de température la hauteur du baromètre n'exigerait aucune correction. Ce degré répondait au dixième au-dessus de zéro, sur le thermomètre en 80 parties. Deluc avait aussi déduit de l'expérience la quantité dont la variation de température allongeait ou raccourcissait la colonne de mercure du baromètre, par chaque degré du thermomètre. Cette

quantité était de  $0^{\text{lig}},075$ , en supposant que le baromètre eût été d'abord à 27 pouces. Dans le cas d'une hauteur différente, une réduction donnait la quantité de la variation. Il était facile ensuite d'ajouter à la hauteur observée ce qui lui manquait, ou d'en retrancher ce qu'elle avait de trop, à proportion que la température différait de celle de 10 degrés, qui servait de terme fixe.

A l'égard de l'autre correction, Deluc avait cherché de même à quelle température il n'y aurait eu aucun changement à faire dans le nombre de toises donné par les logarithmes des hauteurs modifiées d'après la première correction. Cette température était de  $16^{\text{d}} \frac{3}{4}$  au-dessus de zéro. Le même savant avait ensuite supposé que la température variait, dans l'étendue d'une même colonne d'air, de manière à croître ou à décroître en progression arithmétique, et il résultait de ses expériences que l'air augmentait ou diminuait de  $\frac{1}{215}$  de son volume, par chaque degré du thermomètre. En combinant ces données avec les observations de la température qui avait lieu dans les deux stations, on déterminait l'erreur, en plus ou en moins, du nombre de toises obtenu à l'aide des logarithmes.

### Méthode de Laplace.

Plusieurs physiciens, et en particulier M. Trembley, ayant reconnu que la méthode de Deluc conduisait, en général, à des hauteurs trop faibles, ont cherché à la rectifier, en modifiant les données que ce savant avait adoptées pour la correction relative à l'effet de la température sur la colonne du baromètre. Mais toutes ces formules, accommodées aux résultats de quelques observations particulières, n'avaient qu'une exactitude, en quelque sorte, conditionnelle, et n'approchaient de la vérité que dans certaines circonstances analogues à celles qui avaient concouru avec les observations dont il s'agit.

449. Le célèbre Laplace a proposé une méthode dont le plan a été entièrement tracé par la théorie elle-même. Le coefficient constant par lequel on doit multiplier le nombre que donnent les logarithmes tabulaires (446), dépend ici du rapport entre le poids d'un volume déterminé de mercure, et celui d'un volume égal

d'air, à la température de la glace fondante, et à la hauteur moyenne du baromètre au niveau de la mer, laquelle est à très peu près de 76 centimètres (28 pouces). Les autres données du problème, puisées dans les lois auxquelles sont soumis l'air atmosphérique et le calorique disséminé dans cet air, se combinent avec le coefficient, de manière à diriger la solution vers le cas particulier que présente la position dans laquelle se trouve l'observateur.

### *Détermination du Coefficient constant.*

A l'époque où cette méthode a paru, on n'avait pas encore d'expériences assez précises sur les densités du mercure et de l'air comparées entre elles, et le coefficient que l'on avait déduit de quelques-unes donnait des mesures qui étaient toujours au-dessous des véritables.

450. En attendant de nouvelles expériences qui fussent à la fois directes et concluantes, M. de Laplace invita le savant naturaliste Ramond à employer des observations barométriques dont la justesse ne pût être revuquée en doute, pour obtenir un coefficient qui fût censé ne différer que par son origine de celui qu'aurait fourni le rapport entre les pesanteurs spécifiques de l'air et du mercure. M. Ramond trouva que, sur le 45<sup>e</sup> parallèle de la division nonagésimale, ce coefficient était égal à 18336 mètres.

451. Cependant, quoique tout concourût à faire regarder ce même coefficient comme suffisant pour la pratique, la théorie n'était pas satisfaite, et il était à désirer que la Physique, par une opération immédiate, le reproduisît avec un caractère assorti aux autres données renfermées dans la formule. Un travail important, entrepris plus récemment par MM. Biot et Arago, sur les puissances réfractives des différens corps, a conduit ces deux savans à s'occuper d'une autre propriété qui influe sur la réfraction, savoir, la densité, et il est résulté de leurs recherches une détermination des pesanteurs spécifiques de l'air et du mercure, prise avec toutes les attentions capables de la rendre définitive.

Cette détermination donne  $\frac{1}{10475,68}$  pour le rapport entre la

densité de l'air et celle du mercure, à la température de la glace fondante, l'air étant soumis à une pression de 76 centimètres. Or le coefficient qui se conclut de ce rapport est égal à 18332 mètres, en sorte que le premier n'en diffère que de quatre unités; accord non moins remarquable que satisfaisant entre deux résultats, dont l'un exigeait une critique sûre, pour discerner au milieu des modifications variables de l'atmosphère, les circonstances propres à l'offrir dans toute sa pureté, et l'autre une manière d'opérer également adroite et précise, pour le dégager de toutes les causes d'anomalies qui se mêlent à ce genre d'expériences.

### *Corrections relatives à la Température.*

452. L'hypothèse d'une température uniforme égale à zéro, exige de même ici deux corrections, pour être ramenée aux indications données par le thermomètre, pendant l'opération même. La première porte sur le coefficient constant. Pour mieux concevoir en quoi elle consiste, supposons que la température à la station la plus basse soit, par exemple, de 16<sup>d</sup> au-dessus de zéro du thermomètre centigrade, et qu'à la station la plus haute, elle soit de 4<sup>d</sup> au-dessus de la même limite. La chaleur étant censée décroître en progression arithmétique, à mesure que la température s'abaisse, en allant d'une couche à l'autre, tel sera son effet sur l'air compris entre les deux stations, que les différences entre les densités actuelles des diverses couches de cet air, prises de bas en haut, et celles qui auraient lieu en vertu des seules pressions, suivront elles-mêmes une progression arithmétique.

On pourra donc considérer l'opération comme étant faite par une température uniforme de 10<sup>d</sup>, qui, étant la demi-somme des températures extrêmes, donne le terme moyen de la progression. Ainsi, l'effet sera le même que si la température ayant été d'abord à zéro, s'était élevée subitement de 10<sup>d</sup> dans toute la masse d'air renfermée entre les deux stations. Or, dans cette hypothèse, la dilatation subie par l'air aurait fait monter les différentes couches de ce fluide au-dessus de leur niveau; d'où il suit que la portion de colonne atmosphérique comprise entre les deux

stations serait devenue moins dense. Maintenant il est aisé de voir que c'est l'action de cette portion de colonne qui détermine la différence entre la pression exercée par l'air sur le mercure, à la station la plus haute, et celle qui a lieu à la station la plus basse, en sorte que quand cette action se trouve diminuée, comme dans le cas présent, par une suite de ce que l'air a perdu de sa densité, la quantité dont le baromètre est descendu, tandis qu'on le portait à la station la plus haute, est moindre que si l'air était plus dense. Cet instrument indique donc alors une élévation trop petite, et le calcul fait sans aucune correction, donnerait un résultat trop faible. Il faudra donc, pour compenser l'erreur, augmenter le coefficient constant d'une certaine quantité qu'il s'agit de déterminer.

Or on a observé que vers la température de la glace fondante l'air se dilate d'environ  $\frac{1}{270}$  de son volume, par chaque degré du thermomètre centigrade. Donc, la quantité dont il faudra augmenter le coefficient constant est égale au produit de ce coefficient par  $\frac{1}{270}$ , et par le nombre de degrés que donne la température moyenne. Mais celle-ci étant la demi-somme des températures observées aux deux stations, on voit que l'opération se réduit à multiplier la somme entière par  $36^{m.},672$ , qui est le produit du coefficient  $18336^{m.}$  par  $\frac{1}{270}$  ou par  $\frac{1}{270}$  (1).

453. La seconde correction dépend de l'effet thermométrique de la chaleur par rapport au mercure du baromètre; sur quoi nous observerons que la température de ce métal liquide diffère ordinairement de celle de l'air environnant. C'est pour cela que les physiciens qui veulent mettre de la précision dans leurs résultats, déterminent la température dont il s'agit, au moyen d'un thermomètre tellement adapté à la monture du baromètre, que la chaleur et le froid puissent influencer de la même manière sur

(1) L'effet total qui détermine la correction étant la somme des termes de la progression, relativement aux quantités dont les densités de l'air sont altérées par la chaleur, on a cette somme en prenant le moyen terme, qui est le produit de la température moyenne par le rapport  $\frac{1}{270}$  de dilatation pour un degré, et en le multipliant par le coefficient constant, qui représente le nombre des termes.

l'un et l'autre instrument. M. Ramond désigne ce thermomètre sous le nom de *Thermomètre du baromètre*, et il appelle *Thermomètre libre*, celui qui est destiné à indiquer la température de l'air.

Maintenant on sait que le mercure se dilate de  $\frac{1}{5412}$  de son volume, pour chaque degré du thermomètre centigrade. Il en résulte que, si l'on part de la température qui avait lieu à la station la plus froide, l'effet thermométrique dont il s'agit sera mesuré par la 5412<sup>e</sup> partie de la longueur qu'avait la colonne de mercure à la même station, prise autant de fois qu'il y a de degrés dans la différence entre les deux températures indiquées par le thermomètre du baromètre. En ajoutant le produit au nombre de centimètres que donnait le baromètre à la station la plus froide, on ramènera l'opération à ce qu'elle eût été, si la colonne de mercure avait conservé constamment sa densité, en partant de la station la plus chaude.

### *Application à un cas particulier.*

454. Nous parlerons bientôt d'une autre variation qui est due à la pesanteur, et dont il est nécessaire de tenir compte, lorsqu'on veut parvenir à une grande précision. Mais comme la méthode que nous venons de développer suffit pour les usages ordinaires, nous en ferons d'abord l'application à une mesure particulière, d'après une opération exécutée par M. Ramond sur le pic du midi de Bigorre.

Le baromètre placé à la cime du pic marquait 53<sup>centim.</sup>,7203; le thermomètre du baromètre était à 9<sup>d.</sup>,75, et le thermomètre libre à 4<sup>d.</sup>. En même temps le baromètre placé à Tarbes, où M. Dango faisait des observations correspondantes, marquait 73<sup>cent.</sup>,5581; le thermomètre du baromètre était à 18<sup>d.</sup>,625, et le thermomètre libre à 19<sup>d.</sup>,125.

Pour avoir la quantité dont le coefficient constant doit être augmenté, on multipliera la somme 23,125 des deux températures 4 et 19,125, par 36<sup>m.</sup>,672, et l'on ajoutera le produit 848,04 au coefficient constant, ce qui donnera pour le véritable coefficient, dans la circonstance actuelle, 19184,04.

Pour corriger ensuite la hauteur du baromètre, à la station la plus froide, ou celle du pic du midi, d'après la variation de la température, on prendra la différence 8,875, entre les deux températures indiquées par les thermomètres attachés aux baromètres, on la multipliera par la hauteur 53<sup>cent.</sup>,7203 du baromètre, à la station la plus froide, et on divisera le produit par 5412, ce qui donnera 0<sup>cent.</sup>,0881 à ajouter à 53<sup>cent.</sup>,7203. Ainsi la hauteur corrigée sera 53<sup>cent.</sup>,8084 (1).

Maintenant la différence entre le logarithme 1,8666305 de 73,5581 et le logarithme 1,7308500 de 53,8084 est 0,1357805, laquelle multipliée par le coefficient corrigé 19184,04, donne pour la distance verticale entre les deux stations, 2604<sup>mètres.</sup>,819 (2).

### *Corrections relatives à la Pesanteur.*

455. On sait que l'action de la pesanteur sur les corps placés à la surface de la terre, diminue à mesure qu'on approche de l'équateur, ou, ce qui revient au même, à mesure que la latitude est plus petite; et de plus, elle décroît pour une même latitude, à mesure qu'on s'élève à une plus grande hauteur.

456. Pour corriger la variation qui a lieu dans le sens de la latitude, on part du parallèle moyen, auquel le coefficient constant 18336<sup>mètres.</sup> est censé correspondre, ainsi que nous l'avons dit, et suivant que l'opération se fait en deçà ou au-delà de ce

(1) Nous donnons ici ces calculs en nombres ordinaires; mais on sait combien l'usage des tables de logarithmes abrège les opérations de ce genre.

(2) Soit  $h$  la hauteur du baromètre à la station la plus basse,  $h'$  celle qui est relative à la station la plus élevée, que l'on suppose en même temps la plus froide,  $a$  été corrigée de l'effet de la température,  $T$  la hauteur du thermomètre libre, à la station la plus chaude,  $t$  celle qui a lieu à la station la plus froide,  $T'$  et  $t'$  les hauteurs qui répondent aux précédentes sur le thermomètre du baromètre, et  $r$  la différence d'élévation entre les deux stations, toutes ces quantités étant exprimées en mètres et en fractions du mètre, la règle dont nous venons de faire une application, sera représentée par cette formule,  $r = 18336^{\text{mètres.}} \left( 1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right) \log \left( \frac{h}{h' \left( 1 + \frac{T-t'}{5412} \right)} \right)$ .

degré moyen, on ajoute à la hauteur déduite, ou bien on en retranche le produit de cette hauteur par les 2845 millièmes du cosinus du double de la latitude, le rayon ayant l'unité pour expression. Ainsi le pic du midi étant situé au 43<sup>e</sup> degré, le cosinus dont il s'agit est celui de 86<sup>d</sup>; et si l'on en prend les 2845 millièmes, et qu'on multiplie le résultat par la hauteur déduite 2604<sup>mètres</sup>,819, on trouvera 0<sup>mètres</sup>,517 qu'il faut ajouter à cette hauteur, ce qui donne 2605<sup>mètres</sup>,336.

457. Enfin, pour avoir égard à la diminution de la pesanteur dans le sens vertical, on ajoutera à la hauteur déjà corrigée de l'effet de la latitude, son produit par le coefficient corrigé, et par la différence des logarithmes qui correspondent aux deux hauteurs du baromètre, augmentée du nombre 0,868589 et divisée par le nombre 6366198, qui représente, en mètres, le rayon du globe terrestre. Dans l'exemple que nous avons choisi, la différence des logarithmes est 0,1357805, lequel nombre ajouté à 0,868589 donne 1,0043695; le coefficient corrigé est 19184,04, et la hauteur corrigée de l'effet de la latitude est 2605<sup>mètres</sup>,336; ainsi la valeur de la quantité cherchée sera  $\frac{1,0043695 \times 19184,04}{6366198} \times 2605^{\text{mètres}},336$ , ou 7<sup>mètres</sup>,885, qui étant ajoutés à 2605,336 donnent 2613<sup>mètres</sup>,221, pour la hauteur du pic du midi (1). Or, la même hauteur, déterminée par M. Ramond,

(1) M. de Laplace a donné dans le quatrième volume de sa Mécanique céleste, p. 293, la formule suivante, qui représente toutes les opérations de ce genre. Soit  $r$  la différence d'élévation entre les deux stations,  $\Psi$  la latitude du lieu,  $t$  et  $t'$  les températures indiquées par les deux thermomètres libres,  $h$  la hauteur du baromètre à la station la plus chaude,  $h'$  sa hauteur à la station la plus froide, corrigée de l'effet de la température, et  $a$  le rayon du globe terrestre, on aura

$$r = 18336^{\text{mètres}} \cdot (1 + 0,002845 \cdot \cos 2\Psi) \left( 1 + \frac{2(t+t')}{1000} \right) \left[ \left( 1 + \frac{r}{a} \right) \log \frac{h}{h'} + \frac{r}{a} \cdot 0,868589 \right].$$

M. de Laplace avertit que pour appliquer cette formule, il suffit de substituer à  $r$  dans le second membre de l'équation, sa valeur donnée par la supposition de  $r=0$ , dans le second membre.

à l'aide d'un nivellement fait avec un soin extrême, est de 2613<sup>mètres</sup>,137, et ainsi la mesure barométrique ne diffère pas d'un décimètre en moins, de celle qu'avait donnée l'opération géodésique. En négligeant les corrections relatives à la pesanteur, nous avons eu le résultat, 2604<sup>mètres</sup>,819, plus faible d'environ 8 mètres que le véritable.

458. Nous ne devons pas omettre qu'une condition nécessaire pour approcher le plus près qu'il est possible de la précision, est d'opérer au milieu d'un air exempt d'agitation, parce que les courans de ce fluide, suivant que leur obliquité a lieu du bas vers le haut, ou en sens contraire, diminuent ou augmentent la pression que l'atmosphère exerce sur le mercure du baromètre : il en résulte que la colonne de ce liquide subit tantôt un excès d'abaissement qui donne des hauteurs trop grandes, tantôt une diminution d'abaissement qui donne des hauteurs trop petites. M. Ramond regarde, pour cette raison, l'heure du midi, comme étant, en général, l'instant le plus favorable aux observations barométriques, parce que c'est ordinairement vers le milieu du jour que l'équilibre de l'atmosphère, altéré par les vents du matin, se trouve rétabli (1).

### *Utilité des Observations barométriques pour la Géographie-Physique.*

459. Le savant auteur de la méthode que nous venons d'exposer a conçu l'idée heureuse de faire concourir les observations du baromètre avec les mesures géographiques, pour déterminer, d'une manière plus fixe, la position des différens lieux. Cette position, telle que l'offrent les mesures dont nous venons de parler, dépend de l'intersection de deux coordonnées perpendiculaires entre elles, dont l'une est la distance au premier

---

(1) Voyez un Mémoire très intéressant de ce célèbre naturaliste, sur l'objet dont il s'agit, dans le sixième volume des Mémoires de l'Institut, p. 435 et suiv. On y trouve aussi des méthodes pour accélérer et simplifier les calculs, sans s'écarter sensiblement de l'exactitude.

méridien, ou la longitude, et l'autre la distance à l'équateur, ou la latitude. On supposerait une troisième coordonnée perpendiculaire aux deux précédentes, qui mesurerait la distance verticale entre le même point d'intersection et le niveau de la mer. On prendrait, pour la France, ce niveau à Brest, où la hauteur moyenne du baromètre est à peu près de 76 centimètres. On ferait dans chaque lieu un grand nombre d'observations barométriques, pendant un an ou deux, et la moyenne entre toutes ces observations donnerait l'élévation du lieu proposé au-dessus du niveau de la mer. On pourrait choisir, dans chaque pays, pour le niveau auquel se rapporteraient les observations, la hauteur moyenne de la rivière la plus voisine. Un pareil travail, exécuté par des observateurs exercés, et avec des baromètres bien construits, offrirait des résultats intéressans pour la topographie des divers pays.

## 2. Des différentes Modifications dont l'Atmosphère est susceptible.

L'atmosphère, lors même qu'elle jouit d'une belle transparence, et nous montre sa concavité sous l'aspect d'une voûte colorée en azur, est un vaste réservoir d'eaux raréfiées, que la force du calorique tient comme enchaînées dans les pores de l'air. Les molécules de ces eaux que leur extrême ténuité déroche à nos regards, n'attendent que des circonstances plus ou moins prochaines pour se réunir et devenir visibles, soit qu'elles conservent une légèreté qui leur permette de rester suspendues au milieu de l'air, soit qu'elles acquièrent assez de densité pour être en prise à la pesanteur qui détermine leur retour vers la terre. A ces changemens que subit l'état de l'air, par le dégagement des molécules aqueuses qu'il tenait cachées dans ses interstices, se joignent ceux que lui font éprouver les agitations occasionnées par la rupture de son équilibre. De là ces nombreuses modifications, qui ramènent chaque année dans l'atmosphère, pendant le cours des saisons, une scène également diversifiée par la succession des phénomènes qu'un même lieu voit naître, et par les con-

trastres que présentent ceux qui se manifestent à la fois dans des lieux différens. C'est la considération de ces phénomènes qui va maintenant nous occuper : mais parce que nous ne sommes pas encore assez éclairés sur leur véritable théorie, nous nous bornerons souvent à les décrire, sans entreprendre d'en donner une explication qui serait prématurée.

### *Des Vents.*

460. Les changemens qui interviennent dans la pesanteur spécifique et dans le ressort de l'air, par des causes qui agissent inégalement sur ses différentes parties, donnent naissance aux vents, en déplaçant une portion de ce fluide, et en lui communiquant un mouvement progressif. On a désigné les vents avec beaucoup de justesse, en les appelant *des courans d'air*.

461. L'intensité de la force du vent varie entre des limites très étendues, depuis l'agitation légère qui produit le zéphir, jusqu'au mouvement impétueux d'où résultent les ouragans. M. Kraaf, qui a fait, à Pétersbourg, des observations sur la vitesse du vent, dit l'avoir trouvée une fois de 109 pieds ( $35^{\text{m}^{\text{e}}}$ ,4), et une autre fois de 129 pieds ( $39^{\text{m}^{\text{e}}}$ ) par seconde (1).

### Diversité des Vents.

462. Les vents suivent une infinité de directions différentes, les unes obliques, les autres parallèles à l'horizon. Mais dans l'estimation ordinaire de la direction du vent, on se borne à considérer le point de l'horizon d'où il est censé partir, pour arriver à l'observateur, qui se regarde comme étant au-dessus du centre de ce cercle; et l'on suppose la circonférence du même cercle divisée en 32 parties égales par seize diamètres, ce qui donne, en allant de la circonférence au centre, 32 directions, que l'on a nommées *airs* ou *rumb*s de vents, et dont l'ensemble forme ce que l'on appelle la *rose des vents*. Voyez la figure 44.

---

(1) Encyclopédie méthod., Marine, t. III, 2<sup>e</sup> Partie, p. 813.

L'un des diamètres, qui coïncide avec le méridien du lieu où se trouve l'observateur, indique le Nord par une de ses extrémités, et le Sud par l'extrémité opposée. Le diamètre qui coupe le précédent à angle droit, indique l'Est d'un côté, et l'Ouest de l'autre. Ces quatre points se nomment en général *points cardinaux*.

Les noms des points intermédiaires entre les points cardinaux, participent de ceux de ces mêmes points, combinés deux à deux, trois à trois, sans addition, ou trois à trois, avec interposition de la fraction  $\frac{1}{3}$ , à mesure que les points correspondans sous-divisent, en parties toujours plus petites, l'espace compris entre deux points cardinaux voisins. Cette nomenclature est fondée sur les principes suivans : 1°. dans les combinaisons binaires, comme Nord-Est, Sud-Est, etc., le nom de *Nord* ou celui de *Sud* tient toujours la première place. 2°. chaque combinaison ternaire, sans addition, telle que Nord-Nord-Est, Est-Nord-Est, etc., est donnée par le nom du point cardinal le plus voisin, suivi de la combinaison binaire la plus voisine. 3°. À l'égard des combinaisons ternaires avec addition de la fraction  $\frac{1}{4}$ , il y a une distinction à faire. Si le point auquel répond la combinaison est voisin d'un point cardinal, la combinaison se forme du nom de ce point, et ensuite de la fraction  $\frac{1}{4}$ , à laquelle on ajoute le nom de la combinaison binaire la plus voisine. Ainsi Nord quart de Nord-Est, signifie que le point indiqué par cette combinaison est voisin du Nord, et que sa distance à ce même point est le quart de celle qui le sépare du Nord-Est. Si au contraire le point auquel appartient la combinaison est voisin d'un autre point qui réponde à une combinaison binaire, ce qui est le cas du point Nord-Est quart de Nord, la combinaison se forme du nom de cette même combinaison binaire, et de la fraction  $\frac{1}{4}$ , avec le nom du point cardinal le plus voisin; d'où l'on voit que ce mode de combinaison est l'inverse du précédent. Parmi les directions variables à l'infini des différens vents, on a choisi les trente-deux dont nous venons de parler, comme des espèces de limites auxquelles on rapporte toutes les autres.

463. Les vents considérés relativement à leur durée, à leurs

retours et autres circonstances semblables, se divisent en vents généraux, vents périodiques et vents irréguliers.

Les vents généraux, ou ceux dont l'action est continue et suit une direction constante, règnent entre les deux tropiques, et rarement au-delà.

Les vents périodiques, que l'on a nommés aussi *vents alisés* et *moussons*, soufflent constamment pendant plusieurs mois, et sont ordinairement suivis de vents contraires d'une égale durée.

Les vents irréguliers sont ceux qui soufflent de différens côtés dans un même pays, sans observer aucune époque ni aucune durée déterminée : ce sont les plus ordinaires dans les climats tempérés. Il arrive assez communément que deux ou trois de ces vents soufflent en même temps, l'un au-dessus de l'autre, dans des directions différentes (1), et quelquefois on éprouve un vent violent sur une montagne au pied de laquelle l'air est tranquille, ou c'est le cas contraire qui a lieu (2).

### Explication du Vent d'Est.

464. Parmi les vents généraux dont nous avons parlé, il en est un qui souffle continuellement dans la zone torride, et qui est connu sous le nom de *Vent d'Est*. Quelques auteurs avaient cru en trouver la cause dans l'attraction que le soleil et la lune exercent sur l'atmosphère : mais il est prouvé que cette attraction ne peut produire dans l'air que de simples oscillations analogues à celles du flux et reflux, et très légères, au lieu d'un mouvement sensible et uniforme dans sa direction.

465. L'opinion la plus commune est que le vent d'Est provient de la dilatation de l'air rarefié par l'action du soleil. Mais pour mieux faire concevoir l'influence de cette action sur le phénomène dont il s'agit, nous commencerons par examiner, en général, l'effet qui résulte de l'agitation produite par le calorique dans une masse d'air qui s'échauffe continuellement, sans être

(1) Musschenbroeck, Essai de Physique; Leyde, 1751, t. II, p. 879.

(2) Deluc, Recherches sur les Modific. de l'Atmosphère, n° 530.

coercée. Il est facile de voir que dans cette hypothèse, la pesanteur spécifique de l'air dont il s'agit doit diminuer, par une suite de la dilatation; en sorte que s'il est environné d'un air plus froid, il s'élèvera, et sera aussitôt remplacé par une portion de l'air ambiant; et comme nous supposons que la chaleur continue d'agir dans le même espace, il s'établira une espèce de circulation, en vertu de laquelle un air plus dense prendra continuellement la place d'un air raréfié.

466. L'action qu'exerce la chaleur sur l'air des appartemens à cheminée, nous fournit un exemple familier de ce phénomène. Les molécules de cet air, répandues autour du brasier, devenant respectivement plus légères par la raréfaction, une partie s'élève dans le tuyau de la cheminée, et l'autre va gagner le haut de l'appartement; en même temps un nouvel air arrive par le bas, pour remplacer l'air ascendant, et il en résulte une succession non interrompue de deux courans contraires; l'un supérieur, qui s'éloigne de la cheminée, l'autre inférieur, qui se porte vers elle. Les vitesses de ces deux courans diminuent à mesure que les couches d'air se rapprochent d'une certaine hauteur moyenne où ce fluide est stationnaire. On peut observer les effets de ce double courant, en ouvrant la porte de l'appartement, et en plaçant tour à tour la flamme d'une bougie vers le bas et vers le haut de l'ouverture; on verra la flamme s'incliner d'abord en dedans, puis en dehors, et à une certaine hauteur intermédiaire, elle restera immobile.

467. La succession perpétuelle de ces deux airs, tant que la chaleur est entretenue, a fourni le principe sur lequel est fondée l'explication la plus naturelle que l'on ait donnée du vent d'Est. Le soleil, que nous supposons dans le plan de l'équateur, chauffe et raréfie très sensiblement la partie de l'atmosphère qu'il domine. Cet air raréfié s'élève au-dessus du niveau, et, d'après la tendance qu'ont tous les fluides à reprendre leur niveau, il se répand sur les colonnes situées vers les pôles, tandis qu'un air frais, parti de ces mêmes colonnes, afflue en dessous vers l'équateur, pour remplir l'espace de vide produit par la dilatation. Il se formera donc, dans chaque hémisphère boréal ou austral, deux courans, l'un

supérieur, qui va de l'équateur vers le pôle, l'autre inférieur, qui vient du pôle à l'équateur. Les molécules de ces courans sont sollicitées à la fois par deux forces, dont l'une agit dans la direction même du courant, et l'autre provient du mouvement de rotation de l'atmosphère; et il est clair que la vitesse produite par ce second mouvement était originairement d'autant plus petite dans chaque molécule, que le parallèle dont celle-ci est partie se trouvait plus éloigné de l'équateur.

Maintenant si nous considérons une molécule prise dans le courant inférieur, dont la direction tend vers l'équateur, il sera aisé de concevoir que cette molécule arrive à chacun des parallèles situés sur son trajet, avec une vitesse angulaire (1), moindre que celle du point correspondant pris à la surface de la terre. Les objets terrestres qui se présentent au passage du courant inférieur, doivent donc le frapper avec l'excès de leur vitesse; il en sera de même d'un spectateur qui, se croyant immobile, et rapportant l'excès de sa propre vitesse, en sens opposé, au courant qu'il rencontre, recevra l'impression d'un vent qui lui paraîtra venir de l'Est, puisque le mouvement de rotation est dirigé de l'Ouest vers l'Est.

Ce sera le contraire par rapport au courant supérieur qui va vers le pôle. Chacune de ses molécules, ayant plus de vitesse que le point de la terre au-dessus duquel elle arrive, devancera ce même point en allant vers l'Est, et il doit résulter de cette supériorité de vitesse un vent d'Ouest réel, au lieu que le vent inférieur est une simple apparence, mais qui produit une illusion complète.

### *Utilité des Vents.*

468. Les accidens qu'occasionne quelquefois la violence des vents, sont compensés bien au-delà par les avantages que nous procurent ces courans d'air. Ce sont eux qui, dans les grandes

---

(1) On appelle ainsi la vitesse d'un corps qui se meut circulairement autour d'un point. Quand la rotation est uniforme, la vitesse est proportionnelle à l'angle que mesure l'arc décrit par ce corps dans un temps donné.

villes, font succéder un air sain à un air vicié par des émanations nuisibles. Ils transportent les nuages destinés à répandre sur la terre les pluies qui la fertilisent; ils sont les véhicules d'une multitude de graines qui, pourvues d'ailes ou d'aigrettes, volent de toutes parts pendant l'automne, et entretiennent entre les différens sols une circulation de richesses végétales.

469. L'industrie humaine a trouvé dans la force des vents un puissant moteur, dont l'impulsion sur les voiles des navires dirige ces édifices flottans vers les lieux où la nature abonde en productions intéressantes pour le commerce, ou utiles aux progrès de l'histoire naturelle. Avant l'invention de nos moulins, que de bras et d'efforts étaient employés à moudre le grain dont nous tirons notre plus solide nourriture! L'action du vent y supplée, en s'exerçant sur quatre ailes qui font l'office de leviers, et dont les surfaces, inclinées deux à deux en sens contraires, reçoivent, à l'aide de cette ingénieuse disposition, des mouvemens qui conspirent pour déterminer la rotation de l'axe sur lequel sont fixées les ailes (1).

(1) Soit  $AB$  (fig. 45) la projection de la surface antérieure du moulin,  $mn$  celle de l'une des ailes que nous supposons être parvenue au plus haut point de sa rotation,  $m'n'$  celle de l'aile opposée à la précédente, et qui, dans le même cas, se trouve au point le plus bas de sa rotation; soit de plus  $fg$  la direction du vent à laquelle la surface  $AB$ , dont on peut faire varier à volonté la position, est toujours perpendiculaire. La force du vent, qui agit obliquement sur l'aile  $mn$ , suivant  $or$ , se décompose en deux autres forces, dont l'une représentée par  $os$ , et parallèle à  $mn$ , est nulle pour l'effet; et l'autre, représentée par  $ot$ , et perpendiculaire à  $mn$ , pousse l'aile de gauche à droite, ou en allant de  $A$  vers  $B$ . En faisant le même raisonnement par rapport à l'aile inférieure  $m'n'$ , on en conclura que la force  $o't'$ , qui fait la même fonction que  $ot$ , agit pour faire tourner l'aile  $m'n'$  de droite à gauche, ou en allant de  $B$  vers  $A$ . Or cette action concourt avec celle qui s'exerce sur l'aile supérieure, pour produire un même mouvement de rotation; au lieu que si l'aile inférieure était disposée sur le même plan que celle d'en haut, les deux mouvemens se détruiraient. Ce que nous disons ici des actions relatives à la position la plus élevée ou la plus basse des ailes, s'applique également à toutes les autres positions.

Il est facile de voir que les ailes resteraient encore immobiles, si  $mn$  et  $m'n'$  étant parallèles à  $AB$ , recevaient directement l'impulsion du vent, ou si, étant perpendiculaires sur  $AB$ , elles avaient la même direction que le vent. Il y a donc,

*Des Météores aqueux.*

470. On a donné le nom de météores à tous les corps qui, suspendus ou en mouvement dans l'atmosphère, y deviennent les agens de quelque phénomène. Il ne s'agit ici que de ceux qui doivent leur origine à l'eau. C'est surtout l'étude de ces derniers qui est l'objet de cette branche de nos connaissances, que l'on a appelée *Météorologie*, et que l'on a étendue à l'observation des vents, dont l'existence a une si grande analogie avec celle des météores.

### De l'Atmosphère considérée relativement à l'Évaporation.

Nous avons déjà exposé (207) l'hypothèse qui nous paraît expliquer de la manière la plus plausible le mécanisme par le aide duquel l'eau, en se séparant d'elle-même, dans tous les points situés à sa surface, se transforme en une vapeur qui se répand dans l'air environnant, où elle est maintenue par l'action répulsive que cet air exerce sur elle. Nous allons maintenant faire connaître certaines circonstances particulières, relatives à l'évaporation, et dont la considération aidera à mieux concevoir ce que nous dirons ensuite des météores aqueux.

471. L'évaporation est d'autant plus abondante, toutes choses égales d'ailleurs, que l'eau, en se présentant à l'air par une plus grande surface, multiplie davantage ses communications avec ce fluide. On profite, dans certains pays, de cette observation, pour extraire plus promptement le sel marin de l'eau qui le tient en dissolution. On fait d'abord tomber cette eau sur des fagots d'épines, où elle se divise en une pluie très fine, qui, offrant à l'air qu'elle traverse un grand nombre de points à découvert,

---

entre ces deux limites, une position oblique sous laquelle la force du vent est un *maximum*, et le calcul démontre que le *maximum* a lieu lorsque l'angle *orn* que fait la direction du vent avec la surface de l'aile, est de  $54^{\text{d}} 41' 8''$ .

s'évapore en grande partie, de manière que celle qui arrive au fond se trouve très chargée de sel. Cette eau est ensuite portée dans de grandes chaudières qu'on expose à l'action du feu pour achever l'évaporation.

472. Les parties situées à la surface de l'eau étant les seules qui soient soumises à l'évaporation, la quantité de celle-ci, dans des vases pleins dont les orifices sont inégaux, est proportionnelle à la grandeur de ces orifices, pourvu que la chaleur et les autres circonstances soient les mêmes, relativement à tous les vases. Musschenbroeck a trouvé, il est vrai, qu'à surfaces égales, l'eau renfermée dans un vase plus profond, s'évaporerait plus promptement que dans un vase qui avait moins de profondeur (1). Mais cette différence provenait vraisemblablement de ce que parmi les variations que subissait la température de l'air environnant, celles qui tendaient à la faire baisser étaient les plus fréquentes. Il en résultait que l'eau renfermée dans le vase le plus profond, étant composée d'un plus grand nombre de couches depuis le fond jusqu'à la surface, suivait plus lentement les variations de la température, et par là perdait moins promptement la chaleur qu'elle avait une fois acquise, et dont la présence accélérerait l'évaporation (2). Aussi la différence dont il s'agit n'est-elle sensible qu'en plein air, et l'on a observé qu'elle était nulle dans des appartemens où la température n'éprouvait que de légères variations.

473. On a remarqué depuis long-temps, que les vents, surtout lorsqu'ils sont secs, favorisent et accélèrent l'évaporation. D'après la théorie de Leroi, cet effet proviendrait en grande partie de ce que l'air renouvelant sans cesse ses points de contact avec l'eau, agirait sur ce liquide par une affinité toujours renaissante. Mais dans l'hypothèse beaucoup plus admissible où l'évaporation est due à l'élasticité du calorique, on conçoit encore mieux qu'un liquide doit s'évaporer plus rapidement par l'intermède d'un air agité, soit parce que ce fluide offre continuel-

(1) Additions aux Mémoires de l'Acad. *del Cimento*, t. II, p. 62.

(2) *Novi Commentar. Petrop.*, t. II, p. 134.

lement à la vapeur un accès libre dans de nouveaux interstices ; soit parce que le progrès de l'évaporation est encore favorisé par l'agitation que le mouvement de l'air excite dans les molécules mêmes du liquide.

On peut produire un effet analogue, dans un appartement, à l'aide d'une de ces expériences qui appartiennent à la Physique de tous les momens. Il suffit de mouiller un doigt de chaque main, par exemple le doigt index, et de se promener ensuite dans l'appartement, en faisant aller et revenir rapidement un des doigts mouillés, et en maintenant l'autre dans la même position. Bientôt le liquide aura disparu sur la surface du premier, tandis que le second restera humecté.

474. L'eau est encore susceptible d'évaporation, même après qu'elle a passé à l'état de solidité. Cet effet a lieu d'une manière très sensible à l'égard de la neige ; et l'on voit, par un temps sec et froid, les glaçons qui s'étaient formés dans les ornières des grands chemins diminuer peu à peu, et finir par disparaître. Mais la glace s'évapore avec plus de lenteur, à mesure qu'elle est plus froide, et il est extrêmement probable qu'il y a un terme où les molécules situées à la surface de l'eau congelée cesseraient d'obéir à la tendance du calorique pour les entraîner sous la forme de vapeur. Quant à ce qu'ont observé Musschenbroeck et Wallerius que l'évaporation de l'eau augmente, pendant que ce liquide se congèle, ce n'est qu'un effet instantané, dû à l'accroissement de chaleur produit par celle que développe l'acte même de la congélation.

### *Effet de la présence de l'Air sur la quantité de Vapeur répandue dans un espace donné.*

475. Nous avons vu que la pression de l'air oppose à l'évaporation un obstacle qui en retarde le progrès (207). Quelques physiciens en avaient conclu que cet obstacle influait sur la quantité même de vapeur qui se développait dans l'atmosphère, en sorte que si cette dernière n'existait pas, il y aurait, à égalité de température, et au terme de la saturation, plus de vapeur répandue

dans un espace pris depuis la surface de la terre jusqu'à une hauteur donnée. Il est aisé de prouver que, dans cette hypothèse, la quantité de vapeur qu'admettrait l'espace dont il s'agit serait au contraire plus petite qu'elle ne l'eût été au sein de l'atmosphère.

Pour concevoir la différence, raisonnons d'abord d'après cette même hypothèse où il n'y aurait point d'atmosphère, et imaginons que les eaux qui baignent la terre étant à  $15^{\text{d}}$  de Réaumur, elles aient fourni toute la quantité de vapeur qui peut se développer à cette température. S'il y avait quelque part au-dessus de la surface de l'eau un vase dans lequel la portion de vapeur qui se formerait à cet endroit s'introduisit de manière à ne pouvoir s'échapper, la force élastique de cette vapeur serait capable de supporter une pression de  $13^{\text{mit}},5$  ou 6 lignes de mercure (289). Il suit de là que telle serait aussi la force de la couche de vapeur située près de la surface de l'eau dans l'espace libre; et il est visible que cette force ferait équilibre à la pression de toutes les couches supérieures. Mais il en serait ici de la vapeur comme de l'air, c'est-à-dire que ses différentes couches étant moins comprimées, à mesure qu'elles se trouveraient à une plus grande élévation, leurs densités, à différentes hauteurs en progression arithmétique, suivraient la loi d'une progression géométrique décroissante (444), en partant du terme qui répond à  $13^{\text{mit}},5$ .

Remettons maintenant la réalité à la place de cette hypothèse, et voyons ce qui arrive lorsque la vapeur, à mesure que le calorique l'entraîne avec lui, s'introduit dans l'air atmosphérique. Nous savons que, dans ce cas, la quantité de vapeur qu'admet un espace donné, est constamment la même, à égalité de température, quelle que soit d'ailleurs la densité de l'air qui occupe cet espace. Ainsi, à la température de  $15^{\text{d}}$ , la vapeur, prise à une hauteur quelconque, jouit d'une force élastique mesurée par  $13^{\text{mit}},5$  ou 6 lignes de mercure, laquelle s'ajoute à l'élasticité particulière de l'air, pour faire équilibre à la pression des couches supérieures (299). Donc la quantité de vapeur est beaucoup plus grande, à égalité d'espace, lorsque cette vapeur étant soumise à l'influence de l'atmosphère, conserve partout une densité uni-

forme, qu'elle ne le serait dans le cas où, abandonnée à ses propres forces, elle aurait une densité qui n'étant égale à la précédente que dans la première couche, diminuerait progressivement dans toutes les couches suivantes.

### De la formation des Brouillards, des Nuages, de la Neige et de la Pluie, à l'aide de la Vapeur vésiculaire.

476. Nous avons considéré jusqu'ici la vapeur comme étant maintenue à l'état de fluide élastique par l'interposition des molécules du calorique entre les molécules aqueuses. Tant qu'elle ne dépasse pas la quantité que l'air est susceptible d'en admettre entre ses propres molécules, elle ne trouble point la transparence de ce fluide. Les rayons de la lumière traversent et l'air et la vapeur avec une égale liberté. Mais lorsque celle-ci se condense, par une suite de son abondance qui excède la capacité de l'air, elle passe à différens états sous lesquels elle s'offre à nos regards, et remplit presque toute la scène des météores.

477. Au moment où commence ce passage, la vapeur, dont l'air, dans ce cas, est toujours supersaturé, se transforme en une multitude de petites sphères creuses, d'une couleur blanche, que l'on a désignées sous le nom de *vésicules*, et qui ont fourni au célèbre Saussure le sujet d'un travail très intéressant, dont il a consigné les résultats dans son Essai sur l'Hygrométrie (1).

478. Les brouillards et les nuages ne sont autre chose que des assemblages de ces vésicules. C'est ce dont Saussure s'est assuré, en observant immédiatement un nuage sur une haute montagne. Il saisissait le moment où l'agitation de l'air chassait quelque particule du nuage au foyer d'une lentille placée près de son œil, et à l'aide du grossissement produit par cette lentille, la particule se montrait sous la forme d'une petite sphère blanche. En exami-

---

(1) Imprimé à Neuchâtel, 1783, p. 198 et suiv.

nant même à l'œil nu, un nuage ou un brouillard suffisamment éclairé, il voyait les particules dont il était composé, flotter et voltiger dans l'air avec une légèreté qui prouvait qu'elles étaient creuses.

479. Le même savant a fait une expérience qui consistait à exposer aux rayons du soleil, ou à un grand jour, dans un lieu où l'air était calme, un vase rempli d'un liquide très chaud, d'une couleur noire ou très obscure, tel que du café ou de l'eau mêlée d'un peu d'encre, et il a vu sortir de cette eau une fumée plus ou moins épaisse, qui, après s'être élevée jusqu'à une certaine hauteur, a fini par disparaître. En observant cette fumée d'un œil attentif, et mieux encore avec le secours d'une lentille, il était facile de reconnaître qu'elle était composée de grains arrondis, blanchâtres et séparés les uns des autres.

480. Cette expérience offrait l'analogie de ce qui se passe tous les jours naturellement sous nos yeux, dans la production de la fumée. La vapeur qui se développe à chaque instant, rencontrant un air plus froid qu'elle, et ne pouvant se loger toute entière dans les interstices de cet air, la partie qui est en excès, subit un refroidissement qui la condense, et la rend sensible à l'œil sous la forme d'une vapeur vésiculaire, qui s'élève par sa légèreté spécifique dans la partie supérieure de l'air, où trouvant des interstices libres, elle s'y introduit et disparaît.

481. C'est de la même manière que se forment les brouillards, au milieu d'un air assez froid pour qu'ils y restent suspendus, et couvrent d'un voile plus ou moins épais les objets environnans. Les nuages ne diffèrent des brouillards, qu'en ce que la vapeur vésiculaire y est plus condensée.

482. L'augmentation de chaleur qui a lieu en été, pendant le jour, à mesure que le soleil monte au-dessus de l'horizon, fait souvent évanouir le brouillard qui s'était formé pendant la nuit, et l'air reprend sa transparence. Dans ce cas, le calorique ramène la vapeur vésiculaire, à l'état de fluide élastique, et l'élévation de température que l'air lui-même a subie, permet à la vapeur de s'engager dans les interstices de ce fluide, sans perdre de sa chaleur.

On observe un effet du même genre, lorsqu'on a commencé à raréfier l'air renfermé sous le récipient d'une machine pneumatique. Le refroidissement qui a lieu dans le premier instant, détermine d'abord une partie de la vapeur que contenait cet air à se convertir en vésicules qui se précipitent sous la forme d'un nuage. Mais bientôt ce nuage se perd dans l'air, où il s'était formé, en reprenant son premier état, dès que le calorique, restitué par les corps environnans, a fait remonter la température au même degré.

483. Lorsque la température de l'air, en s'abaissant, est arrivée au degré de la congélation, les petites gouttes d'eau qui résultent de la condensation des vésicules, se convertissent en neige, et, se réunissant plusieurs ensemble, pendant leur chute, arrivent à terre sous la forme d'une espèce d'étoile à six rayons, si leur cristallisation s'opère au milieu d'un air calme, ou sous la forme de flocons irréguliers, si l'agitation de l'atmosphère donne lieu aux petits cristaux de se heurter et de se rassembler en groupes.

484. La neige garantit, comme l'on sait, les plantes auxquelles elle sert comme de manteau, pendant l'hiver, des effets du froid de l'atmosphère. Elle contribue encore d'une autre manière à leur conservation; elle prévient ce rayonnement vers le ciel, qui, par des nuits calmes et sereines, suffit seul pour faire prendre aux corps terrestres une température très sensiblement inférieure à celle de l'air.

485. Enfin, lorsque celle-ci a subi au contraire un certain degré d'élévation, les particules de la vapeur condensée se réunissent en gouttes de pluie, au milieu même de l'atmosphère, en sorte que ne pouvant plus les soutenir, elle les abandonne à leur pesanteur.

486. Il est facile de saisir l'analogie que plusieurs faits, dont l'observation nous est familière, ont avec les précédens. Tout le monde sait que, pendant les temps de gelée, les vitres des appartemens sont mouillées à l'intérieur. Comme l'air du dehors est alors plus froid que celui du dedans, le calorique renfermé dans la partie de ce dernier qui est en contact avec les vitres, ayant la liberté de passer à travers leur petite épaisseur, se répand à l'ex-

rière , pour satisfaire sa tendance vers l'équilibre. Il en résulte que les molécules de la vapeur contenue dans l'air voisin des vitres , se condensent jusqu'au point de former de l'eau qui se dépose sur la surface des vitres. C'est le contraire dans les temps de dégel , où la température extérieure est la plus haute , ce qui fait dire que l'on a froid dans les appartemens ; l'humidité paraît alors en dehors sur les vitres. On conçoit aussi pourquoi l'haleine des animaux , plus chaude pendant l'hiver que l'air où elle se répand , devient visible sous la forme d'un nuage produit par la condensation des molécules aqueuses qu'elle entraîne avec elle.

Nous ne parlons pas de la rosée , parce que l'explication que M. Wels a donnée de sa formation se rattache à la théorie du calorique rayonnant , qui a été exposée plus haut. A l'égard de la grêle , nous nous réservons de faire connaître l'idée très plausible que le célèbre Volta a émise sur sa production , en y faisant intervenir l'action de l'électricité , lorsque nous aurons été conduits par l'ordre des matières à développer la théorie de ce fluide.

487. La météorologie est une des parties de la Physique sur laquelle l'état actuel de nos connaissances laisse le plus à désirer. Et pour ne parler que du dernier des phénomènes que nous avons décrits , et qui détermine le retour de la vapeur à l'état de liquidité , les causes des diverses modifications qu'il subit nous échappent encore. Tantôt une suite de beaux jours est interrompue par une pluie durable ; tantôt un nuage épais autour duquel d'autres nuages s'amoncellent , vient tout d'un coup obscurcir un ciel pur et serein ; ce groupe agité par un tourbillon de vent verse , comme un torrent , une de ces pluies abondantes auxquelles on a donné le nom d'*ondées* ; un instant après le soleil reparaît dans tout son éclat , et rien ne rappelle plus le grand phénomène qui vient d'avoir lieu que l'eau qui ruisselle encore sur la terre ; l'œil n'aperçoit dans le ciel ni les traces de son apparition récente , ni les présages de son retour prochain.

*Des Trombes.*

488. Un autre phénomène que l'on admirerait s'il était moins redoutable est celui de la trombe. Il provient d'un nuage qui s'offre assez ordinairement sous la forme d'un cône renversé dont la base adhère à d'autres nuages auxquels le cône est suspendu. Lorsque la trombe est produite au-dessus de la mer, l'eau qui lui correspond s'élève en formant un second cône dont l'axe est sur la même direction que celui du cône supérieur. L'eau qui se précipite de toutes les parties de la trombe, et à laquelle se joint quelquefois une grêle abondante, est lancée au loin par les vents impétueux qui se déchaînent à l'entour. Les ravages que produit ce météore sont affreux. Il déracine les arbres les plus forts, et les jette très loin de l'endroit où ils croissent. S'il passe au-dessus d'une ville, il renverse les toits, les cheminées, ou même les murs des maisons, et force quelquefois les barres de fer qui portent les girouettes. Les marins, lorsqu'ils aperçoivent une trombe, font tous leurs efforts pour s'en éloigner, dans la crainte que si elle venait à tomber sur le vaisseau, elle ne le submergeât à l'instant. Ce météore est beaucoup plus rare sur terre que sur mer; il se montre assez ordinairement pendant les grandes chaleurs et après un long calme (1).

*Réflexions sur les indications du Baromètre.*

489. Les variations de l'atmosphère, en augmentant ou en diminuant la pression que l'air exerce sur le mercure du baromètre, déterminent la colonne de ce liquide à s'allonger ou à se raccourcir, en sorte que la quantité de la pression dont il s'agit est indiquée à chaque instant par le nombre qui répond à la hauteur du mercure; et parce qu'il arrive assez souvent que le baromètre baisse lorsqu'il y a de l'agitation dans l'air, ou que le temps se dispose à la pluie, et que, au contraire, il monte aux approches d'un

---

(1) Encyclopédie méthod., Marine, t. III, deuxième partie, p. 791,

temps calme et serein , on a joint à certains degrés de l'échelle des indications de l'état du ciel , que la hauteur à laquelle parvient alors le mercure semble présager le plus communément. Mais l'observation prouve que le beau temps et la pluie n'ont pas une influence constante et réglée sur les variations du baromètre , qui ne sont en rapport exact qu'avec les pressions de l'air ; et l'on peut dire que l'Arithmétique de cet instrument est plus sûre que son langage.

En supposant même que les prédictions du baromètre s'accordassent toujours avec les faits, il faudrait pouvoir expliquer cet accord d'une manière satisfaisante. Mais malgré l'habileté des physiciens qui se sont occupés de ce sujet , et en général de tout ce qui concerne les variations de l'atmosphère , il nous semble que la théorie que l'on a donnée laisse encore beaucoup à désirer. Seulement nous avons des principes solidement établis , dont la liaison avec l'objet de cette même théorie fait espérer qu'ils seront un jour employés avec avantage à la développer. Tels sont ceux qui résultent des expériences de Saussure , de Deluc , de Gay-Lussac et de Dalton. C'est en combinant ces principes avec des observations suivies sur l'état de l'atmosphère , que l'on parviendra à lever les nombreuses difficultés que présentent , et la diversité des phénomènes dont la théorie doit embrasser l'ensemble , et celle des causes qui souvent se compliquent dans la production d'un seul phénomène.

### De l'origine des Fontaines.

490. L'évaporation a fourni la véritable explication d'un fait qui avait long-temps embarrassé les physiciens. On voyait les fleuves et les rivières couler continuellement de leurs sources vers la mer , et ces sources ne tarissaient pas. La mer recevait de toutes parts les tributs de ces différentes eaux , et la mer ne regorgeait pas. On en avait conclu qu'il fallait que les eaux retournassent de la mer aux fontaines , et que la nature eût ouvert , entre les unes et les autres , une communication non interrompue. Mais par quel chemin se faisait ce retour ? où étaient les conduits qui

reportaient les eaux de la mer aux sources des fleuves ? comment perdaient-elles leur salure dans ce trajet ? C'était là le point de la difficulté, et pour la résoudre, on avait eu recours à différentes hypothèses plus spécieuses que solides.

Les uns adoptant l'idée de Descartes, croyaient que les eaux de la mer allaient, par des canaux souterrains, se rendre dans de grandes cavernes situées à la base des montagnes; qu'ensuite, au moyen de la chaleur qui régnait dans ces souterrains, elles se vaporisaient en se dépouillant de leur sel, et après s'être élevées jusqu'aux parois supérieures de la cavité, s'y condensaient par le refroidissement, et ruisselaient à l'origine des fleuves et des rivières. C'était une véritable distillation semblable à celle qui s'opère dans les laboratoires des chimistes.

Selon les autres, les eaux de la mer, poussées par l'action du flux, s'introduisaient dans la terre par une multitude de fissures, où elles éprouvaient une filtration qui leur enlevait leur sel. Ces espèces de canaux, dont les ramifications s'étendaient de toutes parts, les conduisaient ainsi jusqu'aux endroits où elles formaient des sources par leur réunion.

En appréciant ces hypothèses d'après les idées d'une saine Physique, on conçoit aisément qu'admettre dans la nature ces alambics et ces filtres, c'était lui prêter les moyens de notre art, et vouloir l'astreindre à le copier, elle qui est souvent pour lui un modèle inimitable. On conjectura enfin qu'il ne fallait point chercher aux fontaines une autre origine que celle des pluies elles-mêmes, et voici ce que l'observation et la raison nous dictent également sur cet objet.

491. L'eau s'élève de toutes parts, dans l'atmosphère, par l'évaporation. Celle de la mer dépose son sel, à mesure que ses molécules abandonnent sa surface, pour se mêler à l'air. Une partie des rosées et des pluies qui proviennent de ces eaux, tombe sur les sommets des montagnes : ces sommets paraissent même agir par affinité sur les nuages, et les fixer. On a observé qu'un nuage qui rencontrait un pic sur son passage, s'effaçait à mesure que ses différentes parties approchaient du contact. Les eaux s'infiltrèrent dans les terres qui recouvrent les montagnes, jusqu'à ce qu'elles

rencontrent un lit imperméable pour elles, et de là elles vont sourdre aux différens endroits de la pente et du pied de la montagne où le lit qui les a reçues se montre à découvert.

Dans les montagnes primitives, les eaux coulent le long des pierres dures qui composent comme la charpente de ces grandes masses, et de leur réunion se forment les torrens. Les montagnes secondaires, dont la matière est plus tendre et comme spongieuse, laissent pénétrer les eaux à une plus grande profondeur, où elles les arrêtent par des couches d'argile dont ces eaux suivent la pente; et c'est dans les joints des couches voisines que se trouvent les issues qui les répandent. Celles qui n'ont pas paru à la surface, continuent de couler dans le sein de la terre, où l'homme va les chercher par les ouvertures des puits qu'il creuse à côté de ses habitations.

492. Mais n'était-ce pas trop accorder à l'évaporation, que de supposer qu'elle pût fournir seule cette immense quantité d'eau nécessaire à l'entretien de tant de sources, surtout en y joignant celle qui est perdue pour les fleuves et les rivières, et qui sert de boisson aux animaux, ou est absorbée par les plantes? Mariotte, dans son *Traité du Mouvement des Eaux*, a discuté cette question avec son exactitude ordinaire, en comparant la quantité d'eau de pluie qui tombe à Paris et aux environs, pendant le temps d'une année moyenne, avec celle qui passe dans le même temps sous le Pont-Royal; et il résulte de ses observations et de ses calculs, que ce qui tombe d'eau excède tellement la quantité qui suffit pour entretenir le cours des rivières et pour remplir les étangs, qu'il faut supposer que le reste soit employé avec une profusion pour ainsi dire excessive, aux besoins de la végétation et aux autres dépenses particulières. La solution de la difficulté semble fournir une nouvelle objection en sens contraire (1).

L'explication que nous venons de donner ramène ainsi la nature à sa simplicité ordinaire. L'air atmosphérique, par une seule action, donne sans cesse un libre accès entre ses molécules

---

(1) *Traité du Mouvement des Eaux*, Paris, 1718, p. 38 et suiv.

à celles des eaux répandues sur la surface du globe , et après leur avoir servi de véhicule , il les laisse précipiter çà et là , et les rend à tout ce qui les redemande , aux plaines et aux prairies qu'elles désaltèrent , aux sources des fleuves qu'elles alimentent , et à l'Océan dont elles réparent les pertes.

### Des Aérostats.

Après avoir exposé les connaissances acquises jusqu'ici sur les divers états de l'air , nous ne pouvons nous dispenser de donner quelques détails sur une découverte propre à nous en procurer de nouvelles relativement à cet objet , et qui d'ailleurs a des points communs avec la Physique. C'est celle des aérostats , par laquelle Mongolfier a rendu son nom à jamais célèbre.

#### *Moyens anciennement proposés pour s'élever dans l'Air.*

493. L'idée d'un voyage entrepris par l'homme au milieu des airs , promettait un spectacle si imposant et si propre à exciter l'admiration , que l'on conçoit comment il s'est rencontré plus d'une fois des hommes assez hardis pour tenter de la réaliser. Le vol des oiseaux , en inspirant un sentiment de rivalité , semblait offrir le modèle du mécanisme qui devait servir à l'exécution du projet. Mais en premier lieu l'oiseau trouve des facilités pour exécuter les divers mouvemens relatifs au vol , dans la conformation de son corps , et dans la position et la structure de ses ailes composées de plumes , dont la substance est très légère , et qui sont des tuyaux creux ; de plus , la grande force musculaire dont il a été pourvu par l'Auteur de la nature , lui donne l'avantage de frapper l'air assez puissamment et assez rapidement pour s'élever à son gré , s'élancer en avant et planer au-dessus du même endroit. Dans l'homme , au contraire , la force des muscles , loin de compenser le désavantage du poids , est bien inférieure à ce qu'elle devrait être , toutes choses égales d'ailleurs , pour le mettre en état d'agir sur l'air , avec un excès de vitesse qui lui fit trou-

ver un point d'appui dans ce fluide si mobile et si prompt à céder. De là les tentatives malheureuses de tous ceux qui ont aspiré à la pratique d'un art qu'il fallait laisser aux héros de la fable.

494. On pouvait viser au même but d'une autre manière, en substituant au mécanisme du vol celui de la navigation. Pendant le cours des deux derniers siècles, Lana et Gallien, en se bornant à de simples spéculations, proposèrent deux moyens différens pour remplir ce second objet. Lana composait son appareil de quatre globes de cuivre, dans lesquels on ferait le vide, et qui étant à la fois très spacieux et très minces, deviendraient capables, par leur excès de légèreté, d'enlever un homme avec son support (1). Mais plusieurs savans ont réfuté cette idée, en objectant que les globes ne manqueraient pas de crever par la pression de l'atmosphère.

Gallien était parti d'une idée qui paraît d'abord plus plausible en elle-même, et qui consistait à faire flotter dans l'atmosphère un grand vaisseau occupé par un air respectivement plus léger que celui qui le soutiendrait (2). La difficulté eût été de mettre ce principe en exécution; mais comme Gallien ne prétendait offrir à son lecteur qu'une simple récréation physique, et le faire voyager en idée, rien ne le gênait du côté des moyens, pourvu qu'ils eussent leur possibilité dans la nature. En conséquence, il faisait son vaisseau aussi grand qu'une ville, et capable de contenir une armée avec tout son attirail, et des provisions pour un long voyage. Il le supposait ensuite transporté dans l'atmosphère, à une telle hauteur, que l'air dont il se remplirait fut une fois plus léger que celui au dessus duquel il flotterait. Mais quelque élevés qu'eussent été les bords du vaisseau, l'air qui s'y serait introduit se serait comprimé par son propre poids, dans le même rapport que l'air environnant, et l'on concevra aisément que dès lors le vaisseau n'aurait pu se soutenir un seul instant au milieu de l'atmosphère.

---

(1) *Prodomo, dell' Arte Maestra, Brescia, 1670.*

(2) *L'Art de Naviguer dans les airs, Avignon, 1755.*

*Premiers Aérostats.*

495. Ainsi l'on n'avait encore, relativement à l'art de s'élever dans les airs, que des essais infructueux et des spéculations fausses et romanesques, lorsqu'en 1782 Mongolfier, ayant réfléchi sur le phénomène que présentent les nuages qui se soutiennent en flottant dans l'atmosphère, conçut l'idée de donner des enveloppes très légères à des nuages factices, composés de vapeurs produites par la combustion de diverses substances. Il pensa que ces vapeurs, mêlées à l'air raréfié par la chaleur dans l'intérieur des enveloppes, formeraient avec elles un tout spécifiquement plus léger que l'air environnant. Quelques essais qu'il fit en particulier avec son frère, ayant eu une pleine réussite, ils répétèrent leur expérience à Annonay, l'année suivante, en présence d'un grand nombre de spectateurs; et là on vit une espèce de grand sac de toile, doublé en papier, et d'abord informe, couvert de plis et affaissé par son poids, se gonfler et se développer par l'action de la chaleur, s'élever ensuite sous la forme d'un ballon de cent dix pieds de circonférence, et parvenir à une hauteur de mille toises.

On sait que depuis, l'expérience fut renouvelée plusieurs fois à Paris, et que la machine servit à élever des hommes qui entretenaient eux-mêmes le feu dans un réchaud suspendu sous l'ouverture de l'aérostat. Dans les premiers essais, la machine était retenue par des cordes qui lui permettaient seulement de s'élever à une certaine hauteur. Enfin, Pilatre des Rosiers et Darlandes, partis avec l'aérostat abandonné à lui-même, parcoururent près de quatre mille toises en dix-sept minutes, et donnèrent le spectacle du premier voyage que l'homme ait fait à travers les airs.

Mongolfier dans ses expériences, faisait brûler des matières animales avec de la paille, pour enfler l'aérostat; et l'on aurait pu croire que l'ascension de la machine était due en partie à la présence d'un gaz particulier, composé des différens principes qui se développaient dans la combustion. Mais il est prouvé que cet effet provenait uniquement de la raréfaction de l'air renfermé dans l'aérostat.

*Aérostats à Air inflammable.*

496. Peu après la nouvelle de l'expérience d'Ammonay , Charles proposa de substituer à l'air dilaté, le gaz hydrogène , qui dans le plus grand état de pureté auquel on l'aït amené jusqu'ici , est environ treize fois plus léger que l'air. Il ne s'agissait que de trouver une enveloppe imperméable à ce gaz, et dans laquelle on pût l'emprisonner. Ce procédé était plus dispendieux , mais en même temps moins dangereux et plus simple que le premier ; l'aérostат se suffisait à lui-même , et son volume, ainsi que son poids , se trouvaient sensiblement diminués. Parmi les différentes substances dont on pouvait composer les enveloppes, Charles préféra le taffetas enduit de gomme élastique , qui provient du suc épaisi d'un arbre de l'Amérique , auquel on a pratiqué des incisions. On fait dissoudre cette gomme dans l'huile de térébenthine , avant d'en enduire le taffetas. On lança du Champ-de-Mars un globe construit par ce procédé , et qui avait environ douze pieds de diamètre. Ce globe s'éleva en deux minutes à près de cinq cents toises , il se soutint environ trois quarts d'heure dans l'air , et alla tomber à quatre lieues de Paris.

Quelque temps après , Charles et Robert , portés dans une nacelle suspendue à un autre aérostат du même genre , et de vingt-six pieds de diamètre , parcoururent un espace de neuf lieues avant de descendre ; et bientôt , Charles resté seul dans la nacelle , par un nouvel essor digne de son zèle et de son courage , s'éleva , en un clin d'œil , à une hauteur de près de dix-sept cents toises , comme pour aller , au nom des physiciens , prendre possession de la région des météores.

497. A mesure qu'un ballon de cette espèce s'élève davantage dans des couches d'air dont la densité diminue progressivement , le gaz , moins comprimé , fait effort pour s'étendre , ce qui peut occasionner la rupture du ballon. On prévient cet accident , en adaptant au haut du ballon une soupape que l'on est le maître d'ouvrir , pour laisser sortir une partie du gaz , lorsque sa dilatation a atteint sa limite. On peut encore modérer la résistance

de la soupape, de manière qu'elle soit moindre que celle de l'étoffe; dans ce cas, la soupape s'ouvrira d'elle-même pour donner une issue au gaz.

Les voyageurs étaient obligés de perdre encore de leur gaz, lorsqu'ils voulaient descendre. On a proposé d'enfermer le ballon dans un autre, occupé par de l'air atmosphérique; on ferait sortir, à volonté, une portion de cet air, ou l'on en fournirait de nouveau, au moyen d'un soufflet adapté au ballon extérieur, ce qui donnerait au voyageur la facilité de s'élever ou de descendre, autant de fois qu'il voudrait, en conservant son gaz inflammable.

### *Usages des Aérostats, pour le progrès de la Physique.*

498. La perfection à laquelle on a porté parmi nous la construction des ballons aérostatiques, faisait espérer que l'usage de ces belles machines pourrait conduire à de nouvelles connaissances intéressantes sous le rapport de la Physique. Cette espérance a déjà été réalisée en partie, depuis le moment où deux physiciens distingués, M. M. Biot et Gay-Lussac, profitant d'une circonstance favorable, s'offrirent d'eux-mêmes, par dévouement, pour une savante expédition aérienne à laquelle un choix unanime aurait pu également les appeler. Nous rendrons compte, dans la suite, des observations qui en ont été le fruit. Mais nous devons parler ici d'un des principaux résultats d'un nouveau voyage entrepris par M. Gay-Lussac seul, et qui a été remarquable en lui-même, par la circonstance de la plus grande élévation à laquelle l'homme soit encore parvenu. Elle était de 6977<sup>mètres</sup>, 37 (3579<sup>toises</sup>, 9) au-dessus de Paris, et de 7016<sup>mètres</sup>. (3600<sup>toises</sup>) au-dessus du niveau de la mer. M. Gay-Lussac ayant ouvert, à la hauteur de 6636 mètres, un ballon de verre qu'il avait apporté, après y avoir fait le vide, s'en servit pour puiser de l'air dans la région où il se trouvait, et le referma exactement. De retour à Paris, il analysa cet air comparativement avec de l'air pris au milieu de la cour d'entrée de l'Ecole Polytechnique, et il résulta de cette comparaison que l'air qu'on respire à la surface de la terre, et celui qui est situé à une très

grande hauteur, ont sensiblement la même composition, et contiennent chacun 0,2149 d'oxygène (1).

### 5. De l'Air considéré comme Véhicule du Son.

Nous avons maintenant à considérer l'air comme étant le milieu qui transmet le son. Nous exposerons d'abord les phénomènes généraux des corps sonores ; de là nous passerons à la comparaison des sons appréciables, d'après le rapport entre les nombres de vibrations qui leur correspondent, et enfin nous déduirons, des observations relatives aux effets des instrumens à vent, la théorie la plus vraisemblable de la propagation du son.

#### *Du Son en général.*

499. Le son naît d'un mouvement vibratoire imprimé par la percussion, ou de toute autre manière, aux molécules d'un corps. Prenons pour exemple une corde d'instrument que l'on pince ; à l'instant tous les points de cette corde s'éloignent plus ou moins de la position qu'ils avaient, lorsque la corde était en repos, suivant qu'ils sont plus ou moins éloignés des points d'attache ; et la corde entière va et revient alternativement, en deçà et au-delà de sa première situation, par un mouvement de vibration qui provient de son élasticité.

Les molécules d'air contiguës aux différens points de la corde, prennent des mouvemens semblables à ceux de ces points ; elles vont et reviennent avec eux. Chaque molécule communique du mouvement à celle qui est derrière, celle-ci à une troisième, et ainsi de suite, jusqu'aux molécules qui sont en contact avec le tympan de l'oreille. L'air agit à son tour sur cette membrane, en lui communiquant ses vibrations, qu'elle transmet au nerf auditif, et de là résulte la sensation du son.

500. Supposons maintenant que le corps sonore soit un timbre, comme dans l'expérience que nous citerons bientôt. On peut con-

---

(1) Journal de Physique, Frimaire an XIII, p. 454 et suiv.

cevoir ce timbre comme fermé d'une infinité d'anneaux superposés, depuis la base jusqu'au point culminant : au moment de la percussion, chaque anneau se comprime de manière à prendre une figure ovale, dont le grand axe est perpendiculaire au sens suivant lequel la percussion s'est faite. Le retour de l'anneau à sa première figure, est suivi d'un nouveau changement de figure, qui produit un ovale en sens contraire du premier; et les deux changemens se succèdent ainsi, jusqu'à ce que le son s'éteigne avec le mouvement. Les vibrations des différentes molécules qui composent chaque anneau, excitent de même, dans l'air voisin, une petite agitation qui se communique de proche en proche, jusqu'au terme où l'on cesse d'entendre le son; et il en faut dire autant, proportion gardée, de tous les corps ébranlés par la percussion.

A l'égard du degré auquel répond le son rendu par un timbre, il faut concevoir que les anneaux situés près de la base, ayant une plus grande circonférence, tendent à faire plus lentement leurs vibrations, tandis que les anneaux plus voisins du sommet, où la circonférence est plus petite, tendent à produire des vibrations plus fréquentes. Il s'établit donc ici, à peu près comme dans le pendule composé, une compensation en vertu de laquelle les vibrations se trouvent ramenées à une égale durée, qui est une espèce de moyenne entre celle qui aurait lieu pour les anneaux inférieurs, et celle qui mesurerait le mouvement des anneaux supérieurs, si les uns et les autres étaient isolés.

501. Une observation très facile à faire, et qui nous paraît mériter d'être indiquée, est celle de l'effet que produisent sur l'eau les vibrations d'un verre à boire, rempli de ce liquide presque jusqu'au haut, tandis qu'on fait tourner sur ses bords un doigt mouillé, pour exciter un son connu de tous ceux qui se sont amusés de cette expérience. Voici ce que l'on remarque en pareil cas : l'eau tourne autour du verre, en suivant le mouvement du doigt et en même temps sa surface est toute parsemée de rides blanchâtres, qui se succèdent rapidement en allant des bords vers le centre; et si l'on précipite le mouvement, les molécules de l'eau jailliront de tous côtés autour du verre et sur la main de l'observateur. Cette expérience réussit mieux avec un verre à pied,

que l'on maintient dans une position fixe, en appuyant avec la main sur sa base.

On pourra remarquer, en la faisant successivement avec des verres de grandeurs différentes, que les rides deviennent plus petites, et prennent un mouvement plus rapide, à mesure que le son est plus aigu.

502. Le son se propage de tous côtés en ligne droite, tant qu'aucun obstacle ne l'arrête; en sorte que l'on peut considérer chaque point du corps sonore, comme étant le sommet commun d'une infinité de cônes très déliés, et d'une longueur indéfinie. Chacun de ces cônes est ce qu'on appelle un *rayon sonore*; au reste, nous n'avons fait qu'ébaucher ici la théorie de la propagation du son, sur laquelle nous reviendrons avec plus de détails, lorsque nous aurons exposé les connaissances qui doivent en fournir le développement.

### Expériences sur la Transmission du Son.

503. On prouve, à l'aide d'une expérience fort simple, que l'air est le véhicule du son. Elle consiste à placer sous le récipient d'une machine pneumatique, un mouvement d'horlogerie, propre à faire résonner un timbre, et qui repose sur un coussinet rempli de coton ou de laine. On fait le vide, et ensuite au moyen d'une tige qui traverse le haut du récipient, on appuie sur une détente, qui, en se lâchant, permet au rouage d'agir; on voit alors, sans rien entendre, le marteau frapper continuellement le timbre.

Hauksbée, pour rendre cette expérience encore plus décisive, plaçait le timbre sous un premier récipient qui restait plein d'air, et qui était recouvert d'un second récipient tellement disposé, que l'on pouvait faire le vide entre l'un et l'autre. Quoiqu'il se produisît du son dans le récipient intérieur, lorsque le marteau était mis en mouvement, le timbre demeurait également muet pour l'observateur (1).

---

(1) Expér. physico-mécaniques, etc., Paris, 1754, t. II, p. 326.

504. Il suit de là, que dans un air raréfié jusqu'à un certain degré, tel que celui qui repose sur le sommet des hautes montagnes, le son doit perdre de sa force, et si ce sommet est isolé, l'absence des corps susceptibles de répercuter le son, en diminuera encore l'intensité. C'est ce qu'a observé Saussure, lorsqu'il se trouvait sur la cime du Mont-Blanc, où, suivant son rapport, un coup de pistolet ne faisait pas plus de bruit qu'une petite pièce d'artifice n'en fait dans une chambre (1).

505. On a remarqué, d'une autre part, que le son acquérait de la force à travers un air condensé, et que la densité restant la même, la force du son s'accroissait aussi lorsqu'on augmentait, au moyen de la chaleur, le ressort de l'air.

506. Le son se fait aussi entendre, mais plus faiblement, à travers l'eau, soit que l'on plonge le corps sonore dans ce liquide, soit que l'observateur s'y trouve plongé lui-même; ce qui indique, comme nous l'avons déjà remarqué (321), que l'eau est compressible et élastique jusqu'à un certain point, quoique jusqu'ici on n'ait pu parvenir à la comprimer sensiblement par des expériences directes.

507. Tous les corps solides dont la structure est telle, que le mouvement de vibration imprimé à quelques-unes de leurs molécules, puisse se communiquer à travers leur masse, seront de même susceptibles de transmettre le son. Un fait assez singulier dans ce genre, et que les philosophes ne dédaignent pas de répéter après les enfans, est celui qui a lieu, lorsqu'ayant l'oreille appliquée à l'un des bouts d'une longue poutre, on entend distinctement le choc d'une tête d'épingle qui frappe le bout opposé, tandis qu'à peine le même son peut-il être entendu à travers l'épaisseur de la poutre. Cette différence provient de ce que, dans le premier cas, le son suit la direction des fibres longitudinales, où la continuité des parties est plus parfaite que dans le sens transversal; et il est remarquable que ces parties aient assez de ressort, pour que le son perde si peu de sa force en parcourant l'espace qu'elles occupent.

---

(1) Voyages dans les Alpes, N° 2020.

508. Les corps qui frappent l'air immédiatement, excitent aussi dans ce fluide des vibrations sonores. Ainsi l'air éclate sous le fouet qui l'agite avec violence, et siffle sous l'impulsion d'une baguette; il devient également capable de résonner, lorsqu'il va lui-même frapper un corps solide avec une certaine vitesse, comme lorsque le vent souffle contre les édifices, les arbres et autres corps qui se trouvent sur son passage.

### *De la Vitesse du Son.*

509. Le son emploie un certain temps à se répandre dans l'air, et parvient plus tard à l'oreille, lorsqu'on s'éloigne davantage du corps qui le rend. Les physiciens ont cherché à déterminer, par l'expérience, la vitesse avec laquelle se fait la propagation du son; et pour y parvenir, ils ont profité de ce que celle de la lumière est au contraire sensiblement instantanée, du moins dans les distances auxquelles s'étendent nos mesures. L'explosion du canon était propre à donner les résultats cherchés; il ne s'agissait que d'estimer le temps qui s'écoulait entre le moment où la lumière indiquait à l'œil le départ du son et celui où le son lui-même avertissait l'oreille de son arrivée. L'incertitude que laissaient encore diverses expériences qui avaient été faites sur cet objet, déterminèrent, en 1738, l'Académie des Sciences à en entreprendre de nouvelles, sur une ligne de 14636 toises, située entre Montlhéry et Montmartre.

On trouva que le son avait une vitesse uniforme, qui lui faisait parcourir environ 173 toises (337 mètres) par seconde, en sorte qu'il était seulement plus faible à une plus grande distance, mais franchissait successivement des espaces égaux en temps égaux. La vitesse paraissait la même par un temps pluvieux ou serein; mais la direction et la force du vent pouvaient la faire varier. Si le vent était dirigé perpendiculairement à la ligne qui allait du corps sonore à l'observateur, la vitesse du son était encore la même que dans un temps calme; mais si la direction du vent concourait avec la ligne dont il s'agit, alors, suivant qu'elle avait lieu dans le même sens que le son, ou en sens opposé, il fallait

ajouter la vitesse du vent à celle du son, ou l'en retrancher. Enfin la force du son n'apportait aucun changement dans sa vitesse.

La connaissance de la vitesse du son fournit un moyen d'estimer à peu près, par la lumière et par le bruit du canon, les distances que l'on a intérêt de connaître à l'instant comme celle où l'on se trouve à l'égard d'une ville assiégée, d'un vaisseau ou d'un port de mer.

510. On a essayé aussi de déterminer, à l'aide du calcul, la vitesse du son. Mais la théorie donnait pour cette vitesse une quantité sensiblement plus petite que celle qui résultait de l'observation, et aucune des hypothèses que l'on avait imaginées pour rendre raison de cette différence n'était satisfaisante. Laplace, en réfléchissant sur un phénomène dont nous devons la connaissance à la Chimie moderne, a conçu la possibilité d'en déduire la solution de la difficulté dont il s'agit. On sait que l'air, à mesure qu'on le condense, développe une partie de la chaleur latente qu'il renfermait, et qui passe à l'état de chaleur sensible; et au contraire, lorsqu'on le raréfie, il absorbe une certaine quantité de chaleur sensible, qui devient chaleur latente (229). Or, dans la propagation du son, les molécules de l'air éprouvent successivement de petites condensations et de petites dilatations semblables à celles d'un ressort qui tour à tour se comprime et se débande. Elles développent donc au moment de la condensation, une petite quantité de chaleur qui, en élevant leur température, augmente leur force élastique, d'où résulte une accélération dans la vitesse de leur mouvement vibratoire. Lorsqu'ensuite le débandement, qui est une vraie dilatation, succède à la compression, la petite quantité de chaleur développée redevient sensible; après quoi les mêmes effets se répètent, et ainsi de suite; d'où l'on voit que la propagation du son doit se faire plus rapidement que dans le cas d'une température uniforme.

La manière dont M. Biot a appliqué l'analyse mathématique à cette idée, lui donne un nouvel air de vérité. Cet habile géomètre a introduit dans la formule qui représente la vitesse du son, d'après la théorie ordinaire, l'expression de l'accroissement de vitesse que doit produire l'action de la chaleur; et comme les

quantités qui entrent dans cette expression ne pourraient être déterminées que très difficilement par l'expérience, il s'est proposé le problème inverse, qui consiste à chercher, d'après les connaissances acquises sur la propagation du son, quelle doit être la petite portion de chaleur rendue sensible par chaque condensation, et l'accroissement d'élasticité qui en est la suite, pour que la formule soit d'accord avec l'observation; et il a trouvé que les valeurs auxquelles conduisait le calcul n'avaient rien qui ne fût compatible avec des résultats d'expériences faites en grand, ce qui promet une solution directe du problème, fondée sur la cause dont nous avons parlé, quand l'observation aura fourni les données nécessaires pour y parvenir.

511. Nous avons dit (507) que l'air n'est pas le seul milieu qui soit susceptible de transmettre le son, et que les corps solides et l'eau partagent avec lui cette propriété. Elle a été aussi reconnue dans diverses substances aëriiformes. Hassenfratz a entrepris une suite d'expériences faites en grand et dans les circonstances les plus propres à les rendre concluantes, pour comparer la vitesse du son propagé par l'intermède de l'air, avec celle qui a lieu à travers des corps solides, et pour étendre cette comparaison à l'intensité du son, d'après la différence des distances auxquelles on cesse de l'entendre, suivant qu'il est transmis de l'une ou l'autre manière.

Ce physicien étant descendu dans une des carrières situées au-dessous de Paris, chargea quelqu'un de frapper avec un marteau contre une masse de pierre qui forme le mur d'une des galeries pratiquées au milieu des carrières. Pendant ce temps il s'éloignait peu à peu du point où la percussion avait lieu, en appliquant une oreille contre la masse de pierre; bientôt il distingua deux sons, dont l'un était transmis par la pierre et l'autre par l'air. Le premier arrivait à l'oreille beaucoup plus tôt que l'autre; mais il s'affaiblissait aussi beaucoup plus rapidement, à mesure que l'observateur s'éloignait, en sorte qu'il cessa d'être entendu à la distance de cent trente quatre pas, tandis que celui auquel l'air servait de véhicule ne s'éteignit qu'à la distance de quatre cents pas.

Des corps de diverses natures, tels que des barrières de bois et des suites de barres de fer disposées sur une longueur plus ou moins considérable, ont donné des résultats analogues, avec cette différence, que le son propagé par le bois parcourait un beaucoup plus grand intervalle que le son transmis par l'air, avant d'arriver au terme où il devenait nul pour l'oreille, ce qui était l'effet inverse de celui qu'avait offert la comparaison de l'air avec la pierre. Le même physicien a remarqué de plus que non-seulement la transmission du son à travers les corps solides est en général plus rapide que celle qui a lieu par l'intermède de l'air, mais qu'elle se fait dans un temps inappréciable, du moins relativement aux distances auxquelles ses expériences ont été limitées, et dont la plus grande était de deux cent dix pas.

### Des sons réfléchis.

512. Lorsque le son rencontre un corps qui lui fait obstacle, les molécules d'air qui choquent ce corps sont réfléchies à la manière des corps élastiques, en faisant leur angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, et communiquent ensuite à celles qui sont derrière elles le mouvement qu'elles ont reçu par la réflexion; d'où il suit que le son se répand de nouveau dans toutes les directions, en retournant de l'obstacle vers l'espace qu'il avait d'abord traversé. Dans les lieux clos, tels que les appartemens, le son est ainsi renvoyé continuellement d'un mur à l'autre, et lorsque le lieu est voûté, ou que ses parois ont une élasticité sensible, on dit que ce lieu devient sonore, ce qui signifie que le son paraît s'y prolonger, en se succédant à lui-même dans de si petits intervalles que l'oreille ne fait pas la distinction de toutes ces impressions qui arrivent à elle coup sur coup.

Mais si l'on se trouve en plein air à une certaine distance de l'obstacle, il s'écoulera un intervalle de temps sensible entre le son direct et le son réfléchi, et l'on aura ce qu'on appelle un *écho*, et que ceux qui n'y font pas attention prennent pour une simple répétition des dernières paroles prononcées. On voit aisément pourquoi les poètes, qui faisaient de l'écho un être animé, avaient

placé son habitation près des montagnes, des rochers et des bois.

Suivant que l'obstacle qui réfléchit le son est unique, ou qu'il se trouve plusieurs obstacles placés à des distances convenables, l'écho est simple ou redoublé. Musschenbroeck cite un écho de ce dernier genre, qui répétait le même son jusqu'à quarante fois. Deux murs parallèles qui se renvoient mutuellement le son peuvent produire un écho redoublé, pour un observateur placé dans l'espace intermédiaire.

513. L'art a disposé certaines constructions d'édifices, de manière à produire, au moyen du son réfléchi, un effet curieux qui s'explique aisément par la Géométrie. On sait que l'ellipse a cette propriété, que deux rayons menés de ses foyers à l'un quelconque des points de sa courbure, font des angles égaux avec la tangente au même point. Si donc on suppose une voûte ou un mur d'une figure elliptique, tous les rayons sonores partis de l'un des foyers, iront après leur réflexion sur les différens points de la courbe, passer par l'autre foyer où ils concentreront le son. De cette manière, un homme, en plaçant sa bouche à l'un des foyers, pourra prononcer à voix basse des paroles qui seront entendues distinctement par une oreille attentive à l'autre foyer, et qui resteront secrètes pour les témoins situés entre les deux interlocuteurs, en sorte qu'il n'y aura que l'écho qui soit dans la confidence.

### *Des sons comparés.*

514. Après avoir considéré le son dans ses effets les plus généraux, tels que le mouvement de vibration du corps qui le fait naître, ou de l'air qui le propage, la vitesse avec laquelle il parcourt cet air, sa production à la rencontre des corps qui le réfléchissent, nous avons à traiter maintenant des rapports entre les sons, comparés d'après les nombres de vibrations que font, dans le même temps, différens corps sonores. Les observations qui déterminent ces rapports sont du ressort de la Physique, et l'art du musicien consiste à les employer de la manière la plus propre à flatter l'oreille, soit par la succession bien or-

donnée des sons simples d'où dépend la mélodie, soit par l'heureuse combinaison des sons simultanés, dans laquelle consiste l'harmonie. Le physicien n'envisage que ce qu'on pourrait appeler *la musique de l'esprit*; c'est à l'artiste qu'appartient *la musique du sentiment*.

515. Les sons ne se prêtent à la comparaison qu'autant qu'ils sont appréciables. C'est cette qualité du son qui fait que l'oreille en saisit le degré, et que chacun a naturellement la facilité, lorsqu'il entend un de ces sons qui est à la portée de sa voix, d'en former un qui l'imité parfaitement, et qui ne paraît être que le même son rendu par un autre organe.

Cette manière de parler des sons, comme étant placés à différents degrés les uns au-dessus des autres, et de supposer que la voix monte ou descend, n'est qu'un langage figuré qui a été suggéré par les apparences, et auquel la notation de la musique a été assortie.

On donne aussi le nom de *graves* aux sons les plus bas, et celui d'*aigus* à ceux qui sont les plus hauts.

Mais la différence réelle et physique entre un son grave et un son aigu, consiste en ce que le corps qui rend le premier, fait un moindre nombre de vibrations, dans un temps donné, que celui qui produit le second.

### Des principaux Intervalles entre les Sons.

516. Les expériences faites sur les cordes sonores ont fourni un moyen facile de trouver le rapport entre les nombres de vibrations, d'où résultent deux sons qui diffèrent entre eux d'un nombre déterminé de degrés. En général, la fréquence des vibrations d'une corde sonore dépend de trois choses, savoir, la longueur de cette corde, sa grosseur et sa tension. La formule à laquelle Taylor a été conduit par le calcul, fait voir qu'à densité égale, le nombre des vibrations, dans un temps donné, est proportionnel à la racine carrée du poids qui tient cette corde tendue, divisée par le produit de la longueur de la corde par son diamètre; et c'est ce que confirme l'observation.

517. Dans les expériences relatives à cet objet, on se sert d'un instrument appelé *sonomètre*, qui est une espèce de caisse oblongue, sur laquelle on tend, avec des poids, deux cordes de laiton, pour comparer les nombres de leurs vibrations. Ordinairement on ne fait varier que l'une des trois quantités dont nous avons parlé; c'est-à-dire, par exemple, que si l'on tend les cordes avec des poids différens, on prend ces cordes de la même grosseur, et on leur donne la même longueur. Dans ce cas, le rapport entre les nombres de vibrations, pendant un certain temps, pris pour unité, est indiqué par le rapport des racines carrées des poids tendans.

Si l'on représente de même par l'unité le plus bas des deux sons que l'on compare, on aura les rapports suivans entre le son dont il s'agit, et le son aigu qui est supposé être entendu en même temps que lui.

L'octave sera représentée par 2, c'est-à-dire, que le son aigu fera deux vibrations, tandis que le son grave n'en fera qu'une; c'est l'intervalle entre les deux *ut* de la gamme ordinaire.

La quinte, ou l'intervalle de *ut* à *sol*, en montant, aura pour expression  $\frac{3}{2}$ ; ainsi le son aigu de cette consonnance fera trois vibrations contre deux du son grave.

La quarte, ou l'intervalle de *ut* à *fa*, sera représentée par  $\frac{4}{3}$ .

La tierce majeure, ou l'intervalle de *ut* à *mi*, par  $\frac{5}{4}$ .

La tierce mineure, ou l'intervalle de *mi* à *sol*, par  $\frac{6}{5}$ .

Nous nous bornons ici aux consonnances; on représenterait de même les dissonances, en faisant varier de plusieurs autres manières les deux termes du rapport.

### De la Série des Sons renfermés dans celui que rend une corde vibrante.

Chaque son, tel qu'il parvient ordinairement à l'oreille, est, au jugement de cet organe, un effet très simple, une espèce d'élément dont rien ne paraît altérer la pureté; et cependant chaque son renferme réellement une multitude d'autres sons plus aigus, dont quelques-uns deviennent sensibles dans certains cas,

pour une oreille tant soit peu délicate, et les autres ont leur existence indiquée par différentes observations.

Supposons d'abord qu'il n'y ait dans un lieu qu'une seule corde d'une certaine longueur, comme l'une de celles qui forment la basse d'un clavecin, ou la grosse corde d'un violoncelle, et qu'après avoir tendu cette corde convenablement, on la fasse résonner. En prêtant une oreille attentive à une petite distance de la corde, on entendra, outre le son principal, deux autres sons plus faibles, mais très distincts; et si l'on représente toujours le son principal par l'unité, les deux sons concomitans seront représentés l'un par 3 et l'autre par 5; c'est-à-dire, que le premier étant *ut*, le second sera l'octave de sa quinte *sol* en montant, et le troisième la double octave de sa tierce majeure *mi*.

Cette expérience réussit de même avec un violon, lorsqu'on passe l'archet sur la grosse corde, à une petite distance du chevalet, dans une direction bien perpendiculaire à la corde, comme pour tirer un son plein et nettement prononcé. On peut à volonté laisser subsister ou supprimer les trois autres cordes, qui ne contribuent en rien à l'effet.

On entend aussi l'octave 2 et même la double octave 4 du son principal, mais il faut plus d'attention pour les distinguer, parce que les sons placés à l'octave l'un de l'autre, approchent beaucoup plus de se confondre pour l'oreille.

Nous avons donc la suite 1, 2, 3, 4, 5 qui représente les différens sons sensibles pour l'oreille, dont est composée l'harmonie d'un seul son.

519. Mais une autre expérience nous porte à croire que ce ne sont ici que les premiers termes de la véritable série qui s'étend indéfiniment. Car, si à côté d'une première corde on en dispose d'autres, dont les nombres de vibrations, qui répondent à une seule vibration de la première, soient 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, etc.; et si l'on fait résonner la première corde seule, toutes les autres frémiront et résonneront en même temps, quoique beaucoup plus faiblement. On peut rendre leur frémissement sensible à l'œil, en plaçant sur chacune d'elles un petit chevalet de papier que

l'on verra s'agiter, ou même sauter en bas, au moment où l'on pincera la corde principale.

Si les diamètres des différentes cordes sont égaux entre eux, et qu'il y ait de même égalité entre les tensions, les longueurs des cordes que la première fera résonner, en y comprenant l'unisson, devront être, d'après ce qui a été dit, comme les nombres 1,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{1}{6}$ , etc. Nous supposerons à l'avenir, pour plus grande simplicité, que les cordes ne varient que suivant leur longueur.

Or, puisque les premiers sons de la série se distinguent immédiatement dans la résonnance d'une corde que l'on fait vibrer toute seule, il n'y a pas lieu de douter que les suivans n'y soient pareillement renfermés; et si l'organe ne les saisit pas sans intermédiaire, c'est qu'ils sont tellement affaiblis qu'ils échappent à son attention; sur quoi nous remarquerons que, dans certains cas, avec une seule corde, on parvient même à démêler l'impression du son représenté par 7.

On a donné le nom de *son générateur* au son principal, et les sons plus faibles qui l'accompagnent ont été appelés ses *harmoniques*.

520. Quelques physiciens ont pensé que la corde principale se sous-divisait en parties aliquotes, semblables à celles qui représentaient les longueurs des autres cordes; en sorte que le son rendu par chacune de celles-ci, était produit, comme unisson, par la partie aliquote qui lui répondait dans la corde principale. Mais ni l'observation ni le calcul n'indiquent cette sous-division de la corde génératrice. Tout ce que l'on peut conclure des expériences citées, c'est que les vibrations d'une corde sonore ont la propriété d'exciter dans l'air, non-seulement des vibrations du même ordre, mais d'autres vibrations de différens ordres plus élevés, analogues à celles que les harmoniques y produiraient, si chacun d'eux était rendu par une corde distincte.

521. On pourrait croire encore que, quand on emploie une seule corde, la résonnance des harmoniques provient des corps environnans, dont les fibres se trouvent à leur unisson; par exemple, de celles du bois même sur lequel la corde est tendue et avec lesquelles cette corde est censée communiquer; en sorte

que celle-ci commencerait à agir sur les fibres dont il s'agit, et que ces fibres, à leur tour, produiraient dans l'air les vibrations analogues à la résonnance des harmoniques. Mais nous avons fait l'expérience en plein air, et de manière que les points d'attache n'avaient aucune élasticité sensible, et nous avons entendu encore la résonnance des premiers harmoniques, d'où il faut conclure que la corde a, par elle-même, la propriété d'exciter dans l'air les vibrations qui les produisent, et que ce sont ces vibrations qui font ensuite frémir et résonner les corps environnans.

522. En partant des faits que nous venons d'exposer, on conçoit pourquoi, lorsqu'on chante dans un lieu où il se trouve des corps susceptibles de rendre des sons appréciables, comme des vases de verre ou de métal, chacun de ces corps résonne, lorsque la voix fait entendre son unisson, ou même lorsqu'elle rend un son qui est à celui que le même corps rendrait par la percussion, comme le son générateur est à l'octave de sa quinte, ou à la double octave de sa tierce. Ces différens effets sont très sensibles, lorsqu'on rend un son avec la voix, en présentant la bouche à l'ouverture d'un verre ordinaire. La résonnance la plus marquée est celle de l'unisson, et l'on cite des chanteurs, doués d'une voix juste et en même temps très forte, qui, en prenant ainsi l'unisson d'un verre, parvenaient à le casser. Le changement de figure qu'éprouvent, dans ce cas, les différens anneaux qui composent le verre, est si considérable, que les parties n'ayant pas la flexibilité nécessaire pour s'y prêter assez promptement, se séparent à différens endroits, comme dans le cas où le verre aurait subi une forte percussion.

### Expérience de Tartini.

523. Tout ce que nous venons de dire nous conduit à parler d'une autre expérience, connue sous le nom d'*expérience de Tartini*; elle consiste à faire entendre à la fois deux sons forts, justes et soutenus; il résulte de leur concours un troisième son plus faible, et qui est tel, selon ce célèbre musicien, que si l'on représente le rapport entre les deux premiers sons par les nombres les

plus simples, le son produit sera représenté par 2. Si les deux sons dont il s'agit ont, par exemple, pour expressions les nombres 8 et 9, auquel cas leur accord donnera une dissonance semblable à celle qui résulte des sons *ut*, *re*, le son produit étant 2, répondra à la double octave en dessous de l'*ut* de la dissonance.

En général, il ne faudra que transporter à l'octave l'un des sons de l'accord, ou tous les deux, pour qu'ils soient compris dans la série des harmoniques, dont le troisième son serait le son fondamental; ce qui peut servir à lier cette expérience avec celle de la triple résonance d'une corde vibrante, dont elle offre en quelque sorte l'inverse.

### Des Sons harmoniques.

524. Nous citerons une troisième expérience très curieuse, qui se trouve indiquée dans Wallis, mais qui était oubliée, lorsqu'elle s'offrit aux observations de Sauveur, qui a passé depuis pour en être l'inventeur : voici le détail de cette expérience.

Si l'on tend une corde sur une planche, et qu'on la partage en deux portions inégales et commensurables entre elles, au moyen d'un obstacle léger qui ne la presse que médiocrement, ces deux parties étant pincées successivement, rendront le même son, qui sera différent de celui de la corde entière : et tel sera ce son, que si l'on représente par les nombres les plus simples le rapport entre les longueurs des deux parties de la corde, le son qu'elles feront entendre sera celui d'une corde qui aurait l'unité pour expression. Ainsi, en supposant la corde divisée en deux parties, qui fussent entre elles comme 3 à 2, auquel cas les sons correspondans seraient dans le rapport d'*ut* à *sol*, en montant, si les longueurs des deux parties déterminoient leur résonnance, le son rendu par chaque partie sera celui de la corde 1, c'est-à-dire, le *sol* à l'octave aigu du son que rendrait la plus petite partie dans le cas ordinaire. On a donné le nom de *sons harmoniques* à ceux qui résultent de cette division d'une corde vibrante.

Si l'on observe attentivement la même corde, tandis qu'elle

est en vibration, on remarque que chaque partie se sous-divise en autant de portions égales, que le nombre qui lui correspond renferme d'unités. Ainsi, entre deux sous-divisions voisines, il y a un point de repos ou un nœud, et au milieu de la même sous-division, l'ondulation forme un ventre, comme dans une corde qui vibre tout entière. Dans l'exemple précédent, la plus grande partie se sous-divise en trois, et la plus petite en deux, de sorte que le son *sol* est rendu à la fois par toutes les sous-divisions qui se trouvent ainsi à l'unisson l'une de l'autre. On voit aisément que la plus petite partie ne doit pas se sous-diviser, lorsque le son qui lui est analogue a lui-même l'unité pour expression; alors c'est ce même son que fait entendre la plus petite partie, ainsi que chacune des sous-divisions de la plus grande.

Tel est donc le mécanisme d'où dépend la série d'unissons donnée par l'expérience dont il s'agit, que l'obstacle léger qui partage la corde, empêche seulement les vibrations totales, mais laisse subsister une communication, une dépendance mutuelle entre les deux parties, dont les vibrations tendent par là même à s'accorder parfaitement entre elles, c'est-à-dire, à devenir isochrones. En conséquence, elles sont forcées de se sous-diviser, mais elles le font le moins qu'il est possible; de manière que le nombre des sous-divisions est toujours le plus petit, parmi tous ceux qui donneraient pareillement l'isochronisme.

Ainsi, dans l'exemple précédent, si la corde 2 faisait des vibrations totales, les deux tiers de la corde 3 pourraient bien se mettre à l'unisson avec elle; mais il resterait un tiers qui ferait ses vibrations séparément: or, c'est ce tiers qui étant seul propre à déterminer l'isochronisme, donne la loi à tout le reste.

525. Sauveur rendait sensible à l'œil la distinction des nœuds et des ventres, en plaçant à l'endroit de chaque nœud un chevron de papier blanc, et un autre de papier coloré à l'endroit de chaque ventre. Au moment où la corde entrait en vibration, on voyait tomber tous les chevrons colorés, tandis que les blancs restaient à leur place. Cette expérience réussit bien, à l'aide d'une corde de violon, que l'on partage par un chevalet de carton, après l'avoir tendue sur une planche, et que l'on fait vibrer, en passant légè-

rement l'archet près du chevalet de bois sur lequel repose l'une ou l'autre des extrémités de cette même corde.

### Réflexions sur l'Échelle diatonique des Modernes.

526. La première des expériences que nous venons de citer, ou celle qui consiste dans la triple résonance d'une corde vibrante, nous fournit quelques réflexions sur la formation de notre échelle diatonique, composée des sons *ut*, *re*, *mi*, *fa*, etc., et qui est connue de tout le monde.

Si l'on désigne toujours par l'unité le premier son *ut*, la série des 8 sons sera exprimée par celle des nombres

$$1, \frac{9}{8}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{15}{8}, \frac{7}{4}, 2.$$

*ut re mi fa sol la si ut;*

c'est-à-dire que si l'on faisait vibrer des cordes dont les longueurs fussent propres à donner les nombres de vibrations qui répondent aux termes de la série précédente, on aurait une suite de sons qui représenterait très sensiblement notre gamme, telle que chacun l'a, pour ainsi dire, dans l'oreille et l'exécute par le chant. Cette gamme est très ancienne, et en remontant jusqu'aux siècles de la Grèce, où le goût pour les arts était si délicat, on trouve que les deux tétracordes, qui formaient l'échelle musicale de ce temps, avaient leurs sons précisément dans les mêmes rapports que ceux de la nôtre.

Or il est remarquable que la gradation des sons dans ces deux échelles, se trouve soumise au principe de la plus grande simplicité dans les rapports qui les déterminent; et ce principe paraît avoir été le guide secret dont l'oreille a suivi l'indication. Pour le concevoir, observons qu'en prenant les sons qui donnent deux, trois, quatre et cinq vibrations, contre une seule du son fondamental, nous aurons successivement l'octave de ce son, puis l'octave de sa quinte, ensuite sa double octave, et enfin la double octave de sa tierce; c'est-à-dire, que nous aurons l'harmonie des sons, qui seuls résonnent sensiblement lorsqu'on fait vibrer une corde isolée. Or l'octave, la quinte et la tierce sont les cou-

sonnances les plus parfaites, et toute notre échelle diatonique porte sur ces consonnances. Car en premier lieu, nous avons dans cette gamme l'accord *ut, mi, sol* qui est donné immédiatement par la triple résonnance du corps sonore, excepté que le *sol* et le *mi* s'y trouvent transportés l'un à l'octave et l'autre à la double octave en dessous de l'harmonique correspondant, ce qui est toujours permis, à cause de la grande ressemblance entre un son et son octave. Transportons maintenant le *fa* et le *la* de la gamme à l'octave en dessous; si nous joignons l'*ut* fondamental à ces deux sons, nous aurons un nouvel accord *fa, la, ut*, entièrement semblable à l'accord *ut, mi, sol*. Enfin si nous transportons le *re* à l'octave en dessus, nous aurons, en lui réunissant les sons *sol* et *si*, un troisième accord *sol, si, re*, qui de même représente exactement l'accord *ut, mi, sol*. Voilà donc tous les sons de la gamme distribués entre trois accords composés d'une tierce et d'une quinte, et tellement liés entre eux, que le son fondamental de chacun est la quinte au grave ou à l'aigu de celui d'un autre; en sorte qu'en partant du *fa* pris en dessous de l'*ut* fondamental de la gamme, on a cette suite, *fa, la, ut, mi, sol, si, re*, qui forme un enchaînement de tierces et de quintes. Ainsi notre gamme est limitée aux combinaisons que donnent les sons représentés par les cinq premiers nombres naturels; tous les autres se trouvent exclus, sur quoi Leibnitz disait assez plaisamment, que *l'oreille ne comptait que jusqu'à cinq*.

527. D'une autre part, quelques savans ont pensé qu'il y avait une autre gamme préférable à la précédente, et dont l'adoption élèverait la musique à son vrai point de perfection. Voici l'observation sur laquelle ils se fondent.

Si dans la série des harmoniques donnés par les différentes cordes qui résonnent à côté d'une première corde que l'on a mise en vibration, on prend ceux qui répondent aux fractions  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{11}$ , etc., jusqu'à  $\frac{1}{16}$  inclusivement; on aura une suite de sons semblable à la gamme ordinaire, excepté que le *fa* et le *la* seront un peu plus haut que dans cette gamme; de plus, l'harmonique  $\frac{1}{15}$  donnera un son surnuméraire entre le *sol* et le *la*.

Les savans dont il s'agit, ont pensé que la véritable gamme

devait être cette dernière, parce qu'elle était donnée immédiatement par la nature, et que si l'oreille paraissait blessée par l'intonation des sons *fa* et *la*, lorsque cette gamme était rendue par un instrument propre à cet effet, tel que le cor de chasse, c'était la suite d'un préjugé de cet organe gâté par l'habitude, et dont il parviendrait à se désabuser, en se familiarisant avec l'autre, et en laissant agir la nature, qui bientôt reprendrait tous ses droits.

Cependant la raison qui se tire de la simplicité des rapports paraîtra l'emporter, si l'on considère que cette simplicité est liée avec la facilité de percevoir les intervalles entre les sons, laquelle influe à son tour sur le plaisir de l'oreille. C'est pour cela que l'octave est l'accord qui plaît le plus généralement, et qu'ensuite l'accord parfait, composé de la quinte et de la tierce, trouve un accès si facile dans toutes les oreilles qui ne sont pas sauvages à l'égard de l'harmonie. Or c'est dans cet accord et dans celui d'octave, ainsi que nous l'avons vu, qu'est puisée notre gamme. On s'est arrêté à ces limites, par une espèce d'instinct, et antérieurement à toute étude des propriétés harmoniques du corps sonore. Ce n'est pas que l'oreille compare des nombres, cette comparaison est uniquement du ressort de l'esprit; mais la simplicité de ces nombres tient à un effet physique; savoir, la fréquence des rentrées que font les vibrations des sons comparés, lequel effet semble trouver dans l'organe même une disposition en vertu de laquelle il s'accommode mieux de ce qui est plus simple, parce qu'il a moins à travailler pour le saisir.

L'art, en prenant des intermédiaires entre les sons suggérés par la nature, a répandu une grande variété dans les effets de l'harmonie et de la mélodie; il est parvenu, par l'ingénieux enchaînement des dissonances et des consonances, à faire tourner au plaisir de l'oreille, ce qui ne semblait propre qu'à la chagriner.

Rameau a essayé de déduire les lois de l'harmonie de la triple résonance des corps sonores. Tartini a cru en avoir trouvé l'origine dans l'expérience que nous avons citée sous son nom. Mais ces systèmes ne donnent que des convenances plus ou moins plausibles, et il y a des phénomènes d'harmonie avoués par l'oreille, qu'on ne peut y ramener.

## Du Tempérament.

Tout ce qui a été dit précédemment, nous conduit à donner une idée de ce qu'on appelle *tempérament*.

528. Il résulte du principe d'après lequel notre gamme a été formée, que le son aigu de chacun des trois accords parfaits dont elle est composée, fait une quinte juste avec le son fondamental de cet accord. Mais si l'on compare deux sons pris dans différens accords, savoir, le *re* et le *la*, qui forment aussi une quinte, on trouvera ici une petite altération dans la justesse de cet intervalle. Car le rapport des deux sons dont il s'agit, est celui de  $\frac{8}{6}$  à  $\frac{15}{9}$  ou de 27 à 40, un peu plus fort que celui de 2 à 3, qui donne une quinte juste. Pour que le *la* fût avec le *re* dans le rapport de cette quinte, il faudrait que son expression devint  $\frac{27}{16}$ . Donnons-lui, pour un instant, cette expression, et prenons au-dessus du même *la* un nouveau son *mi*, qui fasse aussi une quinte juste avec lui, on aura l'expression de ce *mi*, en multipliant  $\frac{27}{16}$  par  $\frac{3}{2}$ , qui est le rapport de la quinte; ce qui donne  $\frac{81}{32}$ . Maintenant, s'il n'y avait aucune altération dans les intervalles, ce *mi* serait à l'octave juste de celui de la gamme, en allant du grave à l'aigu. Mais il n'en est pas ainsi; car si nous élevons ce dernier *mi* d'une octave, son expression, qui était  $\frac{5}{4}$  deviendra  $\frac{10}{4}$ , ou  $\frac{80}{32}$ , moindre que  $\frac{81}{32}$ , dans le rapport de 80 à 81. Il suit de là que le *mi* exprimé par  $\frac{81}{32}$ , ne sera pas non plus à la tierce de l'*ut*, dont l'expression est 2; le rapport entre cet *ut* et le *mi* dont il s'agit, ramené à sa plus grande simplicité, est celui de 64 à 81, un peu plus fort que celui de 1 à  $\frac{5}{4}$ , ou de 64 à 80, qui a lieu pour l'*ut* et le *mi* de la gamme.

Sans entrer ici dans un plus grand détail, il nous suffira de dire, en général, que de ces trois intervalles, l'octave, la quinte et la tierce, on ne peut conserver l'un dans toute sa pureté, sans altérer les deux autres; et il en résulte une difficulté qui a été sentie depuis long-temps, relativement à la manière d'accorder les instrumens à cordes, où chaque touche répond à un son dont le degré est déterminé par l'opération même. On a imaginé, en

conséquence, diverses méthodes, pour trouver ici un *tempérament*, c'est-à-dire, pour combiner les altérations de manière que l'harmonie n'en souffrit pas sensiblement; et toutes ces méthodes conviennent en ce point, qu'il est indispensable de conserver la justesse des octaves, en sacrifiant plutôt quelque chose de celle des quintes et des tierces, parce qu'il en est à peu près de l'octave comme de l'unisson, qui, par sa grande simplicité, est si agréable à l'oreille qu'elle ne peut y tolérer le moindre défaut de précision; elle ne relâche quelque chose de sa sévérité, qu'à l'égard des intervalles moins simples; et dans ce cas elle supplée à ce qui leur manque, et suppose nulles des différences qu'elle n'apprécie pas.

529. Rameau, après avoir varié sur le choix du meilleur tempérament, a fini par adopter celui dans lequel toutes les quintes se trouveraient également altérées, attendu qu'il n'y avait pas de raison pour altérer l'une plutôt que l'autre. On a trouvé que dans ce système les tierces devenaient dures et choquantes; et l'on a généralement admis la méthode à laquelle Rameau lui-même avait d'abord donné la préférence, et qu'il a ensuite abandonnée. Dans les instrumens accordés par cette méthode, les quintes données par les tons naturels de la gamme conservent presque entièrement leur harmonie; les différences les plus sensibles portent sur les demi-tons intermédiaires; les musiciens ont pris dans la série des quintes, certaines notes qui leur servent à vérifier de temps en temps leurs opérations, d'après la justesse de quelqu'autre accord, tel que celui de tierce, que chacune de ces notes doit faire avec une des notes déjà accordées. Il résulte de là une grande diversité dans les altérations qu'ont subies les intervalles de quinte et de tierce qui partagent la série des différens sons, et l'on a même regardé cette diversité comme un avantage; car suivant que l'on choisit tel son de préférence pour note tonique, c'est-à-dire, pour celle à laquelle se rapportent toutes les autres, en sorte que la modulation repose, pour ainsi dire, sur cette note comme sur une base, les quintes et les tierces que parcourt le chant ont quelque chose de sombre, qui est propre à inspirer la tristesse, ou je ne sais quoi d'exalté qui excite la joie. Ainsi la modulation emprunte de la seule manière dont les

intervalles qu'elle emploie ont été altérés, une teinte du caractère qu'elle porte par elle-même; et ce qu'on aurait été tenté de regarder comme un défaut, devient, pour le musicien, un moyen d'ajouter à l'expression du sentiment qu'il cherche à peindre.

### *Théorie de la Propagation du Son.*

Il nous reste à établir la théorie des différens phénomènes que présente l'expérience, relativement à la propagation du son, et à expliquer comment le son conserve une vitesse uniforme, depuis le corps sonore jusqu'à l'organe, quoiqu'il perde continuellement de sa force; comment les sons aigus et les sons graves, les sons forts et les sons faibles ont la même vitesse dans leur course; comment enfin différens sons simultanés se croisent dans l'air sans se confondre, et apportent à l'oreille leur harmonie dans toute sa netteté.

Cette théorie se déduit de la manière dont le son se forme dans les instrumens à vent, et nous l'avons tirée d'un excellent Mémoire, où Daniel Bernoulli l'a développée et soumise au calcul (1). Nous allons essayer de rendre le plus clairement possible les idées de ce célèbre géomètre.

530. Concevons d'abord un tuyau cylindrique bouché par un bout, et que l'on fasse résonner en soufflant par l'orifice ouvert. L'air renfermé dans ce tuyau se mettra en vibration, de manière que chacune des couches infiniment minces qui composent la colonne de ce fluide s'approchera et s'éloignera tour à tour du fond, en allant et en revenant de part et d'autre de la position qu'elle avait dans l'état de repos, par de petits mouvemens d'oscillation semblables à ceux d'un pendule simple. Les oscillations iront en croissant d'une couche à l'autre, depuis le fond où elles seront nulles, jusqu'à l'ouverture où se trouveront les plus grandes. Celles de chaque couche seront isochrones, et celles des différentes couches seront synchrones, c'est-à-dire, qu'elles commenceront et finiront toutes en même temps, sans quoi elles ne pourraient former un son.

---

(1) Mémoires de l'Acad. des Sciences, 1762, p. 431 et suiv.

Tandis que les différentes couches auront un mouvement progressif vers le fond, la couche qui était à l'orifice entrera dans le tuyau, où elle condensera la couche voisine, et ainsi de suite, de manière que la condensation ira toujours en croissant jusqu'au fond, où elle sera la plus grande, parce qu'elle résultera du concours de toutes les actions des couches postérieures. Dans le retour vers l'orifice, il sortira, au contraire, du tuyau une petite portion de l'air qui y était renfermé pendant l'état de repos, et les différentes couches subiront de petites dilatations qui iront en diminuant depuis le fond; d'où l'on voit que l'air situé à l'orifice ne sera ni condensé ni dilaté, mais conservera la même densité que l'air environnant.

531. Voilà ce qui a lieu pour les tuyaux bouchés par un bout. Il s'agit maintenant d'appliquer cette hypothèse aux vibrations de l'air dans un tuyau ouvert par les deux bouts. Or, la seule idée qui s'accorde avec les lois de la Mécanique et avec l'observation, consiste à supposer, par la pensée, que le tuyau soit divisé en deux moitiés à l'aide d'une cloison, comme s'il était composé de deux tuyaux bouchés d'un côté et réunis par leur fond, et que tout se passât dans chacun d'eux conformément à l'hypothèse précédente. Il en résulte que la couche d'air située à l'endroit de la cloison, ou, pour mieux dire, qui en fait l'office, sera immobile, et que toutes les autres couches feront des oscillations qui iront de part et d'autre en croissant, suivant la loi que nous avons exposée.

532. Reste à considérer le cas d'un tuyau fermé par les deux bouts, qui n'a point lieu dans la pratique, mais qui est nécessaire pour la théorie. Si l'on suppose que l'air intérieur soit mis en vibration par une cause quelconque, on pourra concevoir chaque moitié comme un tuyau fermé seulement par un bout, et dans lequel les oscillations seront les mêmes que pour cette dernière espèce de tuyau, mais de manière qu'elles se feront toutes du même côté, depuis un fond jusqu'à l'autre; et ainsi, tandis que les couches renfermées dans une moitié s'y condenseront en s'approchant du fond qui la termine, les couches de l'autre moitié se dilateront, en allant dans le même sens que les premières, et la densité de la couche du milieu sera constante.

On voit que les deux derniers cas ne sont que des conséquences de l'hypothèse faite par rapport au premier ; et si cette hypothèse s'adapte comme d'elle-même aux différens faits donnés par l'expérience, on ne pourra se refuser à la regarder comme infiniment probable.

533. Or on sait d'abord qu'un tuyau ouvert des deux côtés, rend le même degré de son qu'un tuyau bouché d'un seul côté, et qui n'a que la moitié de la longueur du premier. C'est une suite nécessaire des principes de la théorie, puisque dans le tuyau ouvert par les deux bouts, il y a un repos au milieu ; en sorte que les deux moitiés sont à l'unisson, et que les oscillations de l'air dans chacune d'elles sont parfaitement semblables, soit entre elles, soit à celles qui ont lieu dans le tuyau fermé par un bout.

534. Dans certains instrumens à vent, tels que le cor de chasse, la trompette, où le jeu des doigts n'entre pour rien, la différence des tons dépend de la manière d'augmenter ou de rétrécir l'ouverture des lèvres, suivant qu'on veut obtenir un son plus grave ou plus aigu. Le musicien saisit le degré de cette ouverture, par le sentiment qu'il a du ton qu'il veut faire naître ; mais tous les tons ne se prêtent pas à sa volonté. L'instrument ne lui obéit qu'autant qu'il ne veut que ce qui est dans sa nature. En conséquence, si l'on représente par 2 le son principal, le musicien ne pourra faire produire à l'instrument que les sons qui répondent aux nombres 4, 6, 8, 10, etc.

535. Or, pour expliquer ce progrès déterminé de sons successivement plus aigus, il ne faut que considérer l'instrument comme un tuyau ouvert par les deux bouts. Dans le cas du son fondamental représenté par 2, tel est le degré de pression que le musicien donne à ses lèvres, que l'ordre de vibrations qui en résulte se développe dans une étendue égale à la moitié du tuyau : là il se forme une cloison d'air stationnaire, ou un nœud, passé lequel les mêmes vibrations recommencent en sens contraire.

Le musicien augmente-t-il la pression de ses lèvres jusqu'au degré qui répond à l'octave en dessus du son fondamental ? le nouvel ordre de vibrations relatif à ce son n'occupera plus que la moitié de l'étendue du précédent : il y aura un premier repos

au quart du tuyau, puis un second aux trois quarts; en sorte que la première et la dernière partie représenteront un tuyau bouché par un bout, et la partie intermédiaire un tuyau fermé par les deux bouts, mais d'une longueur double; et ainsi l'ensemble équivaldra à quatre tuyaux bouchés par un bout, qui seront tous à l'unisson, et dont chacun rendra le son.

536. Dans les sons plus élevés, le tuyau se partagera successivement en 6, 8, 10 parties égales que l'on pourra comparer à autant de tuyaux bouchés par un bout. Les tuyaux extrêmes seront seuls, et les intermédiaires s'aboucheront deux à deux, pour composer des tuyaux fermés par les deux bouts, et doubles des tuyaux extrêmes. Il y aura donc un nœud à l'endroit de chaque cloison, et un ventre au milieu de la distance entre deux cloisons voisines. Les vibrations qui auront leur origine à un même nœud, se feront de part et d'autre par des mouvemens contraires, mais elles auront lieu dans le même sens des deux côtés d'un même ventre.

Le musicien tentera inutilement de tirer de l'instrument quelque autre son, dont le degré ne se trouverait pas sur l'échelle de cette loi; ou s'il y parvient, ce ne sera que par un artifice particulier, qui produira le même effet que si la forme de l'instrument était changée, comme lorsque celui qui joue du cor de chasse met la main dans le pavillon.

537. Une nouvelle expérience, qui confirme la théorie, consiste à percer dans un tuyau sonore un trou latéral situé à l'endroit d'un nœud : quoiqu'on laisse ce trou ouvert, le son restera le même; mais si le trou est placé ailleurs, le degré du son montera, parce que l'air n'étant pas en repos dans cet endroit, une partie se répandra au dehors par l'effet des vibrations qui, éprouvant moins d'obstacle que quand le tuyau n'était point percé, accéléreront leur mouvement. Ceci peut servir à faire concevoir en général le principe auquel se rapporte la construction des flûtes et autres instrumens semblables, dont on tire différens tons suivant que l'on ferme ou que l'on ouvre de préférence certains trous.

538. Les oscillations que le son excite dans les tuyaux coniques différent, à quelques égards, de celles qui ont lieu dans les tuyaux

cylindriques. Ce qu'elles ont surtout de particulier, consiste en ce que les ébranlemens de l'air dont elles dépendent vont toujours en diminuant depuis le sommet; en sorte que les excursions des différentes couches sont elles-mêmes toujours plus petites, et suivent la raison inverse de la distance au sommet.

Mais cette différence n'altère ni la distance entre les ventres, qui est partout la même, ni la durée des vibrations, qui conservent aussi partout leur isochronisme.

539. Appliquons maintenant cette théorie à la propagation du son. Dans chaque rayon sonore, qui est, comme nous l'avons dit, un cône d'air infiniment mince, tout se passe comme dans un tuyau conique où l'air fait ses vibrations, c'est-à-dire, qu'il y a successivement des nœuds, et des points auxquels répondent les plus grandes excursions.

Comme il y a un ventre à l'origine du cône, et que tous les ventres sont également éloignés, nous pouvons partager, par la pensée, le cône entier en une suite de cônes tronqués, égaux en longueur, dont chacun aura deux ventres à l'endroit de ses bases, et un nœud situé vers le milieu. Bernoulli donne à ces cônes le nom de *concamérations*.

540. Au moment où le corps sonore sera mis en vibration, tout l'air ne sera point ébranlé à la fois dans chacun des cônes qui ont leurs sommets aux différens points de ce corps, il ne le sera d'abord que dans la première concamération : quand celui-ci aura fait une oscillation, il commencera à ébranler l'air de la seconde concamération; et au bout d'une nouvelle vibration, l'air sera ébranlé dans la troisième, et ainsi de suite. On voit par là, pourquoi la propagation du son n'est pas instantanée, mais exige un certain temps qui devient toujours plus considérable, à mesure que la distance elle-même augmente.

Les oscillations qui ont lieu dans les différentes concamérations successives, sont parfaitement isochrones. De plus, toutes les concamérations sont égales en longueur. Donc le son doit parcourir, avec une vitesse uniforme, la suite de toutes ces concamérations, ce qui était encore un des effets à expliquer.

Mais à mesure que les concamérations s'éloignent du sommet,

les ébranlemens de l'air qui produisent les petites oscillations partielles dont chaque oscillation totale est composée, vont en diminuant, tandis que l'isochronisme subsiste toujours; d'où il suit qu'à une plus grande distance l'organe sera plus faiblement ébranlé, et le son moins entendu, en sorte que dans un certain éloignement, il finira par s'éteindre.

541. Que le son soit fort ou faible, la durée des vibrations et la longueur des concamérations resteront les mêmes, parce que c'est le degré seul du son qui détermine l'une et l'autre, ainsi qu'il est facile de le conclure de ce que le ton rendu par un tuyau est le même, quelle que soit la force du souffle qui met l'air en vibration, pourvu que l'ouverture des lèvres soit aussi la même.

542. Si l'on suppose deux sons à l'octave l'un de l'autre, qui se fassent entendre successivement ou à la fois, les concamérations relatives au son aigu seront une fois plus courtes que celles qui répondent au son grave; il y en aura donc une fois plus dans un espace donné. Mais les oscillations de l'air s'y acheveront dans un temps une fois plus court, d'où il suit qu'elles emploieront le même espace de temps pour se propager à la même distance; et ainsi le degré du son n'influe pas sur sa vitesse, ce qui s'accorde de même avec l'observation.

### De la Manière dont les Sons simultanés se propagent sans se confondre.

543. Ce que nous venons de dire regarde les sons solitaires. Mais lorsque plusieurs corps vibrent en même temps; lorsque dans un concert, par exemple, plusieurs instrumens et plusieurs voix rendent à la fois des sons de divers degrés, comment arrive-t-il que les différentes vibrations qui en résultent, se rencontrent en passant à travers l'air, sans se détruire ou se dérouter par leur choc naturel, et que chacune d'elles continue ensuite son trajet vers l'oreille, comme si elle eût trouvé le passage libre?

Les physiiciens modernes ont essayé de résoudre cette difficulté,

en adoptant l'idée de Mairan, qui supposait l'air formé de particules d'une infinité de grosseurs différentes, dont chacune n'était capable que de recevoir et de transmettre les vibrations relatives à un ton particulier. Ainsi, lorsque plusieurs sons concourent dans une même harmonie, ou de toute autre manière, chacun d'eux ne s'adressait qu'aux particules qui étaient à son unisson, et exerçait sur elles une action indépendante de celle que subissaient les molécules d'un diamètre différent. Mais sans recourir à cette supposition gratuite, qui, pour débrouiller un effet compliqué, emploie une complication d'un autre genre, et n'écarte la difficulté qu'en la transportant ailleurs; nous trouvons, dans la théorie même que nous avons exposée, une manière satisfaisante d'expliquer la distinction des sons simultanés.

544. Cette explication tient à l'observation générale, que tous les petits mouvemens qui ont des points de concours se superposent, en quelque sorte, les uns sur les autres sans se confondre. Pour éclaircir cette idée, considérons deux rayons sonores, qui se rencontrent sous deux directions différentes. Le mouvement se composera dans le petit espace où ils se croiseront, de manière que les petites oscillations qui ont lieu dans un rayon, donneront une légère impulsion à celles de l'autre rayon, produiront, dans les molécules situées au point de concours, d'autres oscillations en diagonale. Imaginons un observateur dont l'œil serait capable de saisir le progrès des oscillations, et supposons que cet œil fasse lui-même de petits mouvemens oscillatoires semblables à ceux que les molécules de l'un des deux rayons auraient faits sur le côté analogue du parallélogramme, dont la diagonale est décrite en vertu du mouvement réel. Cet œil verra osciller les molécules qui suivent ce dernier mouvement, comme si elles étaient mues dans la direction de l'autre côté du parallélogramme, c'est-à-dire, que l'œil ayant lui-même un des mouvemens qui se composent dans la diagonale, et ce mouvement étant censé détruit à son égard, il ne recevra que l'impression de l'autre mouvement. Or il est aisé d'en conclure que les molécules d'air situées au-delà du concours des deux rayons, auxquelles le mouvement qui existe seul pour l'observateur se serait communiqué, s'il n'y avait là que

le rayon sonore dirigé suivant ce mouvement, ne laisseront pas de le recevoir encore, puisqu'elles sont sur la direction où les vibrations qui se font dans la diagonale doivent, en se décomposant, produire ce même mouvement. On peut appliquer ce raisonnement à l'autre rayon sonore, d'où l'on voit que les vibrations, après s'être confondues dans un espace presque infiniment petit, doivent se démêler ensuite, et reprendre leur premier alignement, comme, si elles n'avaient eu rien de commun (1).

545. C'est par un mécanisme du même genre que les petites oscillations successives qui se produisent dans l'eau, où l'on a jeté plusieurs pierres, passent l'une sur l'autre sans se confondre, et produisent des circonférences qui s'entrecoupent. La même chose n'a pas lieu dans les grands mouvemens, où les molécules situées au point de concours, recevant de fortes impulsions en différens sens, sont emportées à leur tour par un mouvement qui les écarte totalement de leurs premières directions.

546. Tel est le terme où nous conduit la théorie : mais ce qui reste inexplicable, c'est cette espèce de souplesse de l'air, pour

(1) Pour répandre un nouveau jour sur cette explication, concevons que *ac*, *bc* (fig. 46), représentent les directions de deux rayons sonores qui se croisent au point *c*, et que *mc*, *hc* mesurent les étendues des petites oscillations qui ont lieu près du point de concours. Les mouvemens dus à ces oscillations se composent dans le même point, de manière que le mouvement unique qui en résulte se transporte sur les molécules situées immédiatement au-dessous de *c*, et y fait naître d'autres oscillations dans le sens de la diagonale *cr* d'un petit parallélogramme *cnrs*, déterminé par les lignes *cn*, *cs*, situées sur les prolongemens des lignes *hc*, *mc*, et égales à ces dernières. Maintenant les oscillations en diagonale se résolvent au point *r* en deux mouvemens, dont tel est l'effet, que les molécules situées sur les lignes *rt*, *ru*, parallèles l'une à *bc*, et l'autre à *ac*, sont sollicitées elles-mêmes à faire de petites oscillations égales aux premières, dans le sens des mêmes lignes *rt*, *ru*. Or, l'espace dans lequel tous ces mouvemens s'exécutent étant presque infiniment petit, les lignes *rt* et *ru* sont sensiblement sur les mêmes directions que les lignes *bc* et *ac*; en sorte que les oscillations qui ont lieu dans le sens de ces dernières lignes sont censées se propager, dans leurs prolongemens, au-delà du point de concours *c*. Ainsi les résultantes de tous les petits mouvemens décomposés peuvent être considérées comme des lignes infiniment petites ou de simples points, qui ne font que transmettre ces mouvemens, sans en altérer les directions.

prendre, en quelque sorte, l'empreinte des différens caractères dont un même ton est susceptible, à raison de la diversité des corps qui le rendent, et pour se modifier de tant de manières en portant à l'oreille les sons tendres et veloutés de tel instrument, les sons plus mâles et plus vigoureux de tel autre, et les accens infiniment variés de la voix humaine. On ne sait lequel on doit plus admirer, ou la nature du fluide qui remplit ces différens messages avec une fidélité si exacte, jusque dans les moindres détails, ou celle de l'organe qui discerne tout avec une si grande finesse de tact, et renferme dans ses fibres les nuances de tant de nuances particulières.

### Des Surfaces vibrantes.

547. Les vibrations excitées dans une lame d'une matière élastique, par l'intermédiaire d'un archet que l'on fait passer avec frottement sur ses bords, de manière à en tirer des sons agréables, sont susceptibles de produire des effets très curieux, que l'on peut multiplier, pour ainsi dire, à l'infini, en diversifiant les circonstances dont ils dépendent, et que nous ferons bientôt connaître. La corde qui, dans l'expérience de Sauveur, rend les sons harmoniques, se sous-divise en ondulations distinguées entre elles par des nœuds ou des points de repos. Dans une surface vibrante, les limites entre les ondulations sont tracées par des lignes de repos, que l'on appelle *lignes nodales*. Une poussière, répandue uniformément sur la surface dont il s'agit, fait, en quelque sorte, la même fonction que les chevrons placés sur la corde dans l'expérience de Sauveur. Pendant le mouvement de l'archet, les grains de cette poussière qui répondent à une ligne nodale restent en équilibre, et ceux qui recouvrent les parties intermédiaires, forcés par le mouvement vibratoire de quitter leurs positions, vont en jaillissant se fixer sur les mêmes lignes, ce qui produit des figures plus ou moins composées, et souvent d'une symétrie parfaite. La Géométrie semble prêter ainsi son langage aux sons pour les faire parler aux yeux en même temps qu'à l'oreille.

C'est surtout à la sagacité et à la constance avec laquelle M. Chladni a cultivé la Physique des corps sonores, que l'on doit la découverte de tous ces faits également neufs et intéressans, dont la description remplit une grande partie de l'ouvrage publié par ce savant, sous le titre d'*Acoustique*.

Dans la longue suite de ceux qu'il a décrits ou qui ont été obtenus par d'autres, nous en avons choisi un certain nombre, pour les citer ici, comme étant susceptibles d'offrir un intérêt particulier (1).

Nous avons répété, avec beaucoup de soin, les expériences propres à les faire naître, et nous n'avons rien omis pour que les figures que nous donnons ici offrissent des copies fidèles des dessins formés par l'assortiment des lignes nodales.

### *Circonstances générales d'où dépendent les phénomènes.*

Dans les expériences dont il s'agit, on fixe les lames par un point de leur surface, que l'on presse entre le pouce et un autre doigt, ou par deux points pris sur leurs bords de deux côtés opposés, et

(1) Nous nous bornerons, par la même raison, à donner une idée succincte d'un autre genre de recherches faites par le même savant, pour déterminer les différentes espèces de vibrations produites par le frottement dans une verge métallique, ou de quelque autre matière qui ait un certain degré de rigidité. Les unes, que l'auteur nomme *transversales*, ont lieu lorsqu'on frotte la verge dans une direction perpendiculaire à la longueur. Elles se rapportent à celles qui sont produites dans une corde sonore que l'on pince. D'autres vibrations appelées *longitudinales*, déterminent des contractions et des dilations successives dans le sens de la longueur de la verge, analogues à celles de l'air renfermé dans un tuyau. Les dernières, qui portent le nom de *vibrations tournantes* dépendent, suivant M. Chladni, d'une sorte de mouvement oscillatoire des parties de la verge, autour de son axe longitudinal. Les verges sur lesquelles on opère peuvent être fixées ou simplement appuyées par leurs deux extrémités, ou fixées par l'une et appuyées par l'autre, ou libres par l'une et l'autre, d'où résulte une grande diversité dans la manière dont elles se subdivisent, en formant alternativement des ventres et des nœuds, et dans les sons rendus par leurs sous-divisions. On trouvera une exposition détaillée de tous ces faits, dans l'ouvrage de M. Chladni, pag. 90 et suiv.

à chacun desquels on applique un doigt. Dans certains cas, les points fixes dont nous venons de parler, sont situés aux angles de lame vibrante. Ces différens points que nous appellerons *points d'appui*, seront désignés par la lettre *a*, et nous emploierons la lettre *f* pour indiquer le point frotté par l'archet, et dans lequel réside l'origine des vibrations.

Le son fondamental, c'est-à-dire le plus grave que puisse rendre une même lame, aura pour expression *ut*. Les sons à l'octave, à la double octave, à la triple octave, etc., de ce dernier seront indiqués par  $\overset{2}{ut}$ ,  $\overset{3}{ut}$ ,  $\overset{4}{ut}$ , etc., et chacune des autres notes le sera par le nom qu'elle porte dans la gamme, surmonté des chiffres 1, 2 ou 3, suivant qu'elle appartiendra à l'octave de  $\overset{1}{ut}$ , ou de  $\overset{2}{ut}$ , ou de  $\overset{3}{ut}$ , etc. Ainsi, *sol* désignera la quinte majeure de  $\overset{1}{ut}$ ; *mi*, sa douzième majeure ou la tierce majeure de  $\overset{2}{ut}$ , etc.

548. Les lames peuvent être de verre, ou de quelque autre matière métallique, telle que le cuivre rouge et le laiton. On doit, avant d'en faire usage, en adoucir les bords, pour empêcher qu'ils n'endommagent l'archet. La poussière qui sert à rendre les lignes nodales sensibles à l'œil, peut être du sablon fin, ou du mica en parcelles, semblable à celui que l'on emploie, sous le nom de *poudre d'or*, pour empêcher l'écriture de s'effacer. Cette poussière doit être légèrement disséminée et d'une manière uniforme sur la surface supérieure de la lame que l'on met en vibration.

549. Les différentes parties qui sous-divisent la surface vibrante, et auxquelles les lignes nodales servent de périmètre, tantôt sont semblables et égales entre elles, et tantôt différent par leur grandeur et par leur figure. Dans l'un et l'autre cas, les vibrations qu'elles produisent toutes à la fois étant isochrones, se confondent en se mettant à l'unisson. La durée de ces vibrations, ou leur nombre dans un temps donné, lequel nombre nous appellerons *rapport de vibrations*, dépend principalement de la figure de la lame, de la position des points d'appui, c'est-à-dire de ceux par lesquels cette lame est fixée, et de celle du point auquel on applique l'archet. Mais une autre circonstance très remarquable, qui a une grande influence dans la production

des résultats, consiste en ce que, toutes choses égales d'ailleurs, il suffit de faire varier le degré de pression et de vitesse de l'archet, pour changer le rapport de vibration, et déterminer une autre sous-division de la surface vibrante, et un nouvel assortiment de lignes nodales. Il en résulte que pendant un même mouvement de l'archet, on entend souvent deux ou trois sons qui se succèdent; quelquefois même deux de ces sons ont lieu simultanément, et c'est lorsque l'on est parvenu à obtenir un de ces sons dans toute sa pureté, que l'effet auquel il répond se manifeste.

La résonance multiple d'une corde vibrante diffère de celle dont il s'agit ici, en ce qu'aucun des sons qu'elle renferme ne peut être produit séparément, par une sous-division de la corde analogue au degré de ce son.

550. Lorsqu'on a produit un de ces effets, on remarque toujours que l'endroit par lequel on presse la lame vibrante, appartient à une ligne nodale, ou à son prolongement. On peut même, sans altérer le résultat, déplacer les doigts, en les faisant mouvoir d'un côté ou de l'autre sur la ligne dont il s'agit, jusqu'à un certain terme, passé lequel le son change tout à coup, ainsi que le résultat auquel il répond. Le point d'appui, proprement dit, est comme le centre de l'espace dans lequel la position des doigts est susceptible de varier. Lorsque plusieurs lignes nodales s'entrecroisent, il est toujours situé à l'une de leurs intersections. On peut aussi, en continuant de tenir la lame vibrante par un même endroit, faire varier entre certaines limites la position de l'archet, sans que le résultat subisse aucun changement. Nous indiquerons certaines observations qui pourraient aider à trouver le point central dans lequel réside l'origine des vibrations, lorsqu'il n'est pas donné par la figure elle-même.

Les dessins produits par l'arrangement symétrique de la poussière disséminée sur la surface vibrante, tantôt offrent des combinaisons de la ligne droite avec la ligne courbe, tantôt sont uniquement composés de lignes de cette dernière espèce. Parmi les courbes, les unes sont rentrantes; les autres se réduisent à des arcs sous-tendus par les bords de la surface vibrante.

Lorsqu'on fait varier la position du point d'appui, si au lieu

de la laisser sur une ligne nodale, on l'en écarte peu à peu en la transportant sur une partie qui vibrait, et que l'archet reste toujours au même endroit, il y a des cas où la figure du dessin éprouve des changemens, sans qu'il en survienne dans le rapport de vibrations et dans le son dont il est accompagné. Quelquefois même le dessin se transforme en un autre qui contrasté avec lui d'une manière frappante.

Les lignes nodales qui composent certains dessins, interceptent sur la surface de la lame un espace ordinairement situé vers le centre, qui paraît exempt de vibrations. La poussière qui occupe cet espace y reste immobile, sans prendre aucun arrangement régulier.

Si après avoir produit un dessin sur la lame vibrante, on la touche en dessous avec un des doigts libres, dans quelque point qui n'appartienne pas à ce dessin, et que l'on réitère le même mouvement de l'archet, il pourra arriver que ce mouvement donne naissance à de nouvelles lignes nodales qui formeront comme des parties accessoires, relativement au dessin que l'on avait déjà obtenu, ou que celui-ci fasse place à un dessin tout différent. Dans l'un et l'autre cas, le rapport de vibrations et le son se trouveront changés.

Le contact du doigt libre arrête les vibrations qui, sans lui, auraient lieu dans la partie touchée, en sorte qu'il devient comme un nouveau point d'appui, qui appartient à une des lignes nodales dont il détermine la production.

On peut aussi se servir du contact dont il s'agit, dans le cas où parmi plusieurs dessins qui paraissent disposés à se montrer en vertu d'un même mouvement de l'archet, pendant que plusieurs sons se font entendre, on désire en déterminer un de préférence. On fait répondre alors le contact à quelque point d'une ligne nodale qui appartient exclusivement à ce dessin.

551. A mesure que les dessins formés par les lignes nodales sont plus composés, le nombre des sous-divisions de la surface vibrante se trouve augmenté, ce qui accélère les vibrations, et donne naissance à des sons plus aigus. C'est pour cette raison qu'en employant des lames d'une plus grande étendue, on obtient des

effets plus variés et plus chargés de lignes nodales, qu'avec des lames plus petites; car pour qu'un dessin puisse naître sur une surface vibrante, il faut que les vibrations excitées dans celle-ci restent en-deçà du terme où elles deviendraient si fréquentes, que le corps cesserait de résonner. Or, lorsqu'on emploie une lame plus étendue, le degré du son générateur se trouvant abaissé, les autres sons ont une plus grande latitude à parcourir pour arriver à ce terme où finit l'échelle des sons appréciables, en sorte que la lame devient susceptible d'offrir des effets auxquels une lame plus petite se refuserait, parce que ses parties n'auraient plus le jeu nécessaire pour produire le mouvement vibratoire.

552. On remarque qu'un même dessin est plus ou moins net, et que le son dont il est accompagné, est plus ou moins mélodieux et permanent, suivant que le point d'appui et le point frotté se rapprochent ou s'éloignent de leurs positions centrales, auxquelles répond le *maximum* de symétrie et de résonance. Mais il y a des sons qui ont constamment quelque chose de dur; il semble que les vibrations qui les font naître soient gênées, ils s'éteignent aussitôt que l'archet a quitté le bord de la lame. Les lames métalliques en rendent plusieurs qui sont très doux et se rapprochent de ceux de l'harmonica.

553. Les lames de verre acquièrent, par le frottement répété de l'archet, l'espèce d'électricité que nous appelons *vitrée*. Si, au moment où l'on a obtenu un dessin, on laisse tomber sur la surface vibrante un corps très léger, tel qu'une barbe de plume, et qu'ensuite on approche de celle-ci l'extrémité d'un doigt, elle sera attirée par ce doigt, et s'y attachera.

Parmi les diverses figures que peuvent avoir les lames destinées aux expériences, nous nous bornerons à deux, savoir, le carré et le cercle.

### *Expériences avec des lames carrées (1).*

*Influence du degré de pression et de vitesse de l'archet, pour faire varier les résultats.*

Le point d'appui étant au centre *a* (fig. 47) de la lame, et le point frotté en *f*, près de l'un des angles, on peut obtenir trois résultats différens, auxquels répondent les sons <sup>1</sup>*ut*, <sup>2</sup>*mi*, <sup>3</sup>*fa*, que l'on entend résonner tour à tour, suivant les différentes pressions de l'archet, mais plus rarement le dernier.

Si, au moment où le son fondamental *ut* résonne seul, on fait passer l'archet à plusieurs reprises sur le point *f*, en le conduisant lentement et en modérant la pression, on voit la poussière s'arranger de manière que les grains qui étaient situés sur des lignes menées du centre aux milieux des côtés restant immobiles, ceux qui occupaient les parties intermédiaires se retirent les uns vers les lignes dont on vient de parler, et les autres vers le centre, en formant autour des espaces qu'ils laissent à vide, quatre courbes dont les concavités regardent les angles de la lame. A mesure que l'on réitère les mouvemens de l'archet, la poussière se condense près des lignes perpendiculaires aux côtés, et les courbes subissent des inflexions qui rapprochent leurs sommets du centre, en sorte qu'à la fin ils ne sont plus séparés que par un petit espace qui avoisine le centre (2). Si l'on fait abstraction de ces séparations, l'assortiment présente l'aspect de deux droites, qui se

(1) La lame dont nous nous sommes servis, pour la plupart de ces expériences, était de verre semblable à celui dont on fait les vitres. Elle avait à peu près un décimètre ou quatre pouces de côté. Nous avertirons des cas d'exception, dans lesquels nous avons employé des lames de dimensions différentes ou de quelque autre matière.

(2) La figure 47 représente, entre chaque angle de la lame, tel que *n*, et le centre, les différentes inflexions *sr*, *γp*, *du*, d'une même courbe, qui répondent à plusieurs mouvemens successifs de l'archet. Assez souvent il n'y a que deux ou trois sommets de courbes qui soient bien prononcés. Mais en multipliant les expériences, on parvient à obtenir un dessin symétrique.

coupent à angle droit, et partagent la surface de la lame en quatre carrés égaux.

554. Si c'est le son  $mi^2$  qui se fait entendre seul, on voit paraître trois lignes nodales situées diagonalement, qui s'infléchissent comme le présente la figure 48, mais qui assez souvent sont un peu confuses. On peut déterminer plus sûrement leur formation, en touchant avec un doigt libre le dessous de la lame dans quelqu'un des points qui répondent à la ligne nodale  $ng$ . Le résultat se montrera sous des traits différens et plus nettement dessinés, si l'on place l'appui au point  $a'$  (fig. 49) situé à la moitié de la distance entre le centre  $a$  et le côté  $gh$ . L'archet peut rester en  $f$ , ou, mieux encore, être transporté en  $f''$  à la moitié du côté  $hn$ . Les lignes nodales subissent, dans leurs positions et dans leurs courbures, les changemens qu'indique la figure; mais le son reste le même.

Lorsque le point frotté étant en  $f''$ , au milieu de  $hn$ , le dessin paraît dans toute sa netteté, on remarque que les lignes  $ko$ ,  $yx$  s'écartent du parallélisme avec les côtés  $gh$ ,  $en$ , de manière que leurs extrémités supérieures  $k$ ,  $y$  étant, comme nous l'avons dit, au milieu de la distance entre le centre et les mêmes côtés, leurs extrémités inférieures  $o$ ,  $x$  sont éloignées des angles  $h$ ,  $n$  d'une quantité égale, au moins à très peu près, aux  $\frac{2}{3}$  du côté  $hn$ .

555. L'effet qu'accompagne le troisième son  $fa$ , est représenté fig. 50. Il diffère de celui qu'on voit, fig. 47, par l'addition des lignes nodales  $\delta\nu$ ,  $\pi\mu$ , etc. (fig. 50), qui sont assez souvent un peu infléchies, et dont les distances  $h\delta$ ,  $\mu n$  aux angles sont égales au quart du bord de la lame. Souvent aussi au lieu de quatre arcs réunis près du centre, comme dans la fig. 47, il n'y en a que deux qui se regardent par leurs convexités, ainsi que le représente la figure 50.

On produira le même effet, en prenant deux points d'appui en  $a'$ ,  $a''$ , au milieu de deux côtés opposés, et en laissant toujours l'archet en  $f$ . Alors les sons  $ut^1$ ,  $mi^2$  cessent de se faire entendre, mais un nouvel élément, savoir,  $la^3$  intervient avec  $fa$  dans la résonance de la lame vibrante. On se rendra maître du premier

son, en touchant la lame avec un doigt libre, en dessous du centre  $a$ , à une petite distance du bord  $fn$ , et en variant un peu la position de ce doigt. Au moment où l'on entendra le  $la'$ , la poussière s'arrangera sous la forme de deux arcs  $ala'$ ,  $al'a'$  (fig. 51) tournés l'un vers l'autre par leurs concavités, et qui se réunissent aux endroits des appuis. La distance entre leurs sommets  $l, l'$  et les côtés  $ge, fn$  est égale à peu près à  $\frac{1}{3}$  de chacun d'eux.

On peut faire subir à ces arcs des variations qu'il nous paraît intéressant d'indiquer. Pour les observer, on prend un seul point d'appui en  $a$  (fig. 52), à une petite distance du bord de la lame, et l'on frotte de nouveau le point  $f$ . On voit alors les extrémités des deux arcs se rapprocher du centre, de manière que celles qui étaient en contact avec le bord  $gh$ , vont se placer à l'endroit de l'appui. Les mêmes extrémités s'arrondissent en se liant l'une à l'autre, tandis que les sommets  $l, l'$  se rapprochent au contraire des bords  $ge, hn$ . Le dessin, dans ce cas, présente l'aspect d'une courbe rentrante. On continue d'éloigner peu à peu le point d'appui du bord  $gh$ ; la courbe, pour se prêter à ces déplacements, se rétrécit insensiblement dans le sens du diamètre parallèle à  $ge$ , en même temps qu'elle s'allonge dans le sens de celui qui est parallèle à  $gh$ , et lorsque les variations ont atteint leurs limites, les deux arcs se trouvent ramenés au cas de la figure 51, avec la différence que la ligne qui peut être considérée comme étant leur corde commune, est située en sens contraire de celui qu'indique cette figure, c'est-à-dire que les points où ils se réunissent par leurs extrémités, répondent aux milieux des côtés  $ge, hn$ . Il paraît clair que pendant les variations qu'ils subissent, l'espace qu'ils circonscrivent reste constant, et conserve le même rapport d'étendue avec la surface entière de la lame, puisque le son n'éprouve aucune altération sensible. Ce son a toujours de l'aigreur, et le dessin auquel il répond n'est pas nettement prononcé.

Si au lieu de prendre le point frotté en  $f$  (fig. 47) près d'un des angles, on le transporte au milieu  $s$  d'un des bords, tandis que le point d'appui est toujours au milieu  $a$  de la surface vibrante, on entend résonner le son  $fiu^*$ , quarte superflue du gé-

nérateur, auquel se joint le son  $\overset{2}{m\acute{i}}$ , qui se fait toujours entendre très faiblement, en sorte que l'on ne peut amener l'expérience à donner l'effet qui répond à ce dernier son. Le dessin que l'on obtient et qu'accompagne le son  $f\acute{i}^*$ , est comme l'inverse de celui auquel se rapporte la figure 47, c'est-à-dire que les diagonales y font la même fonction que les lignes menées du centre perpendiculairement sur les côtés dans le premier; et que les courbes y tournent leurs concavités vers ces mêmes côtés, comme on le voit, fig. 53. Du reste, sa formation a lieu de la même manière, et le résultat final, abstraction faite des petites séparations entre les parties situées autour d'un petit espace central, s'offre sous l'aspect de deux diagonales qui se coupent à l'endroit du même centre.

Cet espace étant masqué par le contact, lorsque l'on fait l'expérience de la manière qui vient d'être décrite, on peut le laisser à nu, en prenant la lame entre trois doigts appliqués à autant d'angles  $g, e, h$ , ce qui est l'équivalent du premier contact, parce que les lignes nodales passent par ces angles. On cesse alors d'entendre le son  $\overset{2}{m\acute{i}}$ ; mais il est remplacé par un son très aigu  $\overset{4}{s\acute{o}l}$ , et que l'on obtient quelquefois solitairement par une forte pression de l'archet. Dans ce cas, le dessin est composé en même temps des quatre courbes que représente la figure 53, et de quatre arcs additionnels,  $\delta\mu\pi\eta, \tau\sigma\gamma\delta, \nu\zeta\epsilon\sigma, \lambda\psi\omega\xi$  (fig. 54), sous-tendus par les bords de la lame vibrante. Il est facile d'amener à volonté cet accessoire à la suite du dessin de la figure 53. Pour y parvenir, on répand de nouvelle poussière sur les espaces qui répondent aux quatre arcs  $\delta\mu\pi\eta, \tau\sigma\gamma\delta$ , etc. (fig. 54). Ensuite, tandis que l'on répète les coups d'archet, on tâtonne avec l'extrémité d'un doigt libre, la partie de la surface inférieure de la lame qui répond à l'un des espaces dont il s'agit, et au moment où le contact a rencontré quelque'un des points susceptibles de perdre leur mouvement vibratoire, on voit naître subitement les arcs additionnels, comme pour orner les parties du tableau qui auparavant se trouvaient vides. Si l'on retire le doigt, un nouveau coup d'archet, en ramenant le son  $f\acute{i}^*$ , fera disparaître ces arcs, en sorte que la

24.

poussière qui avait servi à les tracer, sera jetée par le mouvement vibratoire aux endroits déjà occupés par les lignes situées en diagonale.

556. Si l'on veut obtenir du premier coup le dessin complet, on laissera d'abord la surface de la lame à nu, et on touchera celle-ci en dessous, avec un doigt libre, en passant l'archet sur le point *s* (fig. 53), jusqu'à ce qu'on entende le son *sol* résonner seul. Alors, tenant le doigt libre dans la même position, on répandra de la poussière sur la surface de la lame, et on fera de nouveau mouvoir l'archet. Dans le dessin qui en résulte, les lignes situées en diagonales forment ordinairement deux courbes distinctes, adossées par leurs sommets.

*Variations dans les résultats, le son restant le même.*

Nous avons déjà eu l'occasion de parler des changements de figure que les lignes nodales sont susceptibles d'éprouver, sans que le rapport de vibration et le son, qui en est l'indice, soient altérés : rien n'est même si ordinaire que de voir ces lignes varier dans leurs inflexions, lorsque l'on répète plusieurs fois de suite une même expérience; mais la plupart de ces variations ne modifient que légèrement la ressemblance entre les dessins qui les subissent, et n'empêchent pas que l'œil n'y reconnaisse l'empreinte d'un même type. Celles que nous nous proposons de décrire ici sont beaucoup plus remarquables, en ce qu'elles font ressortir par des contrastes, les dessins auxquels elles se rapportent. On en distingue de deux genres différens. Les unes agissent graduellement, à mesure que l'on déplace le point d'appui, en sorte que les résultats extrêmes sont liés par une série de nuances intermédiaires. Les autres déterminent un passage brusque entre un dessin et un autre, qui s'écarte totalement du premier par son aspect. Nous nous bornerons à un seul exemple de chaque genre.

557. Le point d'appui étant en *a* (fig. 55), de manière que *ah* soit égale à peu près au quart de la diagonale *al*, et l'archet étant

en  $f$  vis-à-vis de  $a$ , on voit paraître la ligne nodale contournée que présente la figure, accompagnée du son *ut*\*.

Les choses étant dans cet état, si l'on fait avancer peu à peu le point d'appui vers le bord  $hn$ , parallèlement à ce même bord, et que l'on répète les coups d'archet en  $f$ , on verra la ligne nodale subir des inflexions, en vertu desquelles ses différentes portions se rapprocheront du parallélisme avec les bords  $ge$ ,  $hn$ , en sorte qu'à un certain terme, elle se trouvera partagée en trois lignes tortueuses, semblables à celles que l'on voit (fig. 56), et séparées entre elles aux endroits des points  $\gamma$ ,  $\gamma'$ , dont les distances aux angles  $g$ ,  $n$ , sont à peu près le tiers des bords  $gh$ ,  $en$ .

Si l'on continue le mouvement du point d'appui, toujours dans le même sens, les trois portions de courbe se redresseront peu à peu, et au terme où la distance entre le point d'appui  $a$  et le bord  $hn$  sera à peu près  $\frac{1}{3}$  de ce bord, elles se dirigeront sur trois lignes parallèles à ce même bord, comme on le voit (fig. 57) (1). Cependant ces lignes sont presque toujours légèrement infléchies, et il est rare de les obtenir absolument droites, comme sur la figure. On conçoit la manière dont il faudrait s'y prendre, pour avoir des effets inverses, en allant de la ligne droite à la ligne courbe.

Il est facile d'obtenir immédiatement le dessin de la figure 56, en prenant deux points d'appui en  $\gamma$ ,  $\gamma'$  dont les distances aux angles  $g$ ,  $n$  doivent être, d'après ce qui a été dit plus haut, à peu près égales au tiers du bord de la lame, et en laissant l'archet en  $f$ .

558. On peut avoir un exemple du second genre, en donnant au point d'appui et au point frotté, des positions qui s'écartent peu de celles qui ont lieu relativement au dessin de la figure 55. Il suffit de prendre le point d'appui un peu plus près de l'angle  $h$ , en restant sur la diagonale qui passe par cet angle. Le son est plus aigu de deux octaves, plus un demi-ton, que celui qui répond au

---

(1) Pour mieux réussir, dans cette dernière partie de l'expérience, il faut pincer la lame avec les doigts, de manière à diminuer, autant qu'il est possible les surfaces de contact.

dessin dont il s'agit, et l'on voit paraître celui que représente la figure 58. Si l'on recommence l'expérience avec la seule différence que le point d'appui soit près du bord  $hg$ , et à égale distance entre les bords  $ge$ ,  $hn$ , on aura le dessin de la figure 59, et à en juger d'après le rapport des yeux, on n'aurait pas soupçonné que les deux dessins dont le rapprochement offre l'image d'une dissonance, dussent se confondre dans un même unisson. Si l'on répète de nouveau l'expérience, en commençant par obtenir le résultat de la fig. 59, puis en transportant le point d'appui de  $a$  en  $a'$ , sans déranger les lignes nodales, on pourra suivre des yeux, pendant le mouvement de l'archet qu'il sera bon de ralentir, les effets des forces répulsives en vertu desquelles les grains de poussière chassés de leurs premières positions, iront occuper celles qui répondent à l'assortiment représenté (fig. 58). En comparant les deux figures, on peut, d'après la correspondance des lettres, concevoir le jeu des parties composantes du dessin figure 59, dans le passage à celui de la figure 58. Les points  $\psi$ ,  $o$ ,  $t$ ,  $b$  (fig. 59), sont les seuls qui restent fixes. La ligne courbe  $\delta\epsilon$  s'infléchit de manière qu'elle devient l'arc marqué  $\delta e$  (fig. 58); la ligne anguleuse terminée par les points  $\psi$ ,  $r$  (fig. 59), se divise en trois parties  $\psi u$ ,  $ku$ ,  $kr$ , dont la première devient la partie  $\psi\gamma u$  (fig. 58) de la ligne anguleuse comprise entre les points  $\psi$ ,  $b$ ; la seconde, que nous désignerons maintenant par  $o'z$  (fig. 59), les points  $u$ ,  $o'$  d'une part, et  $k$ ,  $z$  de l'autre, étant censés se confondre, se détache pour aller fournir la branche  $oz$  de la courbe  $zom$  (fig. 58); la troisième partie  $kr$  (fig. 59), se dirige diagonalement, et donne la ligne maquée des mêmes lettres (fig. 58). En suivant de même les autres indications, on concevra que la seconde branche  $om$  de la courbe  $zom$  provient de la partie inférieure  $om$  (fig. 59) de la ligne anguleuse terminée par les points  $m$ ,  $c$ , laquelle partie, en restant fixe par le point  $o$ , s'infléchit en sens contraire de l'autre branche  $oz$  (fig. 58), et ainsi du reste.

55g. Dans l'exemple précédent, les trois lignes courbes  $e\gamma$ ,  $\gamma\delta$ ,  $\delta h$  (fig. 55) comprises entre les côtés  $gh$ ,  $en$ , et que l'on peut regarder comme les parties composantes du dessin, restent entières

pendant le passage au résultat que représente la figure 57; les grains de poussière qui en sont comme les élémens, conservent leur liaison, et ne font autre chose que s'arranger conformément à la tendance qu'ont les lignes à devenir parallèles. Mais dans le cas présent, le dessin est décomposé en un certain nombre de parties dont les élémens se réunissent dans un ordre qui n'a rien de commun avec le premier.

Une autre différence entre le même résultat et celui que nous avons cité d'abord, consiste en ce que dans ce dernier, le passage d'un extrême à l'autre se fait par une gradation de nuances intermédiaires, à mesure que le point d'appui se déplace en se rapprochant du côté *hn*. Il en est autrement du second résultat; les déplacements successifs du point d'appui dans l'espace compris entre *a* et *a'*, ou ne produisent aucun effet, ou font naître un dessin différent qu'accompagne un autre son. Il peut arriver, par exemple, que les doigts parvenus à la proximité du point d'appui *a'*, rencontrent celui qui se rapporte au dessin de la figure 55 (1). La transformation du premier dessin en celui de la figure 58, répond à un second terme où elle se montre tout à coup sans avoir été amenée.

Nous remarquerons en finissant cet article, que dans tous les cas où le son est constant, tandis que le dessin subit un changement quelconque, la position de l'archet reste aussi la même, en sorte que c'est toujours celle du point d'appui qui a varié.

### *Disposition des points d'appui et de ceux sur lesquels agit le frottement.*

Nous avons déjà annoncé que l'on pouvait déplacer le point d'appui qui avait concouru à la production d'un dessin, en le faisant mouvoir, jusqu'à un certain terme, sur une ligne nodale, sans que le résultat fût altéré. Cependant, parmi les di-

---

(1) Il y a un autre point situé un peu de côté, en allant vers *en*, qui donne un dessin particulier qu'accompagne un son plus bas d'un demi-ton que *ré*<sup>4</sup>. La figure 60 représente ce dessin.

verses positions que ce point est susceptible de prendre, il en est une qui doit être regardée comme la limite en-deçà et au-delà de laquelle les autres varient, et que l'on peut souvent reconnaître à un caractère qui lui est propre, et qui consiste en ce qu'elle se trouve à l'endroit où plusieurs lignes nodales s'entrecoupent, en les supposant prolongées, s'il est nécessaire. La chose est évidente à l'égard des points d'appui situés en  $a$  (fig. 47 et 50), ou en  $a, a'$  (fig. 50 et 51). Lorsqu'on obtient le dessin de la figure 48, le point d'appui  $a$  ne se trouve pas dans l'intersection de deux lignes nodales, à laquelle le dessin ne se prête pas, mais au milieu de l'une d'elles, et c'est probablement pour cette raison que ce dessin est ordinairement peu prononcé. Ce n'est que quand le point d'appui a été transporté en  $a'$  (fig. 49), que les lignes nodales se dessinent nettement, en même temps que leur commune intersection passe par ce même point. Nous allons citer un nouvel exemple propre à répandre du jour sur ce qui vient d'être dit.

560. Supposons qu'ayant pris un point d'appui en  $a'$  (fig. 61) éloigné de  $gh$  d'une quantité égale au quart de cette ligne, ou de tout autre côté, on fasse passer l'archet sur le point  $f$  situé au-dessous de  $a'$ , un peu plus vers  $gh$ . On verra paraître le dessin que représente la figure, et qui est composé de trois courbes, dont chacune a une branche dans le sens d'une diagonale, et l'autre parallèle à l'un des côtés, plus de deux lignes droites,  $tu, lp$ , dont les positions sont analogues aux précédentes.

On obtiendra le même effet en transportant le point d'appui à d'autres endroits de la ligne  $ko$ , comme en  $s$  (1), qui en occupe à peu près le milieu. Mais le son qui répondra à ces divers effets, se terminera avec le mouvement de l'archet. Si, au contraire, on place le point d'appui au centre  $a$  de la lame, où les lignes nodales situées diagonalement tendent à se couper, le retour du même effet sera accompagné d'un son plus mélodieux, qui ne

---

1) Nous avons trouvé dans une nouvelle expérience, que pour continuer d'obtenir le même effet, il faut transporter l'appui dans quelque autre point de la ligne  $ma$ , plus avancé vers le centre, et que c'est quand il arrive au centre que la durée du son est à son *maximum*.

s'éteindra qu'au bout d'un instant, ce qui paraîtrait seul indiquer que le point d'appui est parvenu à son centre.

561. La position de l'archet est de même susceptible de parcourir une certaine latitude, sans que le résultat cesse d'être constant, et il existe aussi au milieu de ces variations, un point dans lequel réside l'origine des vibrations, et que le seul aspect du dessin auquel il correspond, suffit quelquefois pour indiquer. Ainsi il est visible que dans les résultats que représentent les figures 53 et 54, ce point est placé exactement au milieu du côté  $hn$ . Mais sa position n'est pas indiquée avec la même précision, relativement au dessin de la figure 61, soit qu'on la prenne en  $f$ , comme ci-dessus, ou en  $f'$  du côté opposé, ainsi qu'on en est le maître. Dans ce dernier cas, on ne peut pas assurer qu'elle soit à égale distance entre les extrémités des deux branches de la courbe irrégulière  $cyn$ . Pour que cette idée parût admissible, il faudrait que ces branches fussent semblables, et rencontrassent le côté  $hn$  sous des angles égaux.

On parviendrait peut-être à fixer, dans ces sortes de cas, la position du point dont il s'agit, en combinant deux dessins différents, par des observations du genre de celle que nous allons citer.

562. Supposons que l'on ait obtenu le dessin de la figure 49, en prenant le point  $a'$  au quart de la distance entre les côtés  $gh$ ,  $en$ , et en plaçant l'archet au milieu  $f'$  du côté  $hn$ , ce qui est le cas où le dessin a le plus de netteté. Les choses étant dans cet état, si l'on transporte l'archet à l'extrémité  $o$  de la ligne nodale  $mko$ , le son descendra d'une octave juste, et l'on verra paraître le dessin de la figure 61. On pourra remarquer de plus, que l'on parvient au même résultat, en prenant la position de l'archet à la gauche ou à la droite du point  $o$  (fig. 49), de manière que ce point paraît être au milieu de l'espace que l'archet peut parcourir, sans que le résultat soit changé. Or, la distance de ce point à l'angle  $h$  est ou exactement, ou à très peu près, égale aux  $\frac{2}{3}$  du côté  $hn$ , ainsi que nous l'avons dit plus haut, ce qui donnait, par rapport au dessin de la figure 61, la position du point dans lequel réside l'origine des vibrations.

Nous nous bornerons à ce seul exemple, que nous ne donne-

rons même que comme un essai d'observations qu'il faudrait avoir multipliées et suivies avec attention, pour s'assurer de l'utilité dont elles peuvent être relativement au but proposé.

L'exemple dont il s'agit nous aurait d'ailleurs paru digne d'être cité, à raison de ce qu'il a d'intéressant en lui-même, par la corrélation qu'il nous découvre entre les dessins des figures 49 et 61.

Pour le mieux saisir, on commence par faire naître le second dessin. Prenant ensuite le point  $a'$  (fig. 49) et le point  $f'$ , comme il a été indiqué plus haut, on fera mouvoir lentement l'archet; pendant ce mouvement, les lignes  $mk$ ,  $tu$  (fig. 61) restent fixes; les lignes  $cy$ ,  $lr$  disparaissent; les autres lignes  $ko$ ,  $yx$ ,  $tz$ ,  $p'$  se dirigent parallèlement aux bords de la lame, comme le représente la figure 49, en même temps que  $tz$  se réunit à  $tu$ , et  $lp$  à  $yx$ , au moyen d'une inflexion.

Le passage d'un dessin à l'autre se fait ici d'une manière bien plus simple et plus directe, que celui qui a lieu entre les dessins des fig. 58 et 59. Cependant ce dernier n'emporte aucune altération dans le degré du son. Dans l'autre les deux sons diffèrent, mais en donnant l'octave qui est, après l'unisson, la plus parfaite des consonnances.

Le dessin de la figure 61 n'est pas symétrique; pour qu'il le fût, il faudrait qu'il ressemblât à celui de la figure 62, formé de quatre courbes qui ont toutes le même rapport de position avec la surface vibrante. Mais nous n'avons jamais pu obtenir ce dernier dessin.

### *Influence des contacts surnuméraires, pour faire varier les résultats.*

Nous avons déjà vu que le contact d'un doigt libre peut être employé comme moyen accessoire pour faciliter la production d'un résultat. Mais il est des cas où il devient une condition nécessaire pour produire un effet auquel la surface vibrante abandonnée à elle-même se refuserait. Nous nous bornerons encore ici à un seul exemple.

563. Supposons que l'on ait d'abord fait naître le dessin de la figure 61, en prenant le point d'appui au centre  $a$ , et en plaçant

Parchet au point  $f$ , comme il a été dit plus haut. Si le point d'appui descend ensuite peu à peu le long de la ligne  $ko$ , le dessin restera le même jusqu'à un certain terme, où l'on verra paraître celui de la figure 55, qui subsistera à son tour, à mesure que l'appui continuera de se mouvoir, jusqu'à un autre terme, sur la ligne  $ko$ . Or, si pendant ce second mouvement, on touche l'angle  $g$ , avec un doigt libre, le son  $ut$  qui avait commencé à se faire entendre, sera remplacé tout à coup par le son  $mi$ , et le dessin de la figure 61 reparaitra, sans cependant être aussi prononcé que la première fois. On pourra même faire succéder les deux sons l'un à l'autre, en se servant de la longueur de l'archet, et il pourra arriver que l'on entende à la fois, pendant un petit instant, les deux sons qui formeront une tierce mineure très juste. Ainsi, après l'apparition du dessin de la figure 55, la lante vibrante conservait encore une disposition à reproduire le dessin précédent, laquelle exigeait pour s'exercer, qu'un contact additionnel ramenât l'impression d'une des lignes nodales relatives à ce dessin.

564. Nous terminerons ce que nous avons à dire sur les effets des vibrations excitées dans les lames carrées, par l'indication du dessin qui représente la figure 63, et qui nous a paru curieux par les contours variés des lignes nodales dont il est l'assemblage, et par la conformité qui naît de leur disposition symétrique, entre les deux moitiés de la lame séparées par la diagonale qui va de  $h$  en  $e$  (1). Les positions des points d'appui  $a$ ,  $a$  sont les mêmes que pour les dessins de la figure 56, c'est-à-dire que leurs distances aux angles les plus voisins, sont égales au tiers du côté du carré. Mais le point  $f$  où l'on applique l'archet, se rapproche davantage du milieu de  $ne$ ; sa distance à l'angle  $n$  nous a paru égale à peu près aux  $\frac{2}{5}$  de la même ligne. Le son est  $mi$  (2). Ce résultat a été obtenu avec une lame de laiton d'environ 135 millimètres, ou 5 pouces de côté.

(1) L'expérience qui donne ce résultat a été trouvée par madame Vuillemot, nièce de l'auteur.

(2) Ce son est souvent accompagné d'un autre qui se fait entendre sourdement, et qui répond au dessin que l'on voit (fig. 55). Ce n'est qu'après plu-

*Expériences avec des lames circulaires.*

*Cas où le point d'appui est situé au centre de la surface vibrante.*

La position du point d'appui est susceptible de varier sur une lame circulaire, comme sur celle dont la figure est un carré, et même entre des limites plus étendues, sans que le dessin soit changé. Nous la supposons ici au centre, parce que ce point est à la fois le milieu de l'espace qu'elle peut parcourir dans tous les sens, relativement à un même résultat; c'est aussi celle qui donne les vibrations les moins promptes à s'éteindre, après qu'on a retiré l'archet.

565. Si l'on frotte à plusieurs reprises un point quelconque de la circonférence, il arrivera que certaines nuances dans le degré de pression et de vitesse de l'archet détermineront divers sons à se faire entendre tour-à-tour, ou même simultanément; on obtiendra des effets plus variés, en transportant l'archet successivement à différens points de la circonférence, dont la disposition physique ne peut être rigoureusement la même, quoiqu'ils soient censés être tous à des distances égales du centre.

566. Les dessins auxquels répondent ces différens sons, se composent en général de lignes droites situées sur les directions d'autant de rayons, et liées deux à deux par des arcs dont le sommet est tourné vers le centre. Le nombre de ces lignes augmente à mesure que le son devient plus aigu, et en même temps les lignes se raccourcissent, et les arcs descendent vers la circonférence. Un coup-d'œil jeté sur les figures 64, 65, etc., donnera une idée de cette disposition des lignes nodales. L'espace situé autour du centre, et terminé par les convexités des arcs, reste immobile et couvert de poussière.

Le diamètre des lames dont nous nous sommes servis pour les expériences de ce genre, était d'environ 108 millimètres ou 4 pouces. Les unes étaient de verre ordinaire et les autres de laiton, ayant une épaisseur d'environ  $\frac{2}{3}$  de millimètre ou  $\frac{3}{15}$  de ligne. Ce

---

sièurs tâtonnemens que l'on parvient à obtenir isolément celui qui est le but de l'expérience.

métal donne des sons plus doux et plus faciles à apprécier. Nous avons aussi employé une lame d'environ 162 millimètres ou 6 pouces de diamètre.

567. Dans chaque dessin, la circonférence se trouve sous-divisée en un certain nombre de parties égales, par les lignes situées sur les directions des rayons. Les résultats auxquels nous sommes parvenus, ont donné les différentes sous-divisions de 360, en nombres pairs, depuis quatre jusqu'à vingt inclusivement. Il n'est pas douteux que l'on irait plus loin, avec des lames d'un plus grand diamètre. Les sons correspondans ont été successivement *ut* pour 4 sous-divisions, *ré* pour 6, *ut* pour 8, *fa* pour 10 (1), *ut* pour 12 (2), *sol* pour 14, *ut* pour 16; les sons relatifs aux deux derniers résultats, étaient si aigus, que nous n'avons pu les apprécier exactement. D'après une analogie qui sera indiquée plus bas, on aurait *mi* pour 18 divisions et *sol*\* pour 20.

568. L'espèce d'indifférence que chaque point de la péripérie a pour donner naissance à un rapport de vibrations plutôt qu'à un autre, rend les sons que l'on essaie d'en tirer tellement fugitifs, que l'on est quelquefois obligé de tâtonner long-temps avant de parvenir à se rendre maître de celui que l'on a en vue d'obtenir. On évite ou du moins on abrège beaucoup ces tâtonnemens en faisant usage du principe que dans chaque dessin du genre de ceux dont il s'agit ici, l'angle que forment entre elles deux lignes nodales voisines est égal à la circonférence divisée par le nombre total de ces lignes, et que le milieu de chacun de ces arcs est un des points entre lesquels on peut choisir pour y faire passer l'archet. Cela posé, tandis que l'on tient la lame par le centre entre deux doigts, on met un de ceux qui sont restés libres en contact avec un point pris à volonté en dessous de la lame, près de la circonférence. Ce contact détermine la formation d'une ligne nodale, qui coïncide avec le diamètre mené par le point dont il s'agit, après quoi il est facile de calculer la distance à laquelle il faut placer l'archet. Vent-

---

(1) *Sol*<sup>3</sup> pour 10, avec la grande lame de cuivre.

(2) *Ré* juste pour 12, avec la même lame.

on faire naître une étoile composée de six rayons, situés comme ceux d'un hexagone régulier? On place l'archet à 30 degrés du même diamètre, et ainsi des autres dessins.

Dans ces expériences, comme dans plusieurs de celles que nous avons citées plus haut, l'archet a une certaine latitude à parcourir en-deçà et au-delà du point auquel répond la véritable origine des vibrations. Pendant ce mouvement, il rencontre assez souvent sur son passage un autre point dans lequel il excite un commencement de vibrations qui répond à un autre dessin, et donne naissance à un son différent, que l'on parvient à fixer, à l'aide d'un frottement bien ménagé. En ce genre, comme en une multitude d'autres, la facilité de réussir dépend beaucoup de l'habitude.

*Cas où le point d'appui est nécessairement situé hors du centre.*

569. Dans les effets qui précèdent, le centre est considéré comme la limite autour de laquelle la position du point d'appui est susceptible de varier, pour un même rapport de vibrations. Mais cette limite ne s'étend que jusqu'à une certaine distance du centre, passé laquelle les changemens de position de l'appui déterminent un nouvel ordre de phénomènes. Les dessins qui en résultent comparés entre eux, ne présentent plus le même caractère d'uniformité. La partie non vibrante de la surface qui, comme nous l'avons vu, va toujours en augmentant, à mesure que le point d'appui, que l'on est libre de substituer à celui qui se confond avec le centre, descend vers la circonférence, devient tout à coup nulle, en sorte que la surface entière est mobile.

570. On peut employer une manière d'amener un des nouveaux phénomènes, qui rendra sensible les différences dont nous venons de parler. Ayant pris d'abord le point d'appui au centre, on le fait descendre progressivement le long d'un rayon, et en même temps on frotte avec l'archet le point de la circonférence auquel aboutit ce rayon. Ces frottemens répétés font naître successivement différens sons dont chacun répond à l'un des résultats décrits précédemment, et qui deviennent très aigus, à une certaine proximité de la circonférence. Il y a un terme où ils sont

accompagnés d'un autre son qui frémit sourdement, et dont l'expression est *sol*, et lorsque l'appui, en avançant toujours, est parvenu au point où ce son se fait entendre seul et dans toute sa force, quoique ayant toujours une certaine dureté, on voit paraître sur la surface vibrante (fig. 71) la circonférence d'un cercle parfait, concentrique à celui de cette surface, et qui passe par le point dont il s'agit. La distance de ce point à la circonférence de la lame vibrante, est environ  $\frac{1}{7}$  du diamètre. Sa position n'est pas susceptible de varier en-deçà ou au-delà de cette distance, et celle du point frotté est fixe à l'extrémité du rayon qui aboutit au même point.

571. L'appui continuant de descendre vers la circonférence, arrive à un autre terme qui en est distant à peu près de  $\frac{1}{3}$  du diamètre, et si dans le même cas, on transporte l'archet, soit au point *f* situé à  $90^{\text{d}}$  du terme dont il s'agit, soit dans quelqu'un des points intermédiaires, tels que *f'*, *f''*, jusque vers le  $45^{\text{e}}$  degré, on obtiendra le dessin représenté (fig. 72), composé d'une ligne nodale située en partie parallèlement à la circonférence, et en partie dans la direction du diamètre. L'expression du son correspondant est *s<sup>a</sup>b*. On peut parvenir au même résultat, en serrant la lame entre deux doigts placés en *a'*, *a''* aux extrémités d'un même diamètre, et en plaçant l'archet en *f*, à  $90^{\text{d}}$  de chacun des mêmes points.

On repassera du dessin dont il s'agit ici au précédent, en rendant au point d'appui la position d'où dépend ce dernier, et en replaçant l'archet à l'extrémité du même rayon. La ligne diamétrale disparaît, et la partie circulaire se rapproche très sensiblement de la circonférence.

572. On peut aussi se servir du résultat qu'indique la figure 72, pour rendre sensible l'immobilité de la partie moyenne de la surface vibrante, dans les expériences relatives aux dessins représentés (fig. 64, 65, etc.) A cet effet, on transportera d'abord le point d'appui un peu plus près du centre que le point *a* (fig. 70), en le laissant sur la ligne diamétrale *dd'* (fig. 72). On le fera ensuite avancer progressivement vers le centre, en frottant avec

l'archet différens points de la circonférence. Au moment où l'on aura obtenu un dessin quelconque, on pourra remarquer que la partie de la ligne diamétrale, comprise dans l'espace exempt de vibrations, subsistera toujours en restant comme étrangère aux phénomènes.

Nous nous bornerons à ces résultats auxquels on peut en ajouter beaucoup d'autres, en employant des lames plus étendues. Quelques-uns des dessins que l'on obtient dans ce cas, sont aussi susceptibles de se modifier d'une manière plus ou moins sensible, tandis que le rapport de vibration et le son qui en est la suite restent les mêmes.

On conçoit aisément à quel point la fécondité de ce genre d'expériences doit s'accroître par la faculté que l'on a de faire varier la forme des lames que l'on emploie. Nous nous en sommes tenus à deux limites, dont l'une se rapporte aux lignes rectilignes, et l'autre à celles qui sont curvilignes. Notre but a été moins de multiplier les résultats, que de les coordonner, et d'en former un système propre à montrer les rapports mutuels que quelques-uns ont entre eux, à fixer l'attention sur certaines considérations auxquelles il serait utile d'avoir égard, dans l'explication des faits, en un mot, à faire sentir toute la délicatesse du sujet, et la grandeur des difficultés qu'auront à vaincre ceux qui entreprendront de débrouiller l'étrange complication que présentent tant de phénomènes divers, en les soumettant à une théorie qui les fasse découler tous d'un même principe.

573. M. Chladni a essayé de tracer la route qui doit être suivie pour arriver à cette théorie. Suivant ce célèbre physicien, le premier pas à faire serait de déterminer, par des formules générales, les lois des vibrations tournantes d'une verge cylindrique ou prismatique, c'est-à-dire de celles qui se font par de petits mouvemens oscillatoires que chaque molécule fait autour de l'axe (1). On appliquerait la théorie de ces mouvemens à ceux d'une lame rectangulaire, auxquels M. Chladni pense qu'ils peuvent être assimilés. Ce rapprochement est fondé sur ce que les rapports entre

---

(1) *Acoustique*, pag. 131.

les sons que rend une lame de cette figure, à mesure que l'une de ses dimensions diminue à l'égard de l'autre, approchent toujours davantage de ceux qui ont lieu à l'égard des sons rendus par une verge qui fait des vibrations tournantes (1). Cette espèce de verge donnerait ainsi comme l'effet élémentaire d'où l'on partirait pour expliquer les résultats produits par des lames rectangulaires, dont la largeur irait en augmentant (2); on étendrait ensuite les mêmes principes aux lames d'une forme différente (3).

574. M. Chladni regarde la ligne droite comme étant celle qui donne la figure primitive des lignes nodales, en sorte que les courbures que présentent souvent ces dernières, sont des déviations ou des distorsions de la ligne droite (4). Ainsi, en décrivant l'expérience dont les résultats sont indiqués (fig. 55, 56 et 57), il place en premier lieu celui de la figure 57, où le dessin est composé de trois lignes droites parallèles entre elles, et la courbe que l'on voit (fig. 55), provient des distorsions de ces lignes. Nous avons cependant remarqué, à l'occasion de la même expérience, que c'est lorsque l'on a obtenu le dessin de la figure 55, que le son est plus mélodieux et a plus de permanence, et qu'il devient plus sec et plus dur à mesure que le dessin se rapproche de la figure rectiligne, ce qui pourrait faire présumer que le résultat relatif au dessin dont il s'agit, est celui auquel répond le véritable centre d'action des forces, d'où dépend le mouvement vibratoire, puisque c'est dans ce même cas qu'elles s'exercent avec le plus de liberté.

575. M. Chladni ayant cherché les nombres des lignes nodales situées dans un même sens, sur les différens dessins qu'une surface vibrante d'une figure donnée était susceptible de produire, a trouvé que quand ces nombres suivaient le rapport des termes de la série naturelle 2, 3, 4, 5, 6, etc., les racines carrées des nombres de vibrations, d'où dépendaient les sons qui accompagnaient

(1) *Acoustique*, pag. 112, 139 et 172.

(2) *Ibid.*, pag. 132.

(3) *Ibid.*, pag. 134.

(4) *Ibid.*, pag. 143.

ces dessins, étaient aussi à peu près en progression arithmétique. Un résultat de ce genre qui nous a paru surtout remarquable, est celui que présentent les expériences faites avec une lame circulaire, dans lesquelles toutes les lignes nodales sont des portions de rayons liées deux à deux par des inflexions. Voyez les figures 64, 65, etc. Dans ce cas, les nombres de ces lignes, ou, plus simplement, leurs moitiés, sont successivement 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, laquelle série est la même que celle des racines carrées des nombres 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, qui approche beaucoup de la suivante, 4, 9, 16, 24, 36, 48, 64, 80, 100. Or, les termes de celle-ci sont dans le rapport des nombres de vibrations relatifs aux sons  $ut, ré, ut, sol, ré, sol, ut, mi, sol^*$ , qui se trouvent être à peu près les mêmes que ceux qui répondent successivement aux dessins. On doit faire ici abstraction des deux derniers, qui, comme nous l'avons dit, n'ont pu être exactement appréciés. D'ailleurs nous ne donnons la relation dont il s'agit, que comme un simple résultat d'observation, et M. Chladni a usé de la même réserve, en citant des faits analogues à celui-ci.

576. M. Paradisi, savant italien, a entrepris sur le même sujet des recherches qui paraissent avoir été dirigées vers le véritable point de vue de la théorie. En faisant vibrer une lame rectangulaire de verre, par de très petits coups d'archet successifs, il a reconnu que les lignes nodales formaient d'abord des courbes qui, suivant lui, étaient des demi-cercles appuyés sur les côtés du rectangle, et dont l'un avait son centre à l'endroit où était appliqué l'archet. En poursuivant l'expérience, il a vu les demi-cercles subir graduellement des changemens de figure, à l'aide desquels leur courbure allait en diminuant, et ils ont fini par un assortiment symétrique de lignes droites, dont l'une dirigée parallèlement aux grands côtés du rectangle, se divisait en deux moitiés, et les autres étaient parallèles aux petits côtés.

M. Paradisi appelle *centre de vibration*, le centre du cercle qui se forme autour du point d'application de l'archet, et *centres secondaires*, ceux des autres cercles. Il représente les actions qu'exercent sur l'élément d'un cercle quelconque, les centres des autres cercles, par une équation différentielle qu'il n'a pu inté-

grer, faute d'avoir toutes les données nécessaires pour parvenir à cette intégration.

La solution complète du problème dont il s'agit ici, consisterait à déterminer le système de lignes nodales qui devrait avoir lieu, en supposant que l'on connût la figure de la lame vibrante, la position du point d'appui, celle du point où l'on applique l'archet, et le rapport de vibrations indiqué par le son qui se fait entendre. La science paraît encore éloignée du terme où ce problème sera résolu d'une manière satisfaisante. Ces dessins, qui, par leur symétrie, semblent être tout préparés pour recevoir l'empreinte du calcul analytique, tendent plutôt à lui échapper dans l'état actuel de nos connaissances.

Ils se réduisent jusqu'ici à de simples résultats d'expériences, mais si étonnans par eux-mêmes, qu'ils ne cesseraient point de l'être, dans le cas même où ils seraient expliqués.

Les expériences relatives aux surfaces vibrantes ne sont pas restées stériles pour le progrès des arts. M. le docteur Savart a tiré un parti très ingénieux de ces corps, dont les sons isolés n'excitent un si vif intérêt qu'en ce qu'ils parlent aux yeux, pour perfectionner la construction de ces instrumens qui nous en font entendre de si flatteurs, que le musicien enchaîne et diversifie à son gré. Il s'agit ici des instrumens à cordes, et le violon est celui que M. Savart a choisi pour en faire l'objet de ses recherches.

577. Dans les violons ordinaires, on donne aux tables des formes voûtées et contournées; et cette construction, déjà vicieuse en elle-même, a de plus l'inconvénient d'exiger que les fibres du bois soient coupées suivant différentes directions, et sous des longueurs variables. Il en résulte dans les vibrations communiquées aux diverses parties de l'instrument, un dérangement de symétrie et une sorte de disparate, qui donne de l'aigreur aux sons produits par l'ensemble de ces vibrations, et dont ils se ressentent encore par un défaut d'uniformité et de liaison, lorsqu'ils se succèdent dans une même mélodie.

578. Ces inconvéniens disparaissent dans le violon de M. Savart, dont l'exécution se trouve ramenée à une simplicité qui en

rend les différentes parties plus homogènes. Il construit la caisse avec des tables planes, composées de deux pièces qu'il tire de la même planche, en la fendant et en la dédoublant dans le sens de ses fibres longitudinales. Ces pièces vont en s'amincissant graduellement, à partir de l'endroit où l'ébranlement est excité par le contact du chevalet. La figure de ces tables est celle d'un trapèze dont le plus petit des côtés parallèles est situé près du manche.

La ligne droite reparait dans les ouvertures qui, au lieu d'être recourbées par leurs extrémités comme dans les autres violons, représentent des rectangles dont les grands côtés sont dirigés parallèlement aux fibres ligneuses. Cette figure en est mieux assortie aux usages de ces ouvertures, dont le principal est d'établir une communication entre l'air contenu dans la caisse et celui du dehors.

579. M. Savart, en imitant avec le violon le procédé employé par M. Chladni, pour rendre sensibles à l'œil les résultats du mouvement vibratoire, a pu apprécier la justesse des vues qui l'ont dirigé dans la construction de son violon. Après avoir répandu sur une des tables un sable fin, il faisait résonner une des cordes en y passant l'archet, et l'on voyait la couche de sable se transformer subitement en un système de lignes nodales qui s'arrangeaient symétriquement autour de l'axe de la table. M. Savart a mis en vibration de la même manière les diverses parties de l'instrument, jusqu'aux plus petites, ce qui a fait voir avec quelle ponctualité tous les détails concouraient, chacun à leur manière, à l'effet de l'ensemble.

580. L'usage du petit cylindre interposé entre les deux tables, et auquel on a donné le nom d'*âme*, a dû fixer particulièrement l'attention de M. Savart. L'expérience l'a éclairé sur ce point important. Il a pris deux plaques circulaires faites d'un même bois et d'égales dimensions. Il les a fixées par leurs centres aux deux extrémités d'une tige cylindrique de bois, puis tenant cette tige verticalement entre deux doigts, il a répandu sur les plaques du sable fin, et a passé un archet sur les bords de l'une d'elles, de manière à en tirer un des sons qu'elle étoit susceptible de rendre. Le même dessin s'est montré à l'instant sur toutes les deux. Cette

expérience, à laquelle M. Savart a fait subir diverses modifications, en employant des plaques de dimensions différentes, a prouvé que la véritable destination de l'âme était, non pas de soutenir la table supérieure pour l'empêcher de céder à la pression des cordes, mais de transmettre les vibrations de cette table à celle du fond; et pour que cette transmission s'accordât avec les indications de l'appareil qui avait servi comme de modèle, M. Savart a modifié les épaisseurs des deux tables, jusqu'à ce qu'elles rendissent exactement le même son. A l'égard de l'âme, il a été conduit, par des considérations puisées dans la théorie et dans l'expérience, à la placer dans un point où un nœud de vibration avec lequel elle se trouverait en contact, fût assez délié pour ne pas s'opposer à la transmission du mouvement vibratoire d'une table à l'autre, et il a jugé que ce point devait être situé derrière le pied droit du chevalet et un peu en dehors.

581. Les qualités qui distinguent le violon de M. Savart consistent dans la douceur et dans la pureté des sons pris séparément, et dans leur égalité qui se soutient partout en allant du grave à l'aigu, lorsqu'ils se font entendre successivement. L'oreille ne s'aperçoit du passage de l'un à l'autre que par le changement de degré. L'instrument a de plus cet avantage, que sa construction étant fondée sur des règles fixes, et n'ayant rien d'arbitraire, un ouvrier ordinaire peut en exécuter un du même genre, qui, sans avoir la perfection à laquelle atteindrait un habile luthier, ne s'en éloignera pas sensiblement (1).

582. Nous ajouterons ici une considération relative à une différence qui a été remarquée par M. Savart, entre les expériences faites avec des lames circulaires de bois, et celles dans lesquelles on emploie des lames composées d'une substance inorganique, telle que le verre ou le laiton. Ces dernières ayant un tissu uniforme et partout semblable à lui-même, le mouvement imprimé

---

(1) Voyez, pour plus ample développement des principes de l'auteur et des applications qu'il en a faites, le mémoire qu'il a publié sur le même sujet, et qui a obtenu le suffrage de l'Académie royale des Sciences. Paris, 1819, chez Deterville.

par le frottement de l'archet à un point quelconque de leur circonférence peut faire naître indistinctement tel système de lignes nodales ou tel autre, en sorte que l'attente de l'observateur qui se propose d'obtenir un dessin particulier dont il a fait choix est le plus souvent trompée, à moins qu'il n'ait déterminé d'avance, à l'aide du moyen que nous avons indiqué plus haut, la position d'un des diamètres qui appartiennent à ce dessin. Dans les plaques de bois, au contraire, les fibres ligneuses ayant une direction fixe, opposent au mouvement vibratoire qui tend à se communiquer dans le sens de cette direction, une résistance beaucoup plus grande que celle qui a lieu dans un autre sens. Il en résulte qu'à l'instant où l'on fait passer l'archet sur tel point que l'on veut de la circonférence, on voit paraître une ligne nodale sur la file de fibres ligneuses qui passe par le centre, et à l'aide de cette donnée naturelle, l'observateur est le maître de donner à l'archet la position convenable pour faire naître le dessin qu'il a dans l'idée.

## VI. DE L'ÉLECTRICITÉ.

583. L'ÉLECTRICITÉ est une des branches de nos connaissances que les physiciens modernes ont cultivée avec le plus d'assiduité et de succès. Elle n'était encore connue au commencement du siècle dernier, que par les attractions et les répulsions que le verre, le succin (1), les résines et autres substances semblables exerçaient sur les corps légers, que l'on présentait à leur action, et par une faible lueur que le frottement dégageait de ces substances. Environ trente ans après, les recherches de Dufay et de Gray, amenèrent une de ces époques fécondes, où une science commence à se développer par un progrès rapide, et où les découvertes semblent se presser à la suite les unes des autres. Un examen plus attentif des phénomènes conduisit à établir la distinction importante entre les corps qui transmettent le fluide électrique, et

---

(1) Le nom d'électricité a été emprunté du mot *electrum*, par lequel les anciens désignaient le succin, appelé aussi *ambre jaune*.

ceux qui refusent de le propager : la construction des machines , mieux dirigée, donna de nouvelles facilités pour étudier ses différentes manières d'agir : une découverte imprévue fit ressentir aux êtres animés, l'énergie de ce pouvoir intérieur qu'il exerce sur eux, par le simple contact des vases où il s'accumule : enfin les physiiciens soupçonnèrent que ces phénomènes qu'on s'empresait d'aller voir, même par amusement, n'étaient qu'une imitation, en raccourci, des explosions de la foudre; et, pour vérifier cette étonnante analogie, Franklin trouva, dans le pouvoir des pointes, le secret, non moins étonnant, de dérober la foudre elle-même au nuage qui la renfermait dans son sein, et de l'offrir à l'observation, sous la forme et avec tous les caractères du fluide mis en action par nos machines.

584. A mesure que les faits se multipliaient, on cherchait à en donner des explications et à en saisir la dépendance mutuelle. Dufay avait reconnu deux électricités différentes; l'une qu'il appelait *vitree*, parce qu'elle était produite par le frottement du verre; l'autre qu'il nommait *résineuse*, parce qu'on l'excitait en frottant la résine et les autres substances analogues. Il remarqua que les substances animées d'une même espèce d'électricité se repoussaient, et attiraient celles qui possédaient l'autre espèce d'électricité. Cette idée, qui a été depuis reproduite par Symmer, et ramenée à l'hypothèse de deux fluides co-existans dans un même corps, était, pour ainsi dire, la clef de la véritable théorie. Franklin, en présentant les actions électriques sous un point de vue différent, par sa doctrine de l'électricité positive et négative, en fit une application très heureuse à l'expérience de la bouteille de Leyde, dont il ramena la décharge à un simple rétablissement d'équilibre. Cette manière mécanique de concevoir un fait, qui tenait alors le premier rang parmi les merveilles de l'électricité, attira une foule de partisans au philosophe de Philadelphie. Épinus, l'un des plus distingués d'entre eux, en appliquant le calcul à sa doctrine, la rendit plus rigoureuse, et forma un ensemble mieux lié de toutes les observations déjà connues; lui-même découvrit plusieurs faits dignes d'attention, et il mérita ainsi doublement de la science, comme géomètre et comme

physicien. Il la servait encore d'une autre manière, en préparant la voie à Coulomb, qui, après être parti du point où *Æpinus* s'était arrêté, a franchi seul une carrière toute nouvelle. Muni d'un appareil dont l'invention lui est due, et qui réunit au mérite de la simplicité, celui d'une précision jusqu'alors inconnue, il a déterminé, par des expériences décisives, la loi suivant laquelle varient les attractions et répulsions électriques, à raison de la distance; et cette loi s'est trouvée la même que celle de la gravitation universelle, découverte par Newton dans les espaces célestes. La théorie, établie ainsi sur une base solide, a été appliquée, par le même physicien, à la manière dont le fluide électrique se partage entre différents corps, et à d'autres effets qui n'avaient été qu'entrevis.

585. Tel était l'état de nos connaissances relativement à l'électricité, lorsque les expériences de Galvani appelèrent l'attention de toute l'Europe savante, sur des phénomènes très remarquables par leur liaison intime avec les mouvemens de l'économie animale, et qui bientôt inspirèrent un surcroît d'intérêt par leurs rapports avec un des plus beaux résultats de la Chimie moderne. La théorie avait besoin d'être agrandie, pour s'étendre à l'explication de ces nouveaux phénomènes; et il était réservé au célèbre Volta de reculer ici les limites de la science, par la découverte d'un principe qui avait échappé à la sagacité des physiciens.

586. Mais l'expérience de la décomposition de l'eau était connue, et l'électricité galvanique avait seulement offert un nouveau moyen de la reproduire. On était loin de prévoir les phénomènes inattendus qu'elle devait présenter à l'observation du célèbre Davy, lorsqu'à côté des métaux qui la développent par leur contact mutuel, il verrait paraître tout à coup l'éclat métallique, signe caractéristique des corps de la même classe, sur des substances d'un aspect terreux, qui depuis long-temps occupaient dans la méthode chimique des places particulières qu'elles ne devaient qu'à ce que leur véritable nature avait été méconnue.

Ce n'était pas encore la dernière des surprises dont l'électricité galvanique devait fournir le sujet, et elle en réservait d'autres non moins propres à en faire naître de nouvelles pour le moment

où M. OErsted, l'un des hommes dont s'honore le Danemarck, deviendrait à la fois l'inventeur et le premier témoin de l'expérience si remarquable où le fluide électrique semble se transformer dans la pile en fluide magnétique, pour rompre l'équilibre entre les forces qui maintiennent l'aiguille aimantée dans sa position naturelle, et l'en écarter sous un angle plus ou moins ouvert. Ce sera lorsque nous aurons exposé la théorie du magnétisme, que nous reviendrons avec le détail convenable sur tout ce qui tient à l'importante découverte dont nous venons de parler, et l'on jugera combien elle a gagné depuis qu'elle est connue en France, par l'extension que lui ont donnée deux physiciens très distingués, MM. Ampère et Arago, en variant et en multipliant les effets de l'appareil qui avait servi aux expériences du savant Danois.

## 1. De l'Électricité produite par le Frottement ou par la Communication.

---

### *Notions générales.*

Avant d'entrer dans le développement de la théorie, nous rappellerons quelques notions qu'il est nécessaire d'avoir toujours présentes à l'esprit pour la bien concevoir.

### Différence entre les Corps conducteurs et les Corps non conducteurs.

587. On distingue en général deux classes de corps, relativement à la communication du fluide électrique. Les uns, qu'on appelle *corps conducteurs*, tels que les métaux et les liquides, à l'exception de l'huile, transmettent plus ou moins facilement ce fluide aux autres corps de la même classe qui sont en contact avec eux. Les autres, qu'on a nommés *corps non conducteurs*,

teils que le verre, le succin, le soufre, les résines, la soie, etc., retiennent le fluide comme engagé dans leurs pores, sans lui permettre de se répandre sur les corps environnans.

588. Nous devons à Grey et à Wheeler, la découverte de cette différence remarquable entre les corps relativement à la communication de l'électricité (1). Ces deux physiciens avaient pensé d'abord que tous les corps conduisaient indistinctement la vertu électrique; et pour essayer de la propager à une grande distance, ils avaient imaginé de soutenir une corde de chanvre qui devait servir de conducteur, sur un cordonnet mince de soie tendu horizontalement, dans la pensée que ce cordonnet ne laisserait échapper qu'un filet d'électricité, proportionné à la petitesse de son diamètre, en sorte qu'une grande quantité de fluide serait transmise par la corde de chanvre. Celle-ci avait quatre-vingt pieds de longueur, et passait sur le cordonnet, de manière qu'une de ses parties, longue seulement de quelques pieds, descendait verticalement, en portant une boule d'ivoire attachée à son extrémité. L'autre partie s'étendait le long d'une grande galerie, dans une direction horizontale, jusqu'à un tube de verre auquel on l'avait attachée. Pendant que l'un des physiciens frottait ce tube, l'autre voyait un duvet de plume, placé sous la boule, se porter vers elle par attraction, et en être aussitôt repoussé. Mais le cordonnet de soie s'étant rompu, Grey, qui n'en avait pas d'autre sous la main, y substitua un fil métallique, et depuis ce moment, tous les effets disparurent. Les deux physiciens comprirent alors, que l'obstacle qu'avait opposé le cordonnet de soie à la perte de l'électricité, dépendait, non pas de la finesse du couloir, mais de sa nature même; et ce qu'ils avaient regardé comme un accident, devint un bonheur dans leur esprit.

589. On dit d'un corps électrique qu'il est *isolé*, lorsqu'il a pour support un corps non-conducteur, ou qu'il est suspendu à un fil de soie. Cet isolement se pratique surtout à l'égard des corps conducteurs que l'on veut électriser, et dont on intercepte ainsi la communication avec d'autres corps conducteurs qui, par

---

(1) Histoire de l'Electricité, par Priestley, t. I, p. 55.

leur contact, dépouilleraient les premiers du fluide dont ils sont chargés.

590. Les corps non conducteurs ont de plus cette propriété, que quand on frotte l'un d'entre eux, il se produit autour de lui un engagement de fluide électrique, susceptible de manifester sa présence. On les a aussi appelés pour cette raison *corps idio-électriques*, c'est-à-dire, *électriques par eux-mêmes*, et l'on a nommé les autres *corps anélectriques*, c'est-à-dire, *non électriques*, si ce n'est par communication. Mais en conservant à ceux-ci la dénomination de *corps conducteurs* tirée de la faculté qu'ils ont de transmettre le fluide électrique, nous préférons pour ceux qui se refusent à cette transmission, la dénomination de *corps isolans*, qui est l'opposée de la première.

591. Au reste, il s'en faut de beaucoup qu'il y ait une ligne nette de séparation entre les deux classes que forment les corps, relativement à la communication du fluide électrique. Outre qu'il n'est aucun corps qui soit, ou parfaitement isolant, ou parfaitement conducteur, il existe entre ceux qui se rapprochent le plus des deux limites, une infinité d'intermédiaires, qui participent plus ou moins de la propriété isolante et de la propriété conductrice. Il y a même telle espèce de corps, dans laquelle le rapport entre l'une et l'autre propriété varie très sensiblement, suivant les circonstances; et souvent cette variation est due à un mélange de molécules conductrices, interposées entre celles d'un corps naturellement isolant, ou réciproquement. Ainsi, l'air atmosphérique, qui, en le supposant très sec, posséderait, dans un assez haut degré, la propriété isolante est souvent chargé de vapeurs aqueuses conductrices, qui lui font perdre de cette propriété, à proportion de leur abondance. C'est pour cette raison qu'un air humide est si peu favorable aux expériences électriques, parce qu'en s'emparant du fluide qui se dégage autour de l'appareil, il l'empêche de parvenir à ce degré d'accumulation, d'où dépend à la fois et son énergie et le succès des expériences.

592. Nous ne devons pas omettre, que les corps conducteurs, lorsqu'ils sont isolés, acquièrent la propriété électrique, par le frottement d'un corps isolant. Mais le fluide dont ils se chargent,

dans ce cas, est fourni par le frottoir, en sorte que le corps conducteur ne fait autre chose que le recevoir par communication. Lorsque ce corps, n'étant pas isolé, subit de même le frottement d'un corps non conducteur, il se fait aussi un dégagement de fluide qui est enlevé par le premier corps, mais qu'il transmet aussitôt aux corps environnans, avec lesquels il est en communication.

### Idée de la Machine électrique.

593. C'est sur les principes que nous venons d'exposer, qu'est fondée la construction de nos machines électriques. Dans celle qui est aujourd'hui le plus en usage, l'électricité est produite par le frottement qu'exercent plusieurs coussins sur les deux surfaces d'un plateau de verre, fixé sur un axe auquel une manivelle que l'on fait jouer imprime un mouvement de rotation. Le fluide électrique, à mesure qu'il se dégage, est attiré par des pointes de fer situées horizontalement à une petite distance d'une des faces du plateau, et de là se répand sur la surface d'un cylindre de cuivre, auquel on a donné plus spécialement le nom de *conducteur*. Ce cylindre est porté par deux colonnes de verre, qui étant d'une nature non conductrice, s'opposent à la dissipation du fluide dont le conducteur est chargé; et le fluide ne pouvant d'ailleurs s'échapper à travers l'air environnant, qui, par sa nature, refuse aussi de le transmettre, s'accumule jusqu'à un certain degré autour du conducteur; en sorte que si l'on en approche le doigt ou un corps quelconque qui soit lui-même conducteur, la présence du fluide électrique s'annoncera par une étincelle.

### Des deux Fluides dont on suppose le Fluide électrique composé.

594. L'hypothèse que nous emploierons pour expliquer les phénomènes, consiste à considérer, avec Symmer (1), le fluide électrique comme composé de deux fluides différens, qui sont neutra-

---

(1) Philosoph. Transact., t. LXI, part. I, p. 340 et suiv.

lisés l'un par l'autre, dans l'état ordinaire des corps, et qui se dégagent lorsque les corps donnent des signes d'électricité. Au reste, il faut avouer que l'existence de ces deux fluides n'est pas fondée sur des raisons aussi recevables que celle du fluide électrique lui-même, que l'on suppose ici résulter de leur réunion. Mais l'adoption de ces fluides conduit à une manière simple et plausible de représenter les résultats de l'expérience, et sauve les difficultés dans lesquelles nous verrons bientôt que l'on s'expose à tomber, en essayant une autre hypothèse.

Telle est en général la manière d'agir des mêmes fluides, que les molécules de chacun se repoussent mutuellement et attirent celles de l'autre fluide. Il en résulte quatre combinaisons différentes d'actions entre les fluides des deux corps; savoir, deux répulsions et deux attractions, d'où dépendent les mouvemens par lesquels les corps eux-mêmes s'approchent ou s'écartent l'un de l'autre, ainsi que nous l'expliquerons bientôt avec plus de détail.

595. Le fluide électrique est répandu dans tous les corps. Le globe terrestre en est comme une source inépuisable, ce qui a fait donner à ce globe, le nom de *réservoir commun*, lorsque l'on parle de son intervention dans les phénomènes électriques. Chaque corps possède une certaine quantité du même fluide qui dépend de sa nature, et que nous appelons, pour cette raison, *la quantité de fluide naturelle* de ce corps. Or, par l'effet de quelque circonstance, ce fluide subit une décomposition, le corps se trouvera électrisé; d'où l'on voit qu'il ne faut pas confondre un corps qui est dans l'état naturel, avec un corps qui n'a que sa quantité naturelle de fluide, puisque la décomposition de celle-ci peut faire sortir le corps de son état naturel, sans aucune addition de fluide étranger. Mais le corps peut aussi passer à l'état électrique, en vertu d'une quantité surabondante de l'un ou l'autre des fluides composans, qu'il aurait reçue d'ailleurs par communication.

## Principes de la Théorie de Francklin.

596. Comparons maintenant l'opinion de Franklin, sur l'électrisation des corps, avec la manière de concevoir le même phénomène, dans l'hypothèse que nous avons adoptée. Ce célèbre physicien considérait le fluide électrique comme un être simple; et dans le passage d'un corps à l'état d'électricité, il pouvait arriver de deux choses l'une: tantôt le corps recevait du dehors une quantité de fluide qui s'ajoutait à la quantité naturelle, et dans ce cas, on disait de ce même corps qu'il était électrisé *positivement*; c'est ce qui arrivait au verre, et à plusieurs autres substances, par l'effet du frottement: tantôt le corps perdait une portion de son fluide naturel, et alors il se trouvait électrisé *négativement*. C'était le cas de la cire d'Espagne, de la résine, de la soie, etc., lorsqu'on les frottait. De là encore, les expressions d'*électricité positive* et d'*électricité négative*, employées par Franklin, pour désigner les deux états opposés dont nous venons de parler; nous verrons bientôt qu'un même corps pouvait aussi, suivant les circonstances, passer à l'un ou à l'autre de ces deux états.

Or, dans notre hypothèse, tous les effets attribués par Franklin à l'électricité positive ou à une surabondance du fluide unique admis par ce savant, seront produits par l'action d'un des deux fluides composans, rendu à l'état de liberté; et les effets qui dépendaient, selon lui, de l'électricité négative ou de la soustraction d'une partie du fluide qui faisait tout, seront dus à l'action de l'autre fluide composant. En conséquence, nous appellerons le fluide relatif à la première espèce d'électricité, *fluide de l'électricité vitrée*, ou simplement *fluide vitré*, et nous donnerons au fluide qui détermine l'autre espèce d'électricité, le nom de *fluide de l'électricité résineuse*, ou pour abrégé, celui de *fluide résineux*. Ce langage est à peu près le même qu'employait Dufay, dans un sens moins déterminé; et puisque les connaissances nous manquent sur la nature de ces deux fluides, dont l'existence même n'est pas démontrée, nous ne pouvons mieux faire que d'en emprunter les noms de ceux des corps qui les fournissent d'une manière spéciale.

597. Nous devons prévenir qu'il ne faut pas confondre les deux fluides que nous adoptons ici , avec les deux courans l'un de matière effluente , et l'autre de matière affluente que Nollet avait imaginés pour expliquer les phénomènes électriques. Ces deux courans appartenaient à un même fluide , et s'élançaient l'un du conducteur vers les corps environnans , et l'autre de ceux-ci vers le conducteur. Il y a loin , sans doute , de ces hypothèses , qui employaient des effluves dont les actions , affranchies de toute loi et de toute méthode rigoureuse , ne conduisaient qu'à des explications vagues d'une partie des phénomènes , et étaient prises en défaut par les autres , à ces théories fondées sur des forces dont la mesure est donnée par l'expérience , et dont les différens effets sont déterminés par le calcul avec une précision qui pourrait les faire prédire.

### Diversités que présentent les Corps électrisés par le Frottement.

598. Deux corps isolans se constituent , par leur frottement mutuel , dans deux états différens d'électricité , et les circonstances qui déterminent chacun d'eux à acquérir de préférence telle espèce d'électricité , dépendent de certaines causes qu'il n'est pas toujours facile de démêler. Le verre et les matières dans lesquelles le caractère vitreux est nettement prononcé , comme le cristal de roche et les pierres gemmes , acquièrent presque toujours l'électricité vitrée , quel que soit le frottoir que l'on emploie : nous disons presque toujours ; car on a observé que le verre frotté avec le poil de chat s'électrisait résineusement. D'une autre part , la résine , le soufre , la cire d'Espagne acquièrent l'électricité résineuse , par le frottement d'une matière isolante quelconque. Mais il y a ici une restriction à faire , au moins par rapport aux substances vitreuses , qui ne manifestent l'électricité vitrée , après qu'elles ont été frottées , qu'autant que leur surface est lisse et polie. Ainsi le verre qui a été dépoli s'électrise résineusement , par le frottement des mêmes substances qui auparavant lui communiquaient l'électricité vitrée. En général , toutes choses égales

d'ailleurs, les substances qui ont leur surface hérissée d'aspérités, paraissent avoir une tendance plus marquée vers l'électricité résineuse. Lorsqu'on frotte un ruban de soie blanc contre un autre de couleur noire, le premier s'électrise vitreusement et le second résineusement, ce que le célèbre Ingen-Housz attribue à la matière colorante du ruban noir, composée de molécules qui donnent une certaine âpreté à la surface de ce ruban (1).

599. Parmi les corps métalliques isolés, que l'on frotte avec une substance d'une nature déterminée, telle qu'un morceau de drap, les uns, comme le zinc et le bismuth, acquièrent l'électricité vitrée, et les autres, comme l'étain et l'antimoine, acquièrent l'électricité résineuse. Nous citons de préférence ces métaux, comme étant de ceux qui donnent le plus constamment le même résultat. Car on observe, dans les expériences de ce genre, des anomalies singulières, en sorte que tel morceau de métal, placé dans les mêmes circonstances, acquiert quelquefois une électricité différente de celle qu'il avait d'abord manifestée.

600. La même diversité a lieu par rapport à certains corps isolans. Quelquefois aussi le frottement fait naître constamment une espèce d'électricité dans tel morceau d'une substance, et en détermine constamment une différente dans un autre morceau d'ailleurs semblable au premier. Nous ne connaissons aucun corps dans lequel ce genre d'anomalie tienne à des nuances aussi délicates et aussi imperceptibles, que dans le minéral nommé communément *cyanite*, et que nous avons appelé *disthène* (qui a deux vertus). Parmi les divers cristaux de ce minéral, les uns acquièrent toujours l'électricité résineuse, à l'aide du frottement, et les autres l'électricité vitrée; et dans quelques-uns, les deux espèces d'électricité contrastent entre elles sur deux faces opposées, sans que ni l'œil ni le tact puissent saisir, dans l'éclat et le poli des faces, la plus légère indication de cette différence d'états.

---

(1) Nouvelles Expér. et Observ. sur divers objets de Physique, t. I, p. 5.

### Circonstance dans laquelle le Taffetas gommé acquiert l'Electricité vitrée.

601. M. le professeur Libes a découvert une manière particulière d'exciter la vertu électrique dans le taffetas gommé dont on fait les rubans que l'on électrise par frottement, pour charger de petites bouteilles, avec lesquelles on répète l'expérience de Leyde que nous décrivons dans la suite. L'enduit dont ce taffetas est couvert forme une espèce de vernis gluant, par l'intermède duquel le taffetas contracte de l'adhérence avec les corps que l'on applique, par pression, sur sa surface, en sorte qu'il faut faire ensuite un certain effort pour les en détacher, et que cette séparation est accompagnée d'un bruit analogue à celui d'un tissu que l'on déchire.

On sait que le taffetas gommé acquiert l'électricité résineuse par le frottement ordinaire : mais M. Libes a observé que si l'on se contente d'appliquer sur la surface de cette espèce de tissu un disque de métal attaché par le milieu à un cylindre de verre que l'on tient à la main, pour que le disque reste isolé, le taffetas, après sa séparation d'avec ce disque, se trouve électrisé vitreusement, tandis que c'est le disque qui est dans l'état résineux. L'une et l'autre électricité ont d'autant plus d'énergie que l'application du disque a été aidée par une plus forte pression. Il paraît que, dans cette expérience, la résistance que l'enduit oppose à l'effort qui agit pour séparer le disque, excite dans les particules de cet enduit une espèce de jeu dont l'effet est analogue à celui du frottement, avec cette différence remarquable, que l'électricité acquise par le taffetas est d'une espèce différente de celle que le frottement y ferait naître, même dans le cas où l'on emploierait, comme frottoir, le disque métallique.

Voici une manière de vérifier cette expérience, qui en fait mieux ressortir les résultats. On frotte d'abord le taffetas avec le disque de métal; le premier acquiert alors l'électricité résineuse, et le second l'électricité vitrée; on applique ensuite le disque, par pression, sur le taffetas, et l'on trouve que chacun

possède encore la même espèce d'électricité, mais dans un degré plus faible. En répétant les contacts, on arrive à un terme où l'électricité est zéro de part et d'autre, et au-delà de ce terme, le ruban passe à l'état vitré et le disque métallique à l'état résineux.

Si l'on substitue à ce disque un plateau de verre, le taffetas acquiert encore l'électricité vitrée, et celle du verre est résineuse, c'est-à-dire qu'elles sont l'une et l'autre d'une espèce opposée à celle qui aurait lieu par le frottement ordinaire.

Les effets dont nous venons de parler paraissent tellement dépendre de la résistance à la séparation, que si l'on emploie un taffetas qui ait perdu sa vertu glutineuse par la dessiccation, en sorte qu'il ne contracte aucune adhérence sensible avec les autres corps, l'application du disque n'y produit plus d'électricité.

### De l'Électricité produite par la pression.

602. Une circonstance heureuse a voulu que la première des substances minérales qui se soit présentée à l'action de l'espèce d'électricité dont nous allons nous occuper, ait été celle qui, par l'énergie de ses effets, ait mérité d'obtenir le premier rang parmi elles (1). Cette substance est la chaux carbonatée transparente, dite *spath d'Islande*. Elle possède à un si haut degré

---

(1) On nous a demandé quelquefois comment nous étions parvenus à faire la petite déconvexe dont il s'agit ici. Des chimistes d'un mérite distingué avaient annoncé qu'en analysant des morceaux de spath d'Islande, d'une belle transparence, ils en avaient retiré un peu de fer et de manganèse. Nous désirâmes de savoir si la présence du fer serait indiquée par le mouvement d'une aiguille aimantée mise en équilibre, à l'aide d'un moyen que nous ferons connaître lorsque nous traiterons du magnétisme, et qui la rend susceptible d'obéir à l'action d'une très petite quantité du métal dont il s'agit. Ayant pris un rhomboïde limpide de spath d'Islande, nous l'approchâmes d'un des pôles de l'aiguille, qui fut attiré avec une si grande force, que nous eûmes peine à croire que cette attraction pût être produite par quelques atomes de fer. L'effet aurait été plus grand que la cause. Nos soupçons se tournèrent alors vers l'électricité. Nous présentâmes le même rhomboïde à l'aiguille d'épreuve, et l'attraction se renouvela. En prenant ce rhomboïde, nous avions dû naturellement appliquer deux doigts sur deux de ses faces opposées, et il se trouvait ainsi tout préparé pour l'expérience qui devait le déclencher.

ce qu'on pourrait appeler *l'irritabilité électrique*, que si l'on prend d'une main un rhomboïde de ce spath, par deux de ses arêtes opposées, et qu'ayant touché, même légèrement, deux de ses faces parallèles, avec deux doigts de l'autre main on l'approche de la petite aiguille d'épreuve, il exercera sur elle une attraction sensible (1). Si l'on substitue la pression au contact, qui n'est pour ainsi dire, qu'une pression très mitigée, il est évident que l'on obtiendra des effets plus marqués. L'électricité acquise à l'aide de l'un ou de l'autre de ces moyens est celle que nos appelons vitrée. La même substance est aussi très électrique par le frottement.

603. Nous avons retrouvé dans diverses substances la propriété de devenir électriques à l'aide de la pression, mais c'est le spath d'Islande qui jusqu'ici en a offert le maximum. En général, le succès des expériences dépend du degré de pureté et de transparence des corps que l'on éprouve. Ces corps sont surtout de ceux qui sont susceptibles d'être réduits, par la division mécanique, en lames planes et unies. On peut aussi employer ceux qui ont été mis sous la même forme par le travail de l'art. Du nombre des premiers sont la topaze, surtout celle qui est incolore, l'eulase, l'arragonite, la chaux fluatée, et le plomb carbonaté. Les morceaux de quartz hyalin que nous avons employés avaient été travaillés. Tous ces corps acquièrent l'électricité vitrée, à l'aide du frottement, comme de la pression. La baryte sulfatée et la chaux sulfatée résistent à l'action de cette dernière force.

604. Parmi les corps dans lesquels le frottement fait naître l'électricité résineuse, il en est aussi qui, pour l'acquérir, n'ont besoin que d'être pressés. Tel est entre autres le minéral connu sous le nom de *bitume élastique*, lorsqu'en le coupant, on l'a mis sous la forme convenable pour l'expérience.

605. Le frottement et la pression doivent être considérés comme deux forces distinctes, dont chacune a une manière d'agir qui

(1) Il est aisé de sentir combien il y a loin de cette action délicate des doigts sur une surface vitreuse à ce qui se passe dans l'expérience faite par M. Libes, où l'électricité produite dépend de la viscosité de l'enduit appliqué sur le taffetas, et de l'agitation qu'excite entre ses molécules l'espèce de déchirement qui rompt leur adhérence avec le corps uni au taffetas par l'effet de la pression.

lui est particulière. Le premier dépend d'un mouvement de transport, en vertu duquel tous les points de la surface du corps frotté sont mis successivement en contact avec ceux de la surface du frottoir. Ces deux surfaces ne glissent pas l'une sur l'autre avec une telle liberté, qu'elles ne se trouvent comme gênées par les petites aspérités dont elles sont hérissées, et qui altèrent le niveau même de celles que l'on a polies avec le plus de soin. Il en résulte dans les molécules du corps frotté une espèce de petit ébranlement, d'où naît le dégagement de fluide électrique qui a lieu contre les deux surfaces. Lorsque c'est au contraire la pression qui agit, la surface du corps qui la subit fléchit sous l'effort des doigts, ce qui détermine un léger déplacement des molécules qui cèdent à cet effort, et tandis qu'ensuite on retire les doigts, les mouvemens imperceptibles occasionnés par la tendance à reprendre leurs premières positions, mettent en activité le fluide électrique dont se charge la surface du corps.

La distinction dont nous venons de parler se trouve confirmée par une observation qui consiste en ce que, parmi les substances qui cèdent à l'action du frottement, il en est qui résistent à celle de la pression, pour les rendre électriques. De ce nombre sont la chaux sulfatée et la baryte sulfatée.

Dans un autre article, où nous traiterons de la propriété qu'ont les corps qui ont acquis la vertu électrique de la conserver plus ou moins long-temps, nous ferons voir que le spath d'Islande est encore celle qui a obtenu la prééminence sur toutes les autres.

### Tension électrique.

606. On donne le nom de *tension électrique* à la force répulsive avec laquelle les molécules du fluide vitré ou résineux répandu sur la surface d'un corps tendent à s'écarter les unes des autres. Cette force est proportionnelle à la densité du fluide ou au nombre des molécules renfermées dans un espace donné. Supposons deux corps qui soient chargés, par exemple, d'électricité vitrée. Si l'on applique sur la surface de chaque corps un petit disque métallique, fixé à l'extrémité d'une aiguille de gomme-laque, pour

Le tenir isolé, les quantités de fluide que les deux disques, en les supposant égaux, enlèveront aux corps dont il s'agit, seront entre elles comme les tensions des mêmes corps; en employant, pour les mesurer, des moyens dont nous parlerons dans la suite, on pourra déterminer le rapport entre les tensions elles-mêmes.

*De la Loi que suivent les Actions électriques à raison de la Distance.*

607. Les forces des deux fluides qui composent le fluide électrique agissent, ainsi que nous l'avons dit (585), en raison inverse du carré de la distance. Cette loi avait déjà été aperçue par plusieurs physiciens, et en particulier par Æpinus, qui disait que s'il avait à choisir, il donnerait la préférence à cette même loi, parce qu'elle avait l'analogie pour elle (1). On voit par là qu'il présumait que le principe des mouvemens célestes devait s'étendre sur toutes les actions à distance, et plus cette idée était belle et satisfaisante, plus il était à désirer qu'elle pût devenir une vérité de fait.

Coulomb l'a démontré en même temps pour les actions électriques, et pour celles qui dépendent du magnétisme (2). Il a donné à l'appareil dont il s'est servi dans les expériences relatives à l'électricité, le nom de *balance électrique*, qui lui convient parfaitement, parce qu'il fournit le moyen d'établir l'équilibre entre une force électrique et une autre force, dont les plus petites quantités sont susceptibles d'être mesurées avec beaucoup de précision.

Cette dernière force est ce qu'on appelle la *force de torsion*. C'est l'effort que fait un fil qui a été tordu, pour se détordre et revenir à son premier état. Soit *ac* (*fig. 73*) un fil de métal ou de toute autre matière, auquel on ait suspendu, par le milieu, un petit levier *bd*; supposons que ce levier, étant d'abord en repos, commence à tourner autour du point *c*, en décrivant de

(1) *Tentamen Theoriæ Electricit. et Magnet.*, p. 38.

(2) Histoire de l'Académie royale des Sciences, année 1785,

arcs de cercle par ses deux extrémités. Le fil se tordra en même temps d'un nombre de degrés égal à celui qui est compris dans chacun de ces arcs, et si on veut le maintenir dans cet état de torsion, il faudra appliquer à l'une ou à l'autre des extrémités *b*, *d*, du levier, une résistance qui balance l'effort de ce fil, pour revenir au point où, le levier étant immobile, la torsion était nulle. Or, Coulomb a prouvé que, toutes choses égales d'ailleurs, cet effort, qu'il nomme *force de torsion*, est proportionnel à l'angle de torsion : concevons, par exemple, que dans le cas dont nous venons de parler, l'arc décrit par le point *b* ou *d*, ou, ce qui revient au même, la quantité de la torsion soit de  $30^{\text{d}}$ , et désignons par *r* la résistance capable de faire équilibre à cette torsion ; si l'on suppose une torsion double, en vertu d'un arc de  $60^{\text{d}}$ , il faudra, pour qu'il y ait encore équilibre, que la résistance soit égale à  $2r$ .

### Description et Usage de la Balance électrique.

608. L'appareil employé par Coulomb est composé principalement d'une grande cage de verre ACDB (1) (fig. 74), recouverte d'une plaque AC de la même matière. Sur le milieu de cette plaque est soudé un tuyau vertical *febh*, pareillement de verre, et surmonté d'un tuyau de cuivre beaucoup plus court *cbhd*, dans lequel tourne avec frottement une autre portion de tuyau du même métal. Celle-ci porte une plaque *ly*, percée d'un trou en son milieu, pour recevoir une petite tige à laquelle est attachée une aiguille *ol* que l'on fait tourner en même temps que la tige. Le bord de la plaque *ly* est divisé en  $360^{\text{d}}$  dans le sens *lky*. La tige porte à son extrémité une petite pince qui saisit un fil d'argent très délié *pn*, au bas duquel est suspendu un petit cylindre de cuivre *nu* pour le tenir tendu. Ce cylindre est de plus fendu dans sa longueur, et fait aussi l'office d'une pince, qui presse un petit levier *ag*, dont un des bras, savoir, *na*, est fait d'un fil de

---

(1) On peut, à volonté, donner à cette cage une forme cylindrique, telle que la représente la figure, ou une forme cubique.

soie enduit de gomme-laque, et terminé par un petit plan circulaire  $a$  de papier doré. L'autre bras est un fil de cuivre  $gn$ , qui n'a que la longueur nécessaire pour que le levier se tienne dans une position horizontale. C'est dans la torsion imprimée au fil métallique  $pn$  que consiste la force qui sert à mesurer celle des corps électriques dont elle balance l'effet.

La plaque AC est percée en  $m$  d'un trou, à travers lequel passe un second fil de soie, enduit aussi de gomme-laque, et maintenu dans une direction  $mt$ , à peu près verticale, par le moyen d'un bâton  $rs$  de cire d'Espagne. Ce fil de soie porte à son extrémité inférieure  $t$ , une balle  $x$  de cuivre, qui correspond au point zéro d'un cercle gradué  $zq$ , attaché autour de la cage ACDB. On peut toujours, à l'aide du tuyau de cuivre supérieur, que l'on fait tourner doucement dans celui où il est emboîté, disposer les choses de manière que le petit plan circulaire  $a$  touche la balle  $x$ , sans que le fil de suspension éprouve aucune torsion.

609. Les choses étant supposées dans cet état, nous allons décrire l'expérience faite par Coulomb, à l'Académie des Sciences, en 1785. Ce physicien électrisa d'abord le cercle doré  $a$  et la balle  $x$  de cuivre, en les touchant avec un petit conducteur chargé d'électricité vitrée, qu'il introduisit dans la cage par une ouverture qu'on y avait pratiquée à dessein. A l'instant la balle repoussa le petit plan circulaire à la distance de 36 degrés, laquelle s'estimait d'après la position de ce plan, relativement à la circonférence circonscrite à la cage de verre. Par une suite nécessaire, le fil métallique se tordit d'un nombre égal de degrés. Coulomb continua de le tordre d'une quantité égale à 126 degrés, en faisant tourner l'aiguille  $ol$  attachée à la tige qui tenait ce fil suspendu; et l'on concevra aisément que, dans ce cas, le mouvement de rotation de l'aiguille devait être en sens contraire de celui qu'avait fait le cercle doré.

La force de torsion ayant subi alors une augmentation considérable, et l'action répulsive des deux corps n'étant plus suffisante pour la balancer à la même distance, le cercle doré s'est rapproché de la balle jusqu'au point où la force de répulsion se trouva tellement accrue par la diminution de la distance, que

l'équilibre fut rétabli : il n'y avait plus à ce moment que 18 degrés de distance entre les deux corps.

Maintenant il est à remarquer que la torsion imprimée de 126 étant une continuation de la torsion de 36<sup>d</sup> déjà produite par la répulsion des deux corps, si l'on soustrait de cette dernière les 18<sup>d</sup> qui mesurent la quantité dont le fil s'est détordu, tandis que le cercle doré se rapprochait de la balle de cuivre, il restera 18<sup>d</sup>; lesquels, ajoutés aux 116<sup>d</sup> de torsion imprimée, donneront 144<sup>d</sup> pour la torsion totale relative à la seconde position des deux corps. Mais la torsion qui avait lieu dans la position précédente était de 36<sup>d</sup>; d'où il suit que les deux forces répulsives qui faisaient équilibre à ces torsions, étaient, dans le rapport de 4 à 1, le même que celui de 144 à 36. Or les distances correspondantes étaient comme 18 à 36, ou comme 1 est à 2; d'où l'on voit que les forces répulsives suivaient le rapport inverse du carré de la distance.

Cette expérience a été variée de différentes manières, d'après d'autres rapports entre les distances, et tous les résultats se sont trouvés conformes à la même loi.

610. Les petites erreurs inséparables des résultats donnés par une machine dont les mouvements liissent toujours quelque chose à rabattre de la précision géométrique, n'ont pas échappé à l'attention de Coulomb : par exemple, la vraie mesure de la distance entre les deux corps n'est pas précisément l'arc qui les sépare, mais la corde de cet arc. D'une autre part, l'action répulsive de la balle de cuivre, à l'égard du cercle doré, est un peu oblique sur le levier qui porte ce cercle. Mais la construction de la machine a cela d'heureux, que les deux erreurs marchent en sens contraire l'une de l'autre, en sorte qu'elles se compensent sensiblement lorsque les angles ne sont pas considérables.

611. Des expériences analogues ont prouvé que les attractions électriques suivent aussi la raison inverse du carré de la distance; et d'ailleurs, sans avoir ici recours à l'observation, on peut conclure immédiatement la loi des attractions de celle des répulsions, en considérant l'équilibre de deux corps, dont chacun n'a que son fluide naturel. Comme les quantités d'électricité vitrée

qui font partie de la quantité de fluide naturelle sont toujours proportionnelles aux quantités d'électricité résineuse, dès que les répulsions mutuelles des fluides de la même espèce se font en raison inverse du carré de la distance, il est nécessaire que les attractions suivent la même loi, sans quoi il n'y aurait point équilibre.

### Description de quelques instrumens d'un petit volume, susceptibles d'être employés à diverses expériences.

612. Parmi les phénomènes électriques auxquels s'applique la théorie dont nous venons d'exposer les principes, il en est un certain nombre qui, sans avoir rien d'imposant, n'en sont pas moins dignes d'intérêt, et qui, pour se montrer, n'exigent pas l'usage des appareils plus ou moins volumineux, destinés spécialement pour les expériences dont les effets dépendent d'une action très énergique des fluides vitrés et résineux. Nous espérons que ceux surtout qui cultivent la Physique par goût, et pour leur instruction particulière, nous saurons gré de leur avoir indiqué de petits instrumens dont l'invention est récente, que chacun peut aisément se procurer, et qui sont susceptibles d'être employés avec d'autant plus de succès à l'observation des phénomènes dont nous avons parlé, qu'ils empruntent un surcroît de force de leur construction et du choix des matières dont ils sont composés.

613. La pièce principale du premier est une aiguille *gf* (*fig. 75*), d'argent ou de laiton, terminée d'un côté par un globule *f* de même métal, et du côté opposé par un petit barreau ou par une lame étroite *a* de spath d'Islande transparent, que l'on y a fixée avec de la cire ou autrement. Cette aiguille est garnie en son milieu d'une chape *h* de cristal de roche, au moyen de laquelle elle fait l'office d'un levier qui se meut sur la pointe d'un pivot d'acier, dont le support est un bâton *ln* de gomme-laque ou de cire d'Espagne, que l'on a aplani par le bas, après l'avoir fait chauffer de manière qu'il puisse se tenir debout. Le bras de levier *fr* porte un

petit curseur  $d$ , que l'on fait avancer ou reculer à volonté, pour rétablir l'équilibre au besoin.

Lorsqu'on veut mettre cet appareil en action, on prend le levier de la main droite par l'extrémité située vers  $f$ , et on presse le barreau entre deux doigts de la main gauche; puis on remet le levier sur son pivot. Le barreau de spath doit être tellement tourné, que deux de ses faces latérales opposées soient situées verticalement. Nous nommerons cet appareil *électroscope vitré*, du nom de l'espèce d'électricité que la pression y a fait naître.

614. Le second appareil diffère du précédent en ce que le levier  $gf$  s'y trouve remplacé par une simple aiguille  $os$  d'argent ou de cuivre (*fig. 76*), ayant deux globules fixés à ses extrémités, et dont la chape  $hx$  doit être faite du même métal. Pour mettre cet appareil à l'état d'électricité résineuse, ainsi que l'exige sa destination, on frotte, à plusieurs reprises, sur un morceau de laine ou de drap, un bâton de cire d'Espagne, ou un fragment de succin, puis on l'approche jusqu'au contact d'un des globules de l'aiguille, qui est aussitôt fortement repoussée, et là se termine l'opération. L'appareil qui vient d'être décrit portera le nom d'*électroscope résineux*.

615. Le troisième appareil consiste dans une petite aiguille de cuivre ou d'argent  $os$  (*fig. 77*), dont la chape est faite de cristal de roche, et se meut sur la pointe d'un support  $xz$ , de même métal. On peut, à volonté, mettre cette aiguille dans l'état d'électricité vitrée ou résineuse, qu'elle conserve pendant quelque temps, à l'aide de sa chape, qui a la propriété isolante. La concavité de cette chape oppose une nouvelle résistance à l'effort du fluide dont on a chargé l'aiguille, pour s'y introduire et pénétrer jusqu'à la pointe du support, puisqu'en supposant qu'il y fût entré, il n'y resterait pas. De là le nom d'*aiguille isolée* que nous donnons à cet appareil.

616. Veut-on maintenant communiquer à l'aiguille l'électricité résineuse? on touche un des globules qui la termine avec un morceau de cire d'Espagne ou de succin, que l'on a frotté, comme dans le cas du second appareil; mais nous devons ici observer qu'assez souvent un seul contact ne suffit pas pour produire la

répulsion, qui est le signe de la vertu résineuse acquise par l'aiguille, mais qu'il est nécessaire de faire glisser à deux ou trois reprises le succin ou la cire d'Espagne sur la surface du globule. On s'éloigne ensuite à une petite distance de l'un ou l'autre globule, et si l'on voit reculer celui-ci, on est assuré que l'opération a réussi.

617. Supposons au contraire qu'on veuille faire acquérir à l'aiguille l'électricité vitrée. C'est encore au moyen d'un bâton de cire à cacheter, ou d'un morceau de succin électrisé par le frottement, que l'on y parvient, mais en lui assignant un rôle différent. Ayant pris entre deux doigts d'une main un des globules qui terminent l'aiguille, tel que *o*, en maintenant celle-ci dans sa position horizontale, on prend de l'autre main le succin ou la cire d'Espagne, et on le fait avancer vis-à-vis de l'autre globule *s*, jusqu'à la distance de quelques millimètres, de manière que le centre de la partie frottée soit sur la direction prolongée de l'aiguille. On laisse les choses dans cet état pendant environ une minute, puis on retire d'abord les doigts qui étaient en contact avec le globule *o*, et ensuite le succin ou la cire d'Espagne, en mettant un petit intervalle entre les deux mouvemens. L'aiguille alors se trouve électrisée vitreusement. Nous expliquerons avec détail, dans un des articles suivans, ce qui se passe dans cette opération.

618. Le quatrième appareil est si simple, qu'il n'a besoin que d'être indiqué. Il ne diffère du précédent qu'en ce que la chape de l'aiguille est aussi de métal. Son nom, qui se présente comme de lui-même, sera celui d'*aiguille non isolée*.

619. Nous ajouterons un cinquième appareil, qui consiste dans un petit globe métallique *o* (*fig. 78*), de 13 ou 14 millimètres (environ un demi-pouce) de diamètre, fixé à l'extrémité d'un bâton de cire d'Espagne ou de gomme-laque, qui sert à le maintenir isolé, tandis qu'il agit sur un autre corps, en vertu de l'électricité qui lui a été communiquée. Nous le désignerons sous le nom de *globe isolé*. Nous ferons connaître dans la suite les usages de ces divers appareils.

## Tendance du Fluide électrique, pour se répandre à la surface des Corps conducteurs.

620. La loi que nous venons d'exposer conduit à un résultat très remarquable de l'électricité des corps conducteurs. Il consiste en ce que tout le fluide libre qui tient un de ces corps à l'état électrique, est répandu autour de sa surface, sans qu'il en existe aucune portion sensible à l'intérieur. Cette propriété se prouve également par le raisonnement et par l'expérience, et nous allons présenter successivement l'une et l'autre manière de la démontrer, en observant cependant que la preuve géométrique n'est rigoureuse que pour les corps sphériques, et pour quelques autres dont nous parlerons plus bas. Mais comme un solide d'une forme quelconque peut toujours être censé circonscrit à l'un de ceux dont il s'agit, la manière dont l'action principale est modifiée par la matière excédante, ne doit apporter qu'une différence assez légère dans le résultat.

621. La démonstration que nous donnerons de ce résultat, considéré dans les corps sphériques, dépend de deux principes de la philosophie Newtonienne. L'un, que nous avons déjà fait connaître en parlant de l'attraction (41), consiste en ce que si toutes les molécules d'une sphère attirent en raison inverse du carré de la distance (et il en faut dire autant de la force répulsive), la somme des actions qu'elles exercent sur une particule de matière placée hors de la sphère, sera la même que si toutes les molécules agissantes étaient réunies au centre de la même sphère. Telle est, dans ce cas, ainsi que nous l'avons remarqué, la manière dont se combinent les actions qui émanent des différents points de la sphère, qu'il y a compensation entre les actions plus faibles des molécules placées au-delà du centre, par rapport à la particule attirée ou repoussée, et les actions plus fortes des molécules situées en deçà du même centre; en sorte que le centre est le point dans lequel il faudrait que toutes les molécules allasent se réunir, pour exercer une force moyenne qui fût égale à l'ensemble de toutes les forces disséminées dans la masse entière.

Le principe que nous venons d'exposer n'a lieu qu'en vertu de ce que chacune des couches dont on peut concevoir la sphère comme étant composée depuis le centre jusqu'à la surface, attire ou repousse elle-même, comme si toute sa matière était réunie au centre, de manière que la proposition est également vraie d'une simple enveloppe sphérique qui laisserait un vide entre elle et le centre.

622. On suppose, dans l'autre principe, une pareille enveloppe dont les molécules agissent encore suivant la même loi; mais la molécule attirée ou repoussée, au lieu de se trouver en dehors de cette enveloppe, est située dans quelque point de sa cavité, et l'on prouve qu'alors elle est également attirée ou repoussée de tous les côtés, c'est-à-dire, qu'elle demeure immobile dans sa position; c'est ce que Newton a démontré d'une manière extrêmement simple (1), à l'aide de la construction suivante.

Soit *ours* (fig. 79) la projection de l'enveloppe dont il s'agit, et soit *m* la molécule; nous supposons que l'enveloppe agisse par attraction sur cette molécule, parce que la démonstration s'applique d'elle-même à l'hypothèse d'une force répulsive. Menons par *m* deux lignes *bmc*, *gma*, qui interceptent sur l'enveloppe deux arcs infiniment petits *ab*, *cg*, qui pourront être pris pour leurs cordes. Concevons maintenant deux portions semblables et infiniment petites de l'enveloppe, qui aient *ab* et *cg* pour diamètres. Elles seront entre elles comme les carrés de ces diamètres; et puisque les attractions suivent la raison directe des masses et l'inverse du carré des distances, elles seront comme  $\frac{(ab)^2}{(mb)^2} : \frac{(cg)^2}{(mg)^2}$ . Mais à cause des triangles semblables *mab*, *mcg*, on a *ab* : *cg* :: *mb* : *mg*, ou  $(ab)^2 : (cg)^2 :: (mb)^2 : (mg)^2$ . Donc  $\frac{(ab)^2}{(mb)^2} = \frac{(cg)^2}{(mg)^2}$ , c'est-à-dire, que les attractions sont égales. Or, si l'on suppose l'enveloppe divisée en une infinité de petites portions semblables aux précédentes, les attractions de deux d'entre

---

(1) Philosophiæ natur. Princip. mathemat., t. I, sect. XII, prop. LXX. theor. XXX.

elles situées de deux côtés opposés seront aussi égales ; d'où il suit que la molécule  $m$  n'étant pas plus sollicitée vers un côté que vers l'autre, restera immobile.

Telle est donc la combinaison des actions produites par les molécules de l'enveloppe, que si l'on imagine un plan  $tr$  qui passe par la molécule attirée ou repoussée, et qui aille couper l'enveloppe en deux parties nécessairement inégales, les actions de la plus petite partie  $tgr$  étant en général plus rapprochées, et celles de la plus grande  $tar$  s'exerçant à des distances plus considérables, il en résultera une compensation exacte qui tiendra en équilibre la molécule soumise à ces actions contraires.

623. Tout cela étant bien conçu, soit donné un corps conducteur d'une figure sphérique, et rempli de fluide libre de l'une ou de l'autre espèce d'électricité vitrée ou résineuse, et supposons, s'il est possible, qu'il y ait équilibre. Il suit des deux principes précédens, que cet équilibre ne pourra pas subsister un seul instant, et que tout le fluide sera chassé en dehors de la sphère.

Soit  $os$  (fig. 80) cette même sphère; partageons, par la pensée, tout le fluide en une infinité de couches infiniment minces, qui s'enveloppent mutuellement depuis le centre jusqu'à la surface, ainsi que le représente la figure, et considérons l'action de la sphère sur une molécule  $m$ , située à la surface extérieure de l'une quelconque  $den$  de ses couches. La répulsion de tout le fluide renfermé dans cette couche et dans toutes les autres, qui sont plus voisines du centre, sera la même que celle d'une sphère sur une molécule placée à sa surface. Ainsi, en conséquence du premier principe, cette molécule, et toutes celles qui sont à la même distance du centre, tendront à s'en écarter et à sortir de la sphère. Il ne pourrait donc y avoir d'obstacle à cette tendance que de la part des couches comprises entre la molécule  $m$  et la surface extérieure  $os$ . Mais le second principe nous dit que les actions de ces couches s'entre-détruisent, à l'égard d'une molécule placée plus près du centre, et par conséquent l'action qui s'exerce du dedans au dehors subsistera tout entière.

A mesure que le fluide sortira de la sphère, il se formera, vers

le milieu de cette sphère, un vide qui aura lui-même la figure sphérique. Chaque molécule située dans une des couches intermédiaires entre ce vide et la dernière couche sera, par rapport aux couches situées en-dessous, dans le cas d'une molécule placée à la surface d'une sphère creuse, et elle sera, par rapport aux couches situées en dessus, dans le cas d'une molécule située à l'intérieur d'une sphère creuse, d'où l'on voit que l'action des premières couches continuera de la solliciter à fuir le centre, tandis que l'action des autres couches, pour l'en empêcher, sera nulle; et ainsi tout le fluide qui occupait d'abord la sphère, en sortira; et il se répandrait indéfiniment dans l'espace, s'il n'était arrêté par le contact de l'air environnant qui, étant d'une nature isolante, refusera de s'unir avec lui, et le tiendra appliqué et condensé autour de la sphère, sous la forme d'une couche très mince.

Puisque l'équilibre ne pourrait subsister, il ne pourra s'établir, et ainsi il n'y a pour le fluide libre, appartenant à un corps conducteur, d'autre manière de se distribuer qui s'accorde avec la loi de la répulsion des molécules, qu'en se répandant sur la surface de ce corps.

624. L'expérience vient à l'appui de cette théorie. Vous prenez une sphère creuse de métal, à laquelle on ait pratiqué une ouverture circulaire de 2 ou 3 centimètres de largeur, et après l'avoir placée sur un isoloir, vous la mettez en communication avec un conducteur que vous électrisez. Vous pouvez même, pour éviter le soupçon de favoriser davantage la surface intérieure qui ne doit, suivant la théorie, donner aucun signe d'électricité, établir une communication entre cette surface et le conducteur. Ayant ensuite retiré la sphère, toujours portée sur son isoloir, vous appliquez sur un point de sa surface intérieure, un petit cercle fait d'une feuille de métal, et fixé à l'extrémité d'une longue aiguille de gomme-laque (1). Vous présentez ce cercle à un électromètre très sensible qui reste immobile. Vous

---

(1) On peut prendre ce cercle dans une feuille d'étain découpée convenablement.

appliquez le même cercle sur un point de la surface extérieure de la sphère, et ce cercle, présenté de nouveau à l'électromètre, y produit un mouvement très marqué; et si cet électromètre est déjà électrisé, il indique, dans le petit cercle, une électricité de la même espèce que celle du conducteur qui a servi à électriser la sphère.

625. Il faut avoir l'attention d'introduire dans la sphère et d'en retirer le plus promptement possible le cercle métallique, en le faisant passer par le milieu de l'ouverture, pour l'empêcher d'enlever quelque portion de l'électricité qui est accumulée sur les bords de cette ouverture. Il peut même arriver alors que cette électricité en communique une de l'espèce contraire à l'aiguille de gomme-laque qui reste isolée à l'égard de l'ouverture, pendant le petit séjour que le cercle métallique fait dans l'intérieur. Mais on s'assurera que l'électricité dont il s'agit appartient à la gomme-laque, en ce qu'elle continue d'être sensible à l'électromètre, lorsque l'on a touché le cercle métallique avec la main.

626. L'importance du phénomène dont il s'agit ici, nous a engagés à chercher un appareil qui la mit à la portée de tout le monde, par la facilité qu'on aurait de se le procurer. Pour y parvenir on prendra un de ces petits vases de verre *rs* (*fig.* 81) qui sont connus sous le nom de *verres en baril*, et au moyen d'une dissolution de gomme arabique, on le garnira à l'extérieur et à l'intérieur d'étain en feuille. On aura l'attention de bien arrondir les endroits situés aux bords de l'ouverture. On attachera le vase par dessous à la partie supérieure d'un bâton *t* de cire d'Espagne ou de gomme-laque, long de quelques centimètres, et monté sur un petit socle *x* de bois ou de métal.

Lorsqu'on voudra faire l'expérience, on électrisera par le frottement un autre bâton de la même substance résineuse, et, l'ayant introduit dans la cavité du vase, on le maintiendra pendant un petit instant en contact avec la surface intérieure; on répèlera plusieurs fois de suite la même opération, pour renouveler le versement du fluide résineux excédant de la cire ou de la gomme-laque dans le petit vase. On achèvera l'expérience de la même

manière que dans le cas précédent, en se servant de l'aiguille isolée, pour reconnaître l'état du petit cercle métallique (1).

627. Le point de théorie qui vient de nous occuper est devenu, entre les mains du célèbre Laplace, le sujet d'une belle application des formules dont ce savant s'est servi pour déterminer la figure de la terre. Elle consiste en ce que le résultat donné par un corps d'une figure sphérique, est également vrai pour tous les ellipsoïdes de révolution, en sorte que le fluide électrique doit aussi se porter tout entier à la surface de ces solides.

Expériences qui prouvent que le Fluide électrique n'a aucune affinité pour un corps, de quelque nature qu'il soit.

628. Dans tout ce que nous venons de dire, nous avons considéré le corps qui était supposé d'abord rempli de fluide électrique, comme n'exerçant aucune action attractive sur ce fluide soit pour l'empêcher de sortir, soit pour balancer ensuite la résistance que l'air oppose à sa dissipation, lorsqu'il enveloppe le corps. Ceci nous conduit à un nouveau résultat, qui est lié étroitement avec le précédent. Nous avons dit (595) que chaque corps possède par lui-même une certaine quantité de fluide électrique, composée des fluides vitré et résineux. Cette quantité, qui dépend de la nature du corps, reste comme enchaînée dans son intérieur, tant que les deux fluides y sont neutralisés l'un par l'autre. Mais aussitôt qu'ils se dégagent, ils perdent leur tendance pour se maintenir dans le corps, et n'obéissent plus qu'à leur force répulsive mutuelle. Viennent-ils ensuite à se réunir de nouveau? Le fluide composé, qui résulte de leur assemblage, rentre dans le corps et y demeure fixé comme auparavant. De même, si un corps reçoit d'ailleurs une portion additionnelle de

---

(1) Si l'on a une machine électrique à sa disposition, on chargera une bontelle de Leyde, dont on plongera ensuite le bouton dans l'intérieur du petit vase, en même temps qu'on la tiendra à la main par la garniture extérieure. Le fluide que l'on introduira dans le vase sera alors celui de l'électricité.

fluide vitré ou résineux, celui-ci se répand à la surface du corps sans pénétrer à l'intérieur, et ne tient même à cette surface que par l'intermède de l'air environnant qui refuse de le transmettre. Nous citerons, en parlant de l'électricité dans le vide, une expérience qui confirme cette théorie.

629. Puisque le fluide électrique libre d'un corps ne paraît avoir aucune affinité pour lui, il sera également indifférent à l'égard d'un corps quelconque; en sorte que si l'on met un corps conducteur électrisé en contact avec un autre qui soit dans l'état naturel, la partie qu'il lui communiquera de son fluide libre ne dépendra que de la forme des deux corps, et nullement de leur nature. C'est ce que Coulomb a prouvé d'une manière directe, à l'aide de l'expérience suivante (1). On électrise la balle de cuivre  $x$  (fig. 74), placée, comme nous l'avons dit, dans la cage de verre ACDB, et après qu'elle a repoussé le cercle doré  $a$ , on augmente la torsion d'un certain nombre de degrés, et l'on détermine la torsion totale, et la distance qui en résulte entre la balle  $x$  et le cercle  $a$ . On fait toucher à l'instant la balle de cuivre par une balle de même diamètre et d'une matière différente, par exemple, de moelle de sureau. Aussitôt qu'on a retiré celle-ci, le cercle doré vient se placer à une moindre distance de la balle de cuivre, qui a perdu une partie de son fluide et en même temps de sa force répulsive. On affaiblit la torsion jusqu'à ce que le cercle soit ramené à la même distance, et l'on trouve que, dans ce cas, la torsion n'est plus que la moitié de ce qu'elle était la première fois. Donc la force répulsive est elle-même diminuée de moitié. Or les actions électriques suivent la raison directe des masses, lesquelles sont ici les quantités de fluide, et la raison inverse du carré des distances; et puisque les distances sont égales, les actions sont simplement comme les quantités de fluide; d'où il résulte que, dans le second cas, la balle de cuivre n'avait plus que la moitié de son fluide, en sorte que la quantité primitive s'était partagée également entre cette balle et celle de moelle de sureau, à cause de l'égalité et de la similitude des deux corps.

---

(1) Histoire de l'Académie royale des Sciences, année 1786, p. 67 et suiv.

630. Ainsi dans la communication de l'électricité, les surfaces des corps ne font autre chose que servir en quelque sorte de réceptacle au fluide électrique, qui semble y être dans un état passif, et n'y reste qu'autant qu'il y est maintenu par la résistance de l'air environnant. Mais quoique la nature des corps n'entre pour rien dans le rapport suivant lequel le fluide électrique se distribue entre eux, elle influe sur le temps qu'exige le partage, en sorte que les facultés conductrices varient selon les différentes qualités des substances. Les métaux, par exemple, le transmettent beaucoup plus rapidement que le bois et le papier; et à cet égard, comme à plusieurs autres, la manière d'agir du fluide électrique se rapproche de celle du calorique. Si donc l'on met en contact un corps conducteur électrisé, avec un second corps pareillement conducteur, qui soit à l'état naturel, il y aura, dans la transmission du fluide de l'un à l'autre, un terme, passé lequel le premier cessera de communiquer, et l'autre de recevoir; et ce terme sera plus ou moins éloigné, suivant que le corps qui reçoit sera plus ou moins susceptible de conduire le fluide. Mais la différence ne portera que sur la durée de la communication, qui se fera toujours sans aucune préférence pour un corps plutôt que pour l'autre, quant à la quantité de fluide communiquée ou reçue.

De la manière dont le Fluide électrique se distribue, soit sur la surface d'un seul corps, soit entre différens corps en contact les uns avec les autres.

631. Coulomb est le premier qui ait fait des recherches suivies sur le sujet que nous venons d'énoncer; il a opéré tantôt sur un seul corps, tantôt sur plusieurs corps en contact les uns avec les autres, il a fait varier, dans ce dernier cas, le rapport de leurs volumes; il a employé tour à tour des sphères et des cylindres, et ce sujet qui jusqu'alors était resté presque entièrement stérile pour le progrès de la science, est devenu ainsi entre ses mains une branche de connaissances féconde en résultats aussi remarquables qu'ils étaient nouveaux, il les a élevés à un degré de précision jusqu'alors inconnu, en se servant, pour les obtenir, de

l'appareil inventé par lui-même, et dont l'extrême sensibilité répondait à la délicatesse des expériences. C'était cette même balance de torsion, dont l'utilité s'était déjà annoncée d'une manière si éclatante, dans la détermination de la loi à laquelle sont soumises les actions électriques.

632. Mais ces résultats si intéressans avaient été amenés par des observations particulières, et il restait un grand pas à faire pour arriver à une théorie qui en fit apercevoir la dépendance et le lien commun. Il était réservé à M. Poisson d'atteindre ce but si éloigné, de généraliser les résultats dont nous venons de parler, et de les représenter avec une précision rigoureuse, à l'aide de ces savantes méthodes d'analyse dont il n'a été donné qu'à un petit nombre de géomètres de faire des applications heureuses à des sujets qui semblaient être inaccessibles pour elles (1).

Parmi les nombreux résultats qui se déduisent de ses formules et dont M. Coulomb avait déterminé une partie, au moyen de l'observation, nous nous bornerons à en exposer un petit nombre choisis parmi les plus remarquables, et dont la marche étant plus simple se laisse suivre par la pensée.

633. Nous avons déjà vu que tout le fluide électrique que l'on suppose introduit dans l'intérieur d'un corps dont la forme est celle d'une sphère ou d'un ellipsoïde de révolution, en sort à l'instant pour se répandre autour de la surface de ce corps où il est maintenu par l'air environnant. Il est évident que la manière dont il s'y serait distribué dans ce cas, ne diffère point de celle qui aurait eu lieu si l'on avait fourni immédiatement à la surface du corps la même quantité de fluide.

634. La distribution dont il s'agit varie avec la forme du corps, et elle doit toujours être telle, que toutes les actions électriques, qui déterminent l'état de ce corps, soient en équilibre. Or la condition de cet équilibre est double et dépend à la fois du fluide qui compose la couche enveloppante et du fluide naturel qui pré-existait dans le corps; c'est-à-dire qu'il ne suffit pas que dans la couche considérée séparément, les actions mutuelles des molé-

---

(1) Mémoires de la Classe des Sciences mathématiques et physiques de l'Institut, année 1811, 1<sup>re</sup> partie, p. 101 suiv.

cules électriques s'entre-détruisent , il faut encore que ces molécules n'exercent aucune attraction ni répulsion , sur un assemblage de deux molécules , l'une de fluide vitré , l'autre de fluide résineux , pris partout où l'on voudra dans la quantité de fluide naturel : car si cette condition n'était pas remplie , l'action de la couche enveloppante décomposerait une partie du fluide naturel , ce qui changerait l'état électrique du corps.

635. Supposons maintenant que le corps , en partant de la figure sphérique , se rétrécisse graduellement dans le sens d'un de ses diamètres , en même temps qu'il s'allonge dans le sens d'un diamètre perpendiculaire au précédent , de manière qu'il résulte du concours de ces deux variations , une suite d'ellipsoïdes dans lesquels le rapport entre les axes , qui répondront aux deux diamètres dont nous venons de parler , aille toujours en augmentant.

636. Pour concevoir d'abord en général la manière dont la distribution du fluide variera dans la couche qui enveloppera ces ellipsoïdes , à mesure qu'ils seront plus allongés , nous partirons de la forme sphérique , prise comme terme de comparaison. Un des principes dont nous nous sommes servis pour démontrer que le fluide électrique dont on aurait rempli un corps de cette forme en sortirait à l'instant , consiste en ce que les actions des molécules d'une enveloppe sphérique , sur une molécule située dans un point quelconque de sa cavité , se détruisent mutuellement , dans l'hypothèse où ces actions sont soumises à la loi de la raison inverse du carré de la distance. Or , si nous substituons à l'enveloppe sphérique dont il s'agit , une couche de fluide répandu autour de la surface de la sphère que nous considérons , et à la molécule de fluide libre située dans un point de l'intérieur de l'enveloppe , que nous désignerons par  $a$  , un assemblage de deux molécules , l'une vitrée l'autre résineuse faisant partie du fluide naturel de la même sphère , il est aisé de voir que l'action de la couche sera pareillement nulle sur cet assemblage , ainsi que sur toutes les autres molécules comprises dans le fluide naturel.

A mesure que la sphère passe graduellement à la forme d'un sphéroïde toujours plus allongé , une partie des molécules de l'enveloppe se rapprochent du point  $a$  , en vertu du rétrécisse-

ment, tandis qu'une autre partie s'écarte du même point, par une suite de l'allongement, d'où il résulte que l'action des premières sur le point  $a$  va en augmentant en même temps que l'action des dernières diminue. Il faudra donc pour que la compensation exigée par la condition de l'équilibre s'établisse, que le fluide compris dans la partie de l'enveloppe voisine de l'extrémité du grand axe de l'ellipsoïde, soit plus condensé que celui de la partie située dans le voisinage du plus petit axe, en sorte que le rapport entre les deux densités s'accroîtra en même temps que celui qui existe entre les axes.

637. Venons maintenant à ce que la théorie pouvait seule nous apprendre. La couche de fluide qui enveloppe la surface du corps et qui tend à s'échapper en vertu de la répulsion mutuelle de ses molécules, n'y est maintenue que par la réaction de l'air environnant, qui se moule en quelque sorte sur la surface de la couche en contact avec lui. Cette couche ayant des épaisseurs variables sur les différens points du sphéroïde, la pression qu'elle exerce contre l'air environnant, subit elle-même des variations. Or la théorie fait voir que cette pression, prise à un endroit quelconque de la surface du sphéroïde, est en raison composée de la force répulsive des molécules électriques et de l'épaisseur de la couche au même endroit, et parce que chacun de ces deux élémens est proportionnel à l'autre, il en résulte que la pression contre l'air est partout proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche, ou de la quantité d'électricité dont elle dépend. Mais la pression dont il s'agit étant plus grande aux extrémités du grand axe que partout ailleurs, et son intensité allant toujours en croissant à mesure que le sphéroïde est plus allongé, il y aura un terme où elle l'emportera sur la résistance de l'air, et où les molécules qui l'exercent subiront un effet que l'on peut comparer à celui d'une explosion, en sorte qu'elles s'échapperont les unes après les autres, et pénétreront dans le fluide environnant, jusqu'à ce que la force répulsive de celles qui resteront fasse équilibre à la réaction de ce fluide.

638. Les actions mutuelles de deux corps électrisés ou davantage, que l'on présente les uns aux autres, avaient fourni à

M. Coulomb, ainsi que nous l'avons déjà dit, les sujets d'une multitude d'expériences variées. Elles ont offert également à M. Poisson un champ ouvert pour étendre et multiplier les applications du calcul analytique. Ce savant géomètre a été conduit à comparer les résultats obtenus de part et d'autre, dans le cas où les recherches qui les ont amenées ont concouru vers un même but, et l'on juge aisément combien cette comparaison a dû l'intéresser, en lui montrant dans ceux qui avaient eu la priorité, une vérification anticipée d'une théorie qui ne s'est présentée qu'après un intervalle de vingt-cinq ans.

639. Le même savant, dans la solution des problèmes relatifs au nouveau point de vue sous lequel il envisageait ici son sujet, était parti d'un principe analogue à celui dont il avait fait usage, pour déterminer la manière dont était distribué le fluide électrique à la surface d'un seul corps. Il consiste en ce que 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 qu'exercent les couches électriques qui les recouvrent sur un point pris quelque part que ce soit dans l'intérieur de l'un de ces corps, soit égale à zéro.

Nous nous bornerons encore au cas le plus simple, qui est celui de deux sphères soumises à l'influence l'une de l'autre. Nous commencerons par des considérations générales faites pour disposer l'esprit à mieux comprendre les résultats dérivés soit du calcul analytique, soit de l'expérience.

640. Le raisonnement suffit pour faire concevoir qu'à mesure que la différence s'accroît entre les diamètres des deux sphères, le rapport entre les quantités de fluide comprises dans leurs couches enveloppantes, doit aller lui-même en augmentant. Car supposons les sphères en contact l'une avec l'autre, il faudra, pour que l'équilibre ait lieu entre les deux quantités de fluide, que la force répulsive exercée par les molécules de chacune sur celles de l'autre, balance l'effort que font ces dernières, en vertu de leur répulsion mutuelle, pour s'écarter les unes des autres, en se portant vers le point de contact. Cela posé,

concevons que la plus petite des deux sphères diminue tout à coup de volume. Les molécules de la couche qui l'enveloppe, se rapprocheront de celles qui leur correspondent dans l'autre couche, et leur répulsion mutuelle se trouvant augmentée, les refoulera vers les points opposés à celui du contact. Mais une autre cause, savoir, la diminution de la surface de la petite sphère, forcera les molécules de sa couche enveloppante de se resserrer encore davantage, en sorte que la force répulsive des molécules de l'autre couche ne suffira plus pour balancer le surcroît d'énergie ajouté à leur tendance pour s'écarter les unes des autres. Il faudra donc, pour que l'équilibre se trouve rétabli, que la quantité de fluide dont la même couche est composée, ait subi elle-même une augmentation. A mesure que la petite sphère continuera de diminuer en volume, on prouvera, par un raisonnement semblable, la nécessité d'un accroissement dans la quantité de fluide répandue sur l'autre sphère, d'où il suit que le rapport entre les deux quantités augmente en même temps que celui qui existe entre les surfaces des deux sphères.

641. Nous avons maintenant à exposer les résultats auxquels les deux savans sont arrivés par des routes différentes, en comparant les états électriques de ces sphères. On conçoit que la distribution du fluide électrique ne peut pas être uniforme sur la surface de chacune d'elles; M. Poisson a donné des formules à l'aide desquelles on peut calculer l'épaisseur de la couche électrique sur chaque point de l'une ou de l'autre. Il a aussi déterminé comparativement la manière dont le fluide est distribué sur les surfaces dont il s'agit. Ce que cette comparaison offre surtout de remarquable, consiste dans ce qui se passe au contact des deux sphères et vers les points opposés. La théorie démontre le résultat que l'expérience avait déjà offert à M. Coulomb, savoir, que l'électricité est nulle à l'endroit du premier point, et que dans le voisinage des deux autres, l'épaisseur de la couche électrique, qui recouvre la surface de la petite sphère, est plus considérable que celle qui lui correspond sur celle de la grande sphère. Le rapport entre ces deux épaisseurs augmente à mesure que le rapport de la petite sphère diminue. Mais cet accroissement n'a lieu que

jusqu'à une certaine limite, où il est représenté à peu près par celui du nombre 4,2 à l'unité. M. Coulomb avait conclu de ses expériences, qu'il était égal à 4, plus une fraction qu'il n'avait pas assignée.

642. M. Poisson s'est occupé aussi de la détermination du rapport des densités moyennes des fluides répandus sur les surfaces des deux sphères. Ces dernières densités sont celles qui auraient lieu dans le cas où les fluides seraient distribués uniformément sur les surfaces dont il s'agit. Or, comme chacune des deux sphères, si on la séparait de l'autre, emporterait avec elle tout le fluide dont elle était couverte, il suffit, pour faire naître la distribution uniforme dont nous venons de parler, d'éloigner assez les sphères l'une de l'autre, pour les soustraire à leur influence mutuelle. M. Poisson s'est servi de ce moyen pour remplir son objet, et il a trouvé que le rapport des densités était toujours moindre que celui des surfaces, et qu'à mesure que le rayon de la petite sphère différait davantage de celui de la grande, le même rapport augmentait suivant une progression toujours plus lente, dont la limite était représentée par la fraction  $\frac{5}{3}$ . M. Coulomb, qui n'avait pu déterminer exactement le rapport, avait présumé qu'il approchait d'être égal au nombre 2, qui est plus petit d'environ  $\frac{1}{3}$ , que celui auquel M. Poisson a été conduit par le calcul analytique.

643. Lorsqu'au lieu d'écarter tout à coup les deux sphères l'une de l'autre, jusqu'à la distance où leur action mutuelle s'évanouit, on les fait mouvoir peu à peu en sens contraire, dans l'intervalle situé en deçà de cette distance, l'état de la plus petite subit des variations d'autant plus remarquables, que le phénomène qui en résulte se distingue par des caractères particuliers de tous ceux que nous avons décrits jusqu'ici.

Nous avons dit que l'électricité était nulle au point de contact des deux sphères. Supposons maintenant qu'elles s'éloignent peu à peu l'une de l'autre; il y aura dans ce mouvement, un terme où la partie de la petite sphère, située à l'endroit par lequel le contact avait lieu, aura acquis l'électricité résineuse; à un terme plus reculé, l'électricité deviendra nulle, et la même partie ren-

trera dans l'état naturel; plus loin encore, l'électricité reparaitra; mais ce sera l'électricité vitrée.

644. Dans l'explication que nous allons essayer de donner de ces effets, nous ne considérerons d'abord que ceux qui répondent aux deux termes extrêmes, et nous ferons abstraction pour le moment du terme intermédiaire. A peine les deux sphères se sont-elles quittées, que la répulsion mutuelle des couches qui les recouvrent, se trouvant diminuée, le mouvement que cette diminution occasionne dans les molécules électriques qui composent ces couches, change l'état électrique de chaque sphère. Dès lors les actions que les mêmes molécules exerçaient sur les points situés dans l'intérieur des sphères, ne se détruisent plus mutuellement, en sorte que leur résultante qui était zéro est devenue une quantité positive. Or, d'après le changement qui a lieu dans la partie de la petite sphère dont nous avons parlé, on doit concevoir que c'est l'attraction du fluide vitré répandu autour de la grande sphère, sur le fluide résineux, provenant du fluide naturel de la petite sphère qui détermine le nouvel état de celle-ci, à une certaine distance de l'autre sphère. A mesure qu'elle continue ensuite son mouvement, la couche de fluide qui l'enveloppe étant repoussée moins fortement par celle de la grande sphère, s'étend vers la partie déjà citée, en vertu de sa tendance vers une distribution uniforme, et elle finit par la recouvrir ou par la toucher de si près, qu'elle lui transmet sa propriété électrique dont l'action est vitrée.

Maintenant, entre le terme auquel répond l'électricité résineuse acquise par la petite sphère, à l'endroit où le contact avait eu lieu, et celui auquel répond l'électricité vitrée qui a succédé à la précédente, et qui est l'extrême opposé, il y a un point neutre où l'action devient nulle, et c'est à ce point qu'est arrivée la petite sphère, lorsqu'elle se retrouve dans l'état naturel. Ce point est l'analogie du zéro qui se rencontre dans tous les passages des quantités négatives aux quantités positives.

645. Dans une expérience d'un autre genre, Coulomb a disposé sur une même ligne, un certain nombre de globes recouverts d'une feuille de métal, et en contact les uns avec les autres;

et il a cherché la loi suivant laquelle le fluide se distribuait entre ces différens globes, pour que leurs forces fussent en équilibre (1). Il a employé ainsi jusqu'à 24 globes, tous de même diamètre. On conçoit bien d'abord, en supposant tous ces globes électrisés, qu'il y a égalité entre les tensions ou densités électriques des deux globes extrêmes, et que de même, les densités des deux globes également éloignés des extrêmes, sont égales entre elles. On voit aussi que la densité de chaque globe extrême doit être plus considérable que celle des suivans, puisqu'il fait seul équilibre à tous les autres, tandis que le second, par exemple, est aidé par le premier, pour balancer l'action de tous ceux qui sont derrière lui. Or, telle est la loi suivant laquelle la densité diminue, en partant des globes extrêmes, que ce décroissement est très rapide, relativement aux globes qui avoisinent les extrêmes, comme le deuxième et le troisième de chaque côté, et qu'ensuite la densité diminue toujours plus lentement, jusqu'au milieu où elle est nulle. Cette inégalité entre les forces des différens globes est une suite de la raison inverse du carré de la distance, qui détermine, par rapport à chaque globe, la quantité de fluide nécessaire pour que l'action de ce globe soit en équilibre avec celle de tous les autres.

646. Coulomb a déduit des résultats précédens, la manière dont le fluide électrique est distribué sur différens points de la surface d'un cylindre. Elle varie depuis les extrémités jusqu'au milieu, à peu près dans le même rapport que sur une file de globes égaux, et cette ressemblance provient de ce que le fluide est disposé autour des différens globes sous la forme de zones, entre les points de contact, depuis lesquels la densité est presque nulle jusqu'à une certaine distance, à cause de la grande force répulsive qui agit en ces endroits; mais sur le premier et le dernier globe, le fluide enveloppe l'hémisphère opposé au contact avec le globe voisin, ce qui achève de rapprocher la distribution du fluide de celle qui a lieu sur le cylindre, la surface de ce corps pouvant être considérée comme composée d'une suite de bandes annulaires comprises entre deux hémisphères.

---

(1) Histoire de l'Académie royale des Sciences, année 1783, p. 617 et suiv.

A mesure que l'on emploie des cylindres plus longs et plus minces, la densité électrique des points situés vers les extrémités s'accroît par rapport à celle des points intermédiaires; et si l'on suppose un cylindre très délié, qui soit fixé sur un gros globe électrisé, dont l'action favorisera encore l'augmentation de densité qui doit avoir lieu à l'extrémité opposée, parce qu'il faut que la force du fluide situé à cette extrémité fasse équilibre à celle de tout le reste du fluide répandu, tant sur le cylindre que sur le globe, la densité deviendra si considérable qu'elle l'emportera sur la résistance que l'air oppose à la transmission de l'électricité, et c'est par là que Coulomb explique le pouvoir des corps terminés en pointe, pour lancer rapidement le fluide électrique. L'explication que nous adopterons, parce qu'elle est plus susceptible d'être développée par le raisonnement, n'est qu'une manière différente de concevoir la même combinaison d'actions.

*De la Loi suivant laquelle les Corps isolans perdent peu à peu leur Électricité.*

647. Il en est tout autrement des corps isolans que des corps conducteurs. Dès que le fluide naturel de ces derniers vient à se décomposer par l'action des causes dont nous parlerons bientôt, ses deux principes se répandent aussitôt à l'extérieur. Nous devons concevoir, au contraire, que quand le corps est isolant, les deux principes composans restent dans son intérieur, même après leur dégagement, et se distribuent, par des mouvemens contraires, dans deux parties opposées de ce corps. Ces mouvemens ne s'exécutent qu'avec une certaine difficulté, qui provient de la résistance des molécules propres du corps; ensorte que quand la cause qui avait décomposé le fluide cesse d'agir, la réunion des deux principes, qui ramène le corps à l'état naturel, ne se fait de même qu'avec une certaine lenteur. On a comparé au frottement cette résistance qu'un corps isolant oppose au mouvement du fluide dans son intérieur, et on lui a donné le nom de *force coercitive*. Les effets de cette force se remarquent surtout dans les corps qui s'électrisent par la chaleur ainsi que nous le verrons dans la suite.

Au reste, ce que nous venons de dire suppose que la substance du corps jouit de toute sa pureté. Mais le plus souvent il se trouve des molécules conductrices interposées entre les molécules isolantes du corps, en sorte que les effets sont toujours un peu compliqués de ceux des corps de l'une et de l'autre espèce.

648. Ceci nous conduit à exposer d'autres recherches de Coulomb, relatives à un objet très intéressant pour ceux qui ayant des expériences d'électricité à faire, desirent y mettre la précision convenable. Les expériences de Physique en général, pour devenir comparables, doivent être ramenées au point où toutes les circonstances seraient les mêmes. Si la température influe, par exemple, sur les résultats, on fait disparaître cette influence, soit en maintenant un degré constant de chaud ou de froid, soit en tenant compte de la variation; de même, lorsqu'on emploie un corps électrique successivement à différents résultats que l'on veut comparer entre eux, l'état de ce corps doit être censé permanent, et comme il ne l'est jamais en réalité, parce que dans l'intervalle d'une opération à l'autre, le corps perd toujours une certaine quantité de son électricité, il fallait chercher des moyens pour évaluer cette perte, et y avoir égard dans les résultats.

Or cette perte provient de deux causes, l'une est le contact de l'air environnant, qui est toujours plus ou moins chargé de molécules humides; l'autre est due aux supports isolans qui soutiennent le corps électrisé, et dont les mieux choisis n'isolent jamais parfaitement. Coulomb est parvenu à démêler les actions de ces deux causes, qui s'exercent simultanément, et à rendre l'expérience indépendante de leurs variations (1).

649. A l'égard de la cause qui provient de l'air, il a trouvé; en prenant d'une part la force électrique perdue par le corps dans un temps donné, tel que dix minutes, et de l'autre la force moyenne qui résulte de la différence entre les forces au commencement et à la fin de l'expérience, divisée par le nombre des minutes, que le rapport entre ces deux forces est un rapport

---

(1) Histoire de l'Académie royale des Sciences, année 1755, p. 612.

constant pour un même état de l'air, ce qui met à portée de comparer entre eux divers résultats, d'après les forces moyennes qui répondent aux différentes durées des expériences.

650. Restait à considérer la perte d'électricité qui se fait le long des supports. Les expériences de Coulomb relatives à cet objet, lui ont fait connaître que quand la densité électrique du corps est considérable, le décroissement produit à la fois par l'air et par les supports, suit un progrès beaucoup plus rapide que celui qui est dû au seul contact de l'air; mais depuis l'instant où la densité se trouve très affaiblie, l'influence du support devient sensiblement nulle; en sorte qu'en employant dès le commencement un corps dont la densité électrique est modérée, on peut se contenter d'avoir égard à la perte qui se fait par le contact de l'air.

651. Mais cette espèce de résistance du support à la transmission du fluide électrique, ne peut être regardée comme absolue que pendant un certain temps qui suffit, pour l'ordinaire, aux expériences. Dans la réalité, il n'est point de support tellement isolant, que sa substance ne soit entremêlée de particules conductrices, et c'est en vertu de la lenteur avec laquelle le fluide franchit les intervalles entre ces dernières molécules, que la densité électrique du corps qui repose sur le support n'éprouve que des pertes insensibles dans un espace de temps plus ou moins limité. Or, en donnant plus de longueur au support, on augmente le nombre des intervalles que le fluide est obligé de parcourir avant d'arriver aux corps environnans. De là il suit qu'étant donnée la longueur du support qui isole, aussi complètement qu'il soit nécessaire, un corps dont la densité est pareillement donnée, si l'on veut employer un autre corps chargé d'un fluide plus dense, on pourra obtenir un isolement aussi parfait que le premier, en prenant un plus long support. Coulomb a trouvé que l'état de l'air étant le même, les longueurs des supports devaient être comme les carrés des densités électriques. Ainsi, pour un second corps d'une densité double de celle du premier, il faut un support quatre fois plus long que celui qui isolait ce premier corps.

*Sous-division des Corps naturels déduite des différens degrés de la force coercitive.*

652. Le point de vue sous lequel nous nous proposons de considérer ici la force coercitive est très distingué de celui auquel se rapportent les recherches entreprises par M. Coulomb, pour rendre appréciables les effets des causes qui tendent à faire varier les résultats de plusieurs expériences successives dirigées vers un même but. C'est après avoir comparé les uns avec les autres, les corps naturels, qui jouissent plus ou moins de la propriété isolante, que nous avons cru pouvoir les sous-diviser en trois classes, d'après ce qui arrive, lorsqu'après les avoir frottés, on les met en contact avec des corps conducteurs. Nous avons eu égard à deux actions de ces derniers corps, savoir, celle qui a lieu dans le premier instant du contact, et celle qui s'étend à tous les instans suivans. A la rigueur, la force coercitive varie d'un corps à l'autre, par une gradation non interrompue. Mais en suivant de près cette gradation, nous nous sommes aperçus que ses différens termes tendaient vers certaines limites, d'où nous pouvions déduire des caractères distinctifs entre les corps des trois classes que nous allons indiquer successivement.

653. La première comprendra les corps qui possèdent à un haut degré ce que nous appelons la *faculté conservatrice de l'électricité*, c'est-à-dire qui, dans le premier instant, ne cèdent à un corps conducteur avec lequel on les met en contact, qu'une quantité ou légère ou même insensible de leur fluide, et ne le perdent ensuite qu'au bout d'un temps considérable, lors même qu'on les laisse en communication avec les corps environnans. Tels sont le spath d'Islande et la topaze incolore.

654. Nous rangeons dans la seconde classe les corps qui possèdent à un degré moyen la faculté conservatrice. Ce sont ceux qui cèdent, dans le cas dont nous avons parlé, une quantité notable de leur fluide, que nous appelons leur *fluide excédant*, et ne perdent le reste que lentement, mais en moins de temps que ceux de la première classe, toujours dans l'hypothèse où ils seraient

en communication avec les corps environnans. Tels sont le succin et la cire d'Espagne. Les corps qui appartiennent à la troisième classe sont ceux qui possèdent à un faible degré la faculté conservatrice, ou qui cèdent, dès le premier contact, une partie plus ou moins considérable de leur fluide, et ne conservent le reste que pendant peu de temps. Tels sont le cristal de roche et le verre.

655. Il est facile de vérifier, à l'aide de l'expérience, les effets qui ont lieu dans le premier instant. On peut employer, dans cette vue, l'électroscope résineux que représente la figure 76, en laissant dans l'état naturel l'aiguille métallique qui en fait partie. On prend une topaze incolore entre les doigts; on la frotte et l'on touche à plusieurs reprises avec la partie de la surface qui a subi le frottement, un des globules qui terminent l'aiguille, après quoi on la fait mouvoir jusqu'à une distance sensible du même globule, qui est aussitôt attiré, comme si la topaze lui était présentée pour la première fois; d'où il faut conclure qu'elle n'a cédé à l'aiguille aucune quantité appréciable de son fluide, et ce qui le prouve encore mieux, c'est que si l'on approche un doigt de l'aiguille, elle ne fera aucun mouvement pour se porter vers lui, ou si elle en fait un, il sera presque imperceptible (1).

Maintenant, si l'on substitue à la topaze un bâton de cire d'Espagne, en opérant de la même manière, la petite aiguille sera fortement repoussée, parce que le bâton de cire lui aura cédé une quantité notable de fluide excédant, et c'est même par ce moyen que l'on fait passer l'aiguille de l'état naturel à celui d'électricité résineuse, ainsi que nous l'avons dit plus haut. Le même effet aura lieu avec un morceau de cristal de roche, ou avec une lame de verre.

656. Nous avons maintenant à considérer ce qui se passe dans les instans suivans, jusqu'à ce que les corps aient entièrement perdu leur vertu électrique. Pendant cet intervalle, nous les laissons en contact avec un corps métallique, qui est lui-même en communication avec les corps environnans, ce qui nous donne

---

(1) Cette expérience ne réussit complètement que par un temps sec.

une mesure appréciable, jusqu'à un certain point, de la résistance que les corps soumis à l'expérience opposent à l'effort que font leurs molécules pour s'échapper à l'aide de leur force répulsive mutuelle. Nous nous bornerons à deux exemples relatifs à la première classe, dont le premier nous a été offert par une grande lame détachée, à l'aide de la division mécanique, d'un cristal de topaze incolore du Brésil, dont chaque dimension était à peu près de 35 millimètres (environ 15 lignes  $\frac{1}{2}$ ). Nous l'avions appliquée, par la surface qui avait été frottée, sur une lame de cuivre, d'où pendait une chaîne de laiton, qui était en communication avec les corps environnans. Ce n'est qu'après un intervalle d'environ 145 heures, qu'elle a cessé de donner des signes d'électricité. L'expérience a été faite au milieu d'un air sec. Nous avons placé dans des circonstances semblables, des rhomboïdes de spath d'Islande, et leur vertu ne s'est éteinte qu'au bout de plusieurs jours. L'un d'eux l'a conservée pendant onze jours, par un temps favorable.

657. La résistance des mêmes rhomboïdes à l'action d'un air humide, n'est pas moins remarquable. Le 20 décembre de l'année 1819, jour où il régnait une humidité dont il y a peu d'exemples, l'électroscope vitré que nous avons décrit plus haut, ayant été porté sur un escalier où tout ce qu'on voyait portait l'empreinte d'un air surchargé de vapeur aqueuse; le petit barreau de spath, qui en est la pièce principale, devint très sensiblement électrique à l'aide de la pression, et ce ne fut qu'au bout de deux heures que ses effets disparurent.

Quelques jours après, M. de Monteiro, savant portugais, également distingué par la diversité et par l'étendue de ses connaissances, dans un moment où je jouissais de l'avantage de le posséder chez moi, me suggéra l'idée de plonger dans l'eau un rhomboïde du même spath, après l'avoir électrisé par le frottement. L'immersion ne lui fit perdre qu'une petite partie de sa vertu, ainsi qu'il fut facile d'en juger, lorsqu'après l'avoir retiré, nous le vîmes exercer encore une attraction très sensible sur une aiguille non isolée dont on l'approcha. Nous remarquâmes que sa surface était restée sèche pendant l'immersion, excepté que la partie qui

était sortie de l'eau la dernière en avait enlevé une goutte qui y restait suspendue. Nous avons répété plusieurs fois cette expérience avec le même succès, en employant la pression, pour électriser le rhomboïde, avant de le plonger dans l'eau. C'est par une suite de cette espèce d'indifférence pour ce liquide, que le spath, quand il est environné d'un air humide, dont les appareils ordinaires éprouvent souvent, dès le premier instant, l'influence nuisible, la vapeur n'agit sur lui qu'avec beaucoup de lenteur, et ne parvient à lui enlever sa vertu qu'en la minant, pour ainsi dire, insensiblement. Nous avons éprouvé d'autres substances du nombre de celles qui possèdent aussi, quoiqu'à un moindre degré, la propriété d'acquérir la vertu électrique par la pression, telles que la chaux fluatée et l'eucrase, et nous avons observé que l'eau dans laquelle on les avait plongées, n'avait eu également aucune tendance pour adhérer à leur surface, en sorte qu'elles continuaient d'attirer une aiguille non isolée.

658. Nous passons à la seconde classe, qui renferme plusieurs substances, telles que la gomme-laque et la cire d'Espagne, qui peuvent être employées comme supports dans la construction de l'électroscope résineux. En étudiant leurs effets, nous avons eu la satisfaction de trouver qu'ils faisaient reparaitre, dans cet appareil, mais par une cause différente, l'avantage qu'a l'électroscope vitré, d'assurer le succès des expériences, par l'énergie de sa faculté conservatrice. La cause dont il s'agit dérive du caractère qui distingue les corps de la seconde classe, et qui consiste, comme nous l'avons dit, en ce qu'après avoir été frottés, ils cèdent aux corps conducteurs en contact avec eux, une portion notable de leur fluide, et ne perdent le reste que lentement. Il en résulte que la cire d'Espagne, qui est la matière ordinaire dont nous faisons usage de deux manières pour nos électroscopes négatifs, ainsi que nous le dirons dans l'instant, jouit sensiblement en partie de la propriété conductrice, et en partie de la propriété isolante.

Maintenant, lorsque pour mettre en activité l'électroscope résineux *osn* (fig. 76), on touche un des globules qui terminent l'aiguille avec un bâton de cire à cacheter, électrisé par le frottement, l'aiguille, indépendamment de la quantité de fluide né-

cessaire pour la charger, reçoit un surcroît dont le support, qui est un bâton de la même cire, s'empare, à raison de sa propriété conductrice, et que la propriété isolante empêche de passer dans les corps environnans. On peut s'assurer de ce que nous venons de dire, en touchant plusieurs points de la surface du support avec une tête d'épingle isolée, et en présentant cette épingle à une aiguille dans l'état naturel, celle-ci sera attirée, et si on lui substitue un appareil résineux, modérément chargé, il y aura répulsion.

A mesure que l'aiguille cède ensuite de son fluide à l'air en contact avec elle, le support lui en restitue de celui qu'elle lui a communiqué, et cette faculté qu'elle a de pouvoir réparer ses pertes, prolonge pendant un temps plus ou moins considérable, la durée de sa vertu électrique.

Cette durée a été d'environ une heure et demie, dans les expériences du 20 novembre 1819, au milieu d'un air supersaturé d'humidité, et qui nous ont conduits à l'explication des effets que nous venons d'exposer; en les réunissant à ceux que nous a offerts l'électroscope vitré, on a la preuve qu'il n'y aura aucune circonstance où les deux appareils refusent leur service aux physiciens, et qu'on peut les regarder comme des appareils de tous les momens.

659. Parmi les corps de la troisième classe, le quartz et le verre sont du nombre de ceux qui ont le moins d'aptitude pour la faculté conservatrice. La durée de ses effets y va rarement au-delà d'un quart d'heure, dans les temps secs. Nous avons été surpris de voir le diamant se ranger auprès de ces corps, sous le rapport de la même propriété. L'action d'un air humide la rend beaucoup plus fugitive. Nous avons trouvé des morceaux de quartz incolore, qui joignaient un poli vif à une belle transparence, et qui, dans le cas dont nous venons de parler, après avoir subi un frottement long-temps prolongé, ne donnaient aucun signe d'électricité. C'était, pour ainsi dire, le zéro absolu de la faculté conservatrice.

### *Divers Résultats des Électricités combinées de deux Corps.*

660. Les expériences dans lesquelles on emploie deux corps que l'on soumet à l'action l'un de l'autre, ont donné naissance à une grande diversité de résultats qui dépendent de la nature de chaque corps, et de l'espèce de fluide qui le sollicite. Ainsi il peut arriver que les corps soient tous les deux conducteurs, ou tous les deux isolans, ou bien l'un sera isolant et l'autre conducteur. Les électricités acquises par ces mêmes corps seront tantôt homogènes, et tantôt hétérogènes. La manière de faire l'expérience est elle-même susceptible de varier, suivant que les deux corps sont suspendus librement, ou qu'un seul est mobile, tandis que l'autre est fixe, ou enfin que l'un étant libre de se mouvoir, l'autre soit conduit par une action mécanique; comme lorsque l'on tient ce dernier à la main, pendant qu'on le fait avancer vers l'autre.

Il nous a paru d'autant plus intéressant de présenter ici le tableau de ces divers résultats, avec l'indication des moyens aussi simples que décisifs à l'aide desquels on peut les vérifier, qu'ils ne sont autre chose que les différentes faces sous lesquelles s'offrent, soit tour à tour, soit simultanément, deux principaux faits dont l'explication donne la clef de presque toute la théorie de l'électricité, la répulsion des fluides homogènes, et l'attraction des fluides hétérogènes.

Pour procéder avec ordre, nous partirons de la circonstance où les deux corps étant dans l'état naturel, les actions de leurs fluides se détruisent mutuellement.

#### Équilibre de deux Corps dans l'état naturel.

661. Désignons les deux corps dont il s'agit par A et par B, et bornons-nous à déterminer la manière dont A agit sur B, parce que toute action est réciproque. Or, le corps A exerce sur le corps B quatre actions différentes, qui proviennent des répulsions de ses deux fluides sur les fluides homogènes de B, et de leurs attrac-

tions sur les fluides de nature différente, et il est facile de prouver que l'équilibre dépend de l'égalité de ces quatre actions.

Nommons  $U$  le fluide vitré de  $A$ ,  $R$  son fluide résineux,  $u$  le fluide vitré de  $B$ , et  $r$  son fluide résineux. D'après ce que nous venons de dire, 1°.  $U$  attire  $r$ ; 2°.  $R$  repousse  $r$ ; 3°.  $R$  attire  $u$ ; 4°.  $U$  repousse  $u$ . Or les deux premières forces sont égales entre elles; car si  $r$  était plus ou moins attiré par  $U$  que repoussé par  $R$ , il prendrait du mouvement, ce qui est contre l'hypothèse de l'équilibre. Les deux dernières force sont aussi égales, par une raison semblable, c'est-à-dire, que  $u$  est autant attiré par  $R$  que repoussé par  $U$ .

De plus, la troisième force est égale à la première, c'est-à-dire qu'autant  $U$  attire  $r$ , autant  $R$  attire  $u$ . Car, d'un côté plus  $r$  renferme de molécules attirées, ou, ce qui revient au même, plus  $r$  a de masse, et plus l'effort avec lequel  $r$  se porte vers  $U$  est considérable; d'un autre côté, plus  $U$  renferme de molécules attirantes, et plus chaque molécule de  $r$  a de vitesse pour se porter vers  $U$ . Donc la quantité de mouvement qui mesure l'effet total avec lequel  $r$  se porte vers  $U$ , est représentée par le produit  $r \times U$ . On prouvera, à l'aide d'un raisonnement analogue, en substituant  $u$  à  $r$ , et  $R$  à  $U$ , que l'effort total avec lequel  $u$  se porte vers  $R$ , a pour expression le produit  $u \times R$ .

Or, les fluides étant neutralisés l'un par l'autre dans chaque corps, il en résulte que les quantités du fluide  $U$  et  $u$  sont proportionnelles aux quantités du fluide  $R$  et  $r$ , c'est-à-dire, que l'on a  $r \times U = u \times R$ .

Maintenant, puisque des quatre forces que nous considérons ici, trois sont égales entre elles, et qu'il y a équilibre, il est évident que la quatrième force est égale à chacune des trois autres; et c'est par une suite de cette égalité entre les quatre forces, que deux corps, dans l'état naturel, n'ont aucune action l'un sur l'autre.

*Action mutuelle de deux Corps, dont les Electricités sont homogènes.*

662. Si nous supposons d'abord deux corps qui soient électrisés chacun par une certaine quantité d'électricité vitrée ou résineuse qui lui aurait été transmise, on voit à l'instant ce qui doit arriver, puisque ce principe que les corps animés de la même espèce d'électricité se repoussent, et que les corps sollicités par des électricités différentes s'attirent, n'est que la traduction, pour ainsi dire, littérale de cet autre principe fondamental, que les molécules de chacun des fluides composans, agissent les unes sur les autres par des forces répulsives, et exercent des forces attractives sur les molécules de l'autre fluide.

Mais nous avons ici trois cas à considérer : celui où les deux corps sont conducteurs, celui où ils sont isolans, celui où l'un est conducteur et l'autre isolant.

663. 1<sup>er</sup> Cas. Deux corps conducteurs. La manière dont les choses se passent dans ce premier cas, exige des détails particuliers. Soient A, B (*fig.* 82) deux balles de moëlle de sureau, ou de toute autre matière conductrice suspendues par des fils à une petite distance l'une de l'autre, et auxquelles on ait communiqué l'électricité vitrée. Les fluides qui enveloppent ces balles se repousseront mutuellement, et leurs molécules se répandraient dans l'espace, par des mouvemens contraires, si l'air environnant ne les maintenait autour de chaque corps. Elles ne pourront donc que glisser sur la surface des corps, de manière par exemple, que le fluide du corps A étant refoulé vers la surface postérieure de ce corps située autour du point *d*, balancera par sa réaction l'effet de la pression que l'air voisin exerçait sur le même corps en vertu de sa force élastique. L'équilibre étant alors rompu entre cette force et celle de l'air contigu à la surface antérieure *c*, cette dernière agira sur le corps A, pour le pousser suivant la direction *cb*. Le même raisonnement s'applique en sens contraire au corps B, d'où nous concluons que les fluides et les corps entraînés par un mouvement commun doivent se fuir. On aura un

résultat semblable , en supposant que les deux corps soient électrisés résineusement.

Dans l'une et l'autre circonstance , les deux corps continueront de se fuir , jusqu'au terme où leurs actions répulsives se trouvant diminuées par une suite de l'augmentation de distance , feront équilibre à la pesanteur qui agit en sens contraire , par une force semblable à celle qui produit le mouvement oscillatoire.

664. On expliquera de la même manière le résultat qui aurait lieu dans l'hypothèse où un seul des corps étant libre de se mouvoir , l'autre serait attaché à un point fixe. Tout l'effet de la répulsion se reportera alors sur le mouvement que fera le corps libre en s'éloignant de l'autre. Ce résultat est analogue à celui dont nous avons cité un exemple remarquable , en décrivant l'expérience fondamentale imaginée par le célèbre Coulomb , pour déterminer la loi à laquelle sont soumises les actions électriques.

Il y a une seconde manière de varier l'expérience , également susceptible de s'appliquer au cas suivant , qui nous en fournira des exemples.

665. 2<sup>e</sup> Cas. Deux corps isolans. Lorsque ce cas a lieu , l'action de l'air ne concourt plus avec celle que les corps exercent l'un sur l'autre. Les molécules des deux fluides en activité autour de leur surface y sont maintenues par la force coercitive , et les couches composées de ces fluides étant censées ne faire qu'un même tout avec les corps qu'elles enveloppent , les entraînent en se repoussant mutuellement , en sorte que le résultat des actions électriques dépend alors immédiatement de l'état dans lequel se trouvait chaque corps avant l'expérience.

L'électroscope vitré nous fournit un moyen d'appliquer à ce second cas une manière de varier l'expérience que nous avons annoncé il n'y a qu'un instant ; c'est celle où l'un des deux corps étant libre , l'autre s'en approche à l'aide d'un mouvement qui provient d'une action mécanique. Supposons maintenant que le barreau de spath , qui est le mobile de l'électroscope , ayant acquis la vertu électrique , à l'aide de la pression , on prenne entre deux doigts un morceau du même spath , et que l'ayant pressé à son tour , on le fasse mouvoir vers l'extrémité du barreau de

l'électroscope. La répulsion mutuelle des deux corps produira dans le levier de l'électroscope un mouvement de rotation, en vertu duquel le barreau qui le termine fuira continuellement le corps qui tend vers lui, et ne s'arrêtera que quand celui-ci cessera de paraître poursuivre. On réussira de même en substituant à ce dernier corps une lame ou un morceau taillé de topaze incolore électrisée par le frottement.

666. 3<sup>e</sup> Cas. Un des corps conducteur et l'autre isolant. Reprenons la circonstance dans laquelle les deux corps sont suspendus librement, ainsi que le représente la figure 83, et supposons que B soit le corps isolant. Son fluide, en restant comme enchaîné à sa surface, par la force coercitive, exercera encore une action répulsive sur le fluide de A, qui sera refoulé vers le point *d*, comme dans le premier cas, et réagira contre l'air voisin de ce point. L'équilibre sera donc aussi rompu entre cet air et celui qui occupe l'intervalle entre les deux corps, de manière que l'élasticité de ce dernier, devenue prépondérante, forcera les deux corps de s'écarter l'un de l'autre.

667. On peut vérifier ce résultat, à l'aide de l'électroscope résineux et d'un bâton de gomme-laque ou de cire d'Espagne, employé successivement dans deux états différens. Après avoir frotté ce bâton, on le met en contact avec un des globules de l'aiguille qui est aussitôt repoussé, en vertu de la partie que le bâton lui a cédée de son fluide excédant, puis on le touche deux ou trois fois avec un doigt pour lui enlever ce qui lui en resté. Il passe alors de l'état de conducteur à celui de corps isolant, et si on le présente de nouveau au globule qui est un corps conducteur, la répulsion reparait, ce qui est le troisième cas dont il s'agit ici.

### *Action mutuelle de deux Corps dont les Électricités sont hétérogènes.*

668. Concevons maintenant que les deux corps soient conducteurs, et que l'un des deux, par exemple le corps A étant sollicité par l'électricité vitrée, celle du corps B soit résineuse. Les fluides alors s'attireront de manière que relativement au corps A,

que nous continuerons de prendre pour terme de comparaison, le refoulement se fera vers la partie antérieure C de ce corps. Le fluide accumulé en cet endroit agira donc par répulsion sur l'air voisin, d'où il suit que l'air contigu à la partie postérieure *d*, poussera le corps suivant la direction *dn*. Le même effet aura lieu en sens contraire, par rapport au corps B, et ainsi les fluides et les corps se porteront l'un vers l'autre.

669. Si les deux corps étaient isolans, ou qu'il y en eût seulement un seul qui le fût, on en conclurait, à l'aide d'un raisonnement semblable à celui que nous avons fait dans l'hypothèse de deux électricités homogènes, qu'ils tendront encore l'un vers l'autre, par des mouvemens contraires.

670. Il nous reste à considérer ce qui doit se passer entre les corps, lorsqu'ils sont arrivés au contact. S'ils sont doués tous les deux de la faculté conductrice, il peut arriver que les quantités de fluide dont ils sont chargés soient égales, et dans cette hypothèse, les fluides se neutraliseront l'un l'autre en se réunissant, et ramèneront les corps à l'état naturel, en sorte que leurs actions deviendront nulles.

671. Si au contraire, ce qui est le cas le plus ordinaire, l'un des deux corps, tel que A, est plus fortement électrisé que B, son fluide se sous-divisera en deux portions, dont l'une égale à la totalité du fluide de B, la neutralisera par son union avec elle, et l'autre qui restera en activité, se distribuera entre les deux corps, de manière que la répulsion succédera à l'attraction. Si les mêmes corps ont l'un et l'autre la faculté isolante, ou que l'un des deux seulement en soit pourvu, leur tendance commune à conserver leur fluide, ou celle qui sera particulière au corps isolant, les maintiendra l'un et l'autre dans le même état, avec une adhérence plus ou moins forte, excepté dans l'hypothèse où l'égalité entre les quantités des deux fluides, rendrait cette adhérence nulle.

672. On peut vérifier, à l'aide de l'expérience suivante, le résultat relatif à deux corps conducteurs. On commence par mettre l'aiguille isolée à l'état d'électricité vitrée, on prend ensuite l'appareil à globe isolé (*fig. 78*), et tandis qu'on tient d'une main

L'électricité libre du bâton de cire d'Espagne qui lui sert de support, on frotte un autre bâton de la même cire, et l'on touche le globe avec la partie frottée. On renouvelle trois ou quatre fois le frottement de la cire et la communication avec le globe métallique, puis on approche celui-ci d'un des globules de l'aiguille, qui est aussitôt attiré jusqu'au contact et ensuite repoussé.

*Action d'un Corps électrisé sur un Corps dans l'état naturel.*

Nous plaçons ici le cas auquel se rapporte cette action, parce que le premier effet qui en résulte, est de la convertir en celle qui a lieu entre deux corps sollicités par des électricités hétérogènes.

673. Concevons un corps conducteur A, d'une figure sphérique, électrisé en vertu d'une quantité additive de fluide vitré qu'il ait reçue d'ailleurs, et un second corps sphérique B, pareillement conducteur, et dans l'état naturel. Le fluide vitré, qui environne A, exercera une force répulsive sur le fluide de la même espèce, faisant partie du fluide naturel de B, et une force attractive sur le fluide résineux, qui est l'autre principe composant du même fluide naturel. Ce dernier fluide sera donc décomposé, en sorte que les molécules de son fluide résineux se porteront vers la partie de B la plus voisine de A, et que celles du fluide vitré seront chassées vers la partie opposée. Ces mêmes principes sortiront du corps B et se répandront autour de sa surface, de manière que le fluide de l'électricité résineuse enveloppera l'hémisphère tourné vers A, et celui de l'électricité vitrée, l'hémisphère le plus éloigné de A.

Or, en raisonnant ici du fluide additionnel de A, comme de celui qui fait partie de son fluide naturel, on concevra qu'à égalité de distance il exercerait, sur les deux fluides de B, des actions qui se détruiraient mutuellement. Mais la distance n'étant plus la même, le fluide résineux de B sera plus attiré que le fluide vitré; en sorte que les deux corps, s'il sont suspendus librement, s'approcheront l'un de l'autre jusqu'au contact. Alors la quantité

additive du fluide vitré de A , s'unissant avec le fluide résineux répandu sur la surface de B , il résultera de cette union une certaine quantité de fluide naturel qui rentrera dans B ; et il est bien clair que sur la totalité des fluides qui se trouvaient libres au moment du contact, il restera une portion de fluide vitré hors de l'état de combinaison. Cette portion se distribuera entre les deux corps , suivant une certaine loi dont nous avons parlé (642), et les deux corps se trouvant à l'état d'électricité vitrée , se repousseront , ainsi que l'expérience le fait voir.

Le même raisonnement s'applique, par un simple changement de noms, au cas où le corps A serait chargé d'une quantité additive de fluide résineux.

On voit par là qu'il n'est pas exactement vrai, comme les partisans de Franklin l'avaient d'abord pensé, qu'un corps amené à un certain état d'électricité, attire à lui un autre corps qui est dans l'état naturel. Il manque, dans cette manière de concevoir le phénomène, une idée intermédiaire. Le premier corps commence par faire sortir l'autre de l'état naturel ; il le rend attirable, puis il l'attire.

Nous avons un exemple du résultat qui vient d'être décrit dans la manière dont se charge l'électroscope résineux, lorsqu'ayant frotté un bâton de cire d'Espagne, on le présente à l'un des globules de l'aiguille, qui est successivement attiré et repoussé.

674. On expliquera, d'après les mêmes principes, ce qui se passe dans l'usage que l'on fait de l'aiguille non isolée, pour reconnaître si un corps est électrisé ou dans l'état naturel, suivant qu'il attire cette aiguille ou qu'il la laisse immobile. Dans le premier cas, si le corps est isolant, l'attraction persistera après le contact, en sorte que si l'on fait mouvoir le corps attirant autour du centre de rotation de l'aiguille, elle le suivra en restant appliquée à sa surface. Si, au contraire, le corps présenté à l'aiguille est conducteur, il commencera par l'attirer, comme dans le cas précédent, mais au moment du contact, elle lui enlèvera tout son fluide, et le transmettra aux corps environnans.

675. Il nous reste à expliquer le résultat de l'expérience à l'aide de laquelle l'aiguille isolée (*fig. 77*) acquiert la vertu électrique.

Nous choisissons , comme exemple , le cas où l'on place sur sa direction prolongée , et vis-à-vis l'un des globules qui la terminent , un morceau de succin que l'on a frotté , tandis que l'on tient l'autre globule entre deux doigts . L'action du succin décompose le fluide naturel , soit de l'aiguille , soit des doigts , jusqu'à la distance à laquelle elle peut s'étendre ; elle repousse dans l'espace qui répond à cette distance , le fluide résineux dégagé du même fluide naturel , et attire en sens contraire le fluide vitré ; d'où il suit que l'aiguille , en même temps qu'elle perd de son fluide résineux , acquiert un surcroît de fluide vitré , qui va en augmentant , jusqu'au terme où la répulsion mutuelle , tant des molécules de ce surcroît que de celles de la quantité primitive , est en équilibre avec l'attraction du succin . Les choses étant dans cet état , on retire d'abord le doigt , puis le succin , et c'est ensuite l'isolement qui empêche le fluide acquis par l'aiguille de s'échapper , et la maintient dans l'état d'électricité vitrée . Le même raisonnement s'applique au cas où l'on communique à l'aiguille l'électricité résineuse , en substituant à l'action du succin celle d'un rhomboïde de spath d'Islande .

Nous terminerons cet article , par la description d'une expérience familière , dans laquelle l'action d'un corps électrisé sur un autre corps à l'état naturel , est accompagnée de circonstances particulières qui dépendent du jeu de l'appareil que l'on y emploie .

### *Carillon électrique.*

676. L'effet de cet instrument consiste dans les-mouvements de deux timbres métalliques , frappés alternativement par un petit globe pareillement électrique , qui sert de battant . Des deux timbres *g* et *n* (fig. 84) , l'un , tel que *g* , communique avec le conducteur par le moyen de sa chaîne de suspension *Gr* ; l'autre timbre *n* est suspendu à un fil de soie , et par conséquent isolé à l'égard du conducteur , en même temps qu'il est en communication avec les corps environnans , par l'intermède de la chaîne *nh* . Le globe métallique *d* est pareillement suspendu à un fil de soie . Au moment où l'on charge le conducteur , le fluide , que nous

supposerons être celui de l'électricité vitrée, se transmet au timbre *g*. A l'instant, le globule *d*, attiré par ce timbre, va le frapper, et est aussitôt repoussé, par la raison que nous avons dite plus haut. Il tendrait donc déjà, en vertu de cette seule répulsion, à s'approcher du timbre *n*, mais il y est de plus sollicité à raison de l'électricité acquise, puisque le timbre *n* est dans l'état naturel; enfin, le mouvement oscillatoire seconde encore cet effet. Mais aussitôt que le globule est en contact avec le timbre *n*, il lui cède son fluide, qui se perd le long de la chaîne *nh*; alors le globule qui, en vertu du seul mouvement d'oscillation, se serait rapproché du timbre *g*, s'est trouvé de plus attiré vers lui par l'action du fluide électrique répandu à la surface de ce dernier, en sorte que les mêmes causes recommençant à agir, les mêmes effets se répètent, et ainsi successivement.

677. On peut mettre sous une forme différente l'expérience qui vient d'être citée, en substituant aux timbres deux disques séparés par un cylindre creux, de verre, auquel ils servent de bases. Le disque supérieur porte une tige métallique fixée à son centre par une extrémité, et terminée du côté opposé par un crochet à l'aide duquel on le suspend au conducteur de la machine électrique. Le disque inférieur est en communication avec les corps environnans. On a placé, avant l'expérience, un certain nombre de balles de moelle de sureau sur la surface du même disque; renfermée dans l'intérieur du cylindre. Aussitôt que l'on fait tourner le plateau de la machine, on voit toutes ces balles s'agiter en s'élançant vers le disque supérieur qui les attire jusqu'au contact, puis les repousse vers le disque inférieur, et ainsi de suite. L'œil se perd dans la succession rapide des mouvemens contraires qui entraînent tous ces corps, et des chocs qui naissent de leur rencontre mutuelle. Cette expérience qui, pendant long-temps, n'aurait été qu'amusante, a acquis un haut degré d'intérêt, depuis l'application heureuse que le célèbre Volta en a faite à la formation de la grêle, ainsi que nous le dirons dans la suite.

*Actions de l'Électricité acquise par chacun des deux Corps sur le Fluide naturel de l'autre.*

678. Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que les corps n'agissaient l'un sur l'autre qu'en vertu des électricités acquises avant l'expérience. Mais dans la réalité, aussitôt que les corps sont en présence, le fluide libre que chacun d'eux avait apporté avec lui, agit sur le fluide naturel de l'autre, pour le décomposer, et l'effet de cette décomposition peut aller, dans certains cas, jusqu'à changer en attraction la répulsion qui aurait eu lieu, si les corps étaient restés dans leur état primitif.

Pour le prouver, supposons que les deux corps A, B, (*fig. 83*), étant tous les deux conducteurs et isolés, aient acquis des quantités sensiblement inégales d'électricité vitrée, de manière que ce soit celle de A qui l'emporte. Désignons ces deux quantités par V et  $\nu$ . D'après ce qui a été dit plus haut, la répulsion mutuelle des deux fluides les refoulera autour des points  $d, g$  de leurs surfaces, les plus éloignés l'un de l'autre. Au même instant, leurs actions réciproques sur les fluides naturels commenceront à les décomposer. Mais l'effet de cette décomposition étant léger à l'égard du fluide de A, à cause de la petite quantité de celui de B, nous considérons le corps A comme étant uniquement à l'état vitré, en vertu d'une quantité V' du même fluide, un peu moindre que la quantité absolue. Maintenant, l'action de ce fluide attirera vers le point  $f$  une portion  $r$  de fluide résineux dégagée du fluide naturel de B, et repoussera vers  $d$  une portion  $\nu'$  de fluide vitré, provenant d'un semblable dégagement, laquelle s'unira à la quantité préexistante  $\nu$ . Or, l'attraction que le fluide V continue d'exercer sur le fluide  $r$ , balance en partie l'effet de la répulsion du même fluide sur les fluides  $\nu$  et  $\nu'$ ; et il est possible que dans les premiers instans celle-ci conserve sa prépondérance. Mais si l'on fait avancer le corps A vers le corps B, l'augmentation de la quantité  $r$ , qui suivra celle de l'attraction, affaiblira de plus en plus la répulsion dont nous venons de parler; d'une autre part, l'attraction de V sur  $r$  croîtra dans un plus grand rapport par la

diminution de la distance, que la répulsion sur  $\nu$  et sur  $\nu'$  (1), en sorte qu'il y aura un terme où l'avantage qui en résulte pour l'attraction, la rendra supérieure à la répulsion, et passé ce terme le corps B s'approchera du corps A.

L'attraction sera d'autant plus prompte ou d'autant plus tardive à se montrer, que les quantités de fluide primitivement acquises par les deux corps, s'éloigneront ou se rapprocheront davantage de l'égalité; et il est facile de voir que les mêmes effets pourraient aussi avoir lieu dans le cas où l'un des deux corps serait isolant pourvu que ce fût celui qui eût acquis la plus forte électricité.

679. Mais il y a mieux; c'est que l'on peut obtenir des effets semblables, en soumettant à l'expérience deux corps choisis parmi ceux que l'on a nommés *isolans*. La possibilité du succès est fondée sur ce que la propriété isolante varie d'un corps à l'autre, par une gradation de nuances. Il est même vrai de dire qu'aucun corps n'en jouit complètement, et n'oppose une résistance absolue au mouvement du fluide électrique dans son intérieur. Il en résulte que si l'on choisit, pour l'expérience dont il s'agit ici, deux corps dont l'un jouisse à un beaucoup plus haut degré que l'autre, de la force coercitive, qui est liée à la propriété isolante, ce corps étant par là même susceptible d'acquiescer une électricité beaucoup plus forte, à l'aide du frottement, l'action énergique qu'il exercera sur l'autre, lorsqu'on les aura mis tous les deux dans l'état électrique, pourra décomposer une partie du fluide naturel de celui-ci, et agir ensuite sur les fluides vitrés et résineux que cette décomposition aura mis en liberté, de manière que le résultat de cette action offrira l'analogie de celui qui aurait lieu avec deux corps conducteurs.

680. On peut se servir, pour vérifier les résultats précédens, des petits instrumens dont nous avons déjà indiqué divers usages. Ainsi on prendra, pour l'expérience avec deux corps conducteurs, le petit globe métallique et l'aiguille isolée, l'un et l'autre à l'état

---

(1) C'est une suite de ce que les actions électriques sont soumises à la loi de la raison inverse du carré de la distance, ainsi qu'on l'a vu plus haut.

d'électricité résineuse; pour l'expérience avec un corps isolant et un conducteur, un morceau de cristal de roche frotté, et la même aiguille à l'état vitré; pour l'expérience avec deux corps isolans, l'électroscope vitré et le morceau de cristal de roche. Le corps le plus fortement électrisé sera, dans la première expérience, le globe métallique; dans la seconde, le cristal de roche, et dans la troisième, le barreau de l'électroscope vitré. Il n'arrive pas toujours que l'effet qu'on veut obtenir se montre du premier coup; par exemple, le cristal de roche présenté au barreau de spath, est quelquefois trop fortement électrisé, pour que l'attraction succède à la répulsion. Dans ce cas, on le laisse pendant un instant en contact avec un corps conducteur, pour lui faire perdre la partie surabondante de son fluide. Avec de l'habitude, on parvient à maîtriser l'expérience, et à la diriger vers son véritable but.

681. On voit par ce qui précède, que l'attraction n'est pas un indice certain de l'espèce d'électricité qu'une substance est susceptible d'acquérir à l'aide du frottement; c'est dans la répulsion que réside la marque distinctive à laquelle on peut la reconnaître.

Il en est autrement des actions qu'exercent les électricités hétérogènes acquises par deux corps, que de celles qui dépendent des électricités homogènes. Désignons par A celui qui a été électrisé vitreusement, et par B, celui qui l'a été résineusement. Le fluide résineux dégagé du fluide naturel de B, par l'action de A, sera attiré dans la partie du premier qui est tournée vers l'autre, c'est-à-dire que ce sera le fluide de même nom que celui qui avait été acquis par le corps B. La même identité aura lieu entre le fluide vitré attiré dans la partie antérieure du corps A et son fluide primitif. Ainsi les actions des fluides dégagés des quantités naturelles, loin de contrarier ou même d'altérer les effets de celles des fluides primitifs, en augmenteront l'énergie. Il est de plus évident que le même accroissement d'énergie aura lieu, proportion gardée, quel que soit le rapport entre les quantités d'électricité acquises par les deux corps avant l'expérience.

*Actions mutuelles de deux Corps qui ont leurs parties dans deux états différens, en vertu de leur Fluide naturel décomposé.*

682. Nous plaçons ici l'explication d'un résultat qui est lié à notre objet présent, et qui nous sera utile lorsque nous traiterons de l'électricité acquise par la chaleur. C'est celui qui a lieu, lorsque les fluides provenus de la décomposition des fluides naturels de deux corps isolans A et B, après avoir été refoulés vers leurs extrémités, y sont maintenus par la force coercitive. Supposons ces deux corps situés l'un dans la sphère d'activité de l'autre, en sorte que la partie de A qui renferme le fluide vitré, regarde celle de B qui renferme le fluide résineux. Si chacun des deux fluides de A agissait, à la même distance, sur l'un ou l'autre des fluides de B, il y aurait équilibre entre leurs actions. Mais comme le fluide vitré agit de plus près, sa force l'emportera, en sorte que l'on pourra considérer A comme un corps qui agirait uniquement en vertu d'une quantité  $u$  de fluide vitré, proportionnelle à la différence des deux actions. Or il est facile d'en conclure que le fluide résineux de B étant, à son tour, plus voisin du point dans lequel l'action de  $u$  est censée résider, que ne l'est le fluide vitré du même corps B, l'attraction de  $u$  sur le premier sera plus forte que la répulsion sur le second; d'où il suit que les deux corps s'approcheront l'un de l'autre. Si, au contraire, les deux parties par lesquelles les corps se regardent, étaient animées d'une même espèce d'électricité, les deux corps se fuiraient.

**Cas où les Attractions et les Répulsions ont lieu simultanément.**

683. Les attractions et répulsions électriques se présentent; dans certains cas, sous l'apparence d'un effet qui serait dû à l'action simultanée de deux causes contraires; et ce sont surtout les phénomènes de ce genre qui ont séduit les partisans des affluences

et des effluences. Placez des corps légers, tels que de petites feuilles de cuivre, sur un conducteur qui soit d'abord à l'état naturel, et d'autres en-dessous à une petite distance; au moment où vous électriserez le conducteur, celles-là seront repoussées, tandis que les autres seront attirées pour être ensuite repoussées à leur tour. On attribuait le premier effet à la matière effluente, et le second à la matière affluente. De plus, il arrive quelquefois que certaines feuilles, tandis qu'elles sont attirées, reculent subitement avant d'être arrivées au contact: c'est qu'alors elles se trouvaient aux endroits où les deux courans se heurtaient en se rencontrant. Mais la véritable explication de ces phénomènes se présente comme d'elle-même, d'après les principes que nous avons établis. Les corps légers, placés sur le conducteur, sont repoussés, parce qu'il leur communique une portion de son fluide. Ceux qui sont situés en dessous éprouvent la plupart une attraction qui les entraîne jusqu'au contact, et à laquelle succède une répulsion, parce que leur partie tournée vers le conducteur, qui était d'abord sollicité par une électricité contraire à la sienne, en acquiert une de la même nature aussitôt qu'elles sont parvenues au contact; et quant aux petits corps qui fuient le conducteur avant de l'avoir touché, leur mouvement rétrograde provient de ce que, quand l'électricité est un peu forte, il y a toujours quelques jets de fluide qui s'échappent du conducteur à travers l'air environnant, et qui se portent de préférence sur ceux des mêmes corps qui étant terminés en pointe, sont par là même très propres à soutirer le fluide électrique, ainsi que nous le verrons dans la suite; en sorte qu'ils subissent d'avance l'effet qui n'aurait eu lieu qu'au contact.

### Considérations en faveur de l'Hypothèse d'un double Fluide électrique.

La répulsion des corps que l'on regardait comme étant électrisés négativement, a toujours été l'écueil des théories. Il fallait tâcher de concevoir comment ces corps, dont chacun avait perdu une partie de son fluide, étaient déterminés à s'écarter

l'un de l'autre, tandis qu'une surabondance de fluide produisait précisément le même effet. La plupart des physiciens qui ont tenté de résoudre cette difficulté, ont eu recours à l'action de l'air environnant, qu'ils expliquaient par différens mécanismes que nous ne nous arrêterons point à exposer.

Cependant, il y avait tout lieu de penser que quand, par exemple, on avait électrisé, d'une part, deux morceaux de résine et de l'autre, deux corps vitreux, à l'aide du frottement, la répulsion mutuelle des premiers et celle des seconds étaient des effets en quelque sorte, parallèles, dont il fallait chercher les causes dans les corps eux-mêmes.

684. Ceci nous conduit à une considération qui achevera de motiver l'hypothèse dans laquelle le fluide électrique serait composé de deux fluides différens. Tant que l'on s'est borné à employer, relativement à l'électricité, ces méthodes qui ne donnent que des à peu près, et laissent au physicien la liberté d'accommoder à sa manière de voir ce qui se passe dans les phénomènes, on croyait satisfaire à tout avec un seul fluide. Mais pour bien juger ces méthodes, il faut se reporter au temps où le célèbre *Æpinus* entreprit de ramener la théorie à la précision et à la justesse, et de la mettre en état de soutenir l'épreuve du calcul. Il partit du principe que les molécules du fluide électrique, qui dans cette théorie était considéré comme un être simple, se repoussaient mutuellement, et pouvaient être attirées par tous les corps connus. Supposant ensuite deux corps A et B dans l'état naturel, et par conséquent en équilibre, il trouva d'abord que la matière propre du corps A, par exemple, attirait le fluide électrique de B, et que les fluides des deux corps se repoussaient mutuellement, et il prouva que l'attraction était égale à la répulsion (1). Mais de plus, le fluide électrique de A attirait, à son tour, la matière propre de B, et cette troisième action était encore égale à chacune des deux premières. Or, puisqu'il y avait

---

(1) Le raisonnement qui le conduisit à ce résultat était semblable à celui que nous avons employé (661) pour démontrer l'égalité des actions qu'exercent les uns sur les autres, les fluides de deux corps dans l'état naturel.

équilibre, il fallait trouver quelque part une quatrième force qui fût répulsive, et qui balançât l'effet de la troisième. Mais toutes les autres places étant prises, il n'en restait plus, pour cette répulsion, que dans l'action mutuelle des molécules des deux corps; et ainsi Æpinus se trouva entraîné, par la théorie, dans cette étrange conséquence, que sous le point de vue des phénomènes électriques, les molécules de tous les corps se repoussaient. On voit, en lisant son ouvrage, qu'il rejeta cette conséquence avec une espèce d'indignation, la première fois qu'elle s'offrit à son esprit (1) et qu'il eut besoin de se réconcilier avec elle. Effectivement, il était dur d'être obligé d'avouer qu'il ne tenait qu'à la présence du fluide électrique que les molécules de tous les corps solides ne parussent exercer les unes sur les autres une action directement opposée à la gravitation universelle. C'était donner à la théorie un adversaire bien puissant et bien redoutable. On pare à cet inconvénient, en concevant le fluide électrique comme formé par la réunion de deux fluides, dont l'un fait la fonction qu'Æpinus attribuait aux molécules des corps. Il répugne beaucoup moins d'admettre une répulsion à distance entre les molécules de deux fluides particuliers qui, comme tous les autres, se repoussent déjà au contact, qu'entre celles de tous les corps solides de la nature. Les physiiciens qui expliquaient tout avec un seul fluide, avaient commencé eux-mêmes à croire que ses molécules se repoussaient aussi, à distance, d'une surface à l'autre de la bouteille de Leyde, et comme ce que nous appelons *action à distance* n'est proprement qu'un fait sur lequel nous appuyons une théorie, sans rechercher la cause qui fournit le point d'appui, il nous suffit que la manière dont nous concevons ce fait puisse s'adapter à notre Physique, et que toutes nos hypothèses se lient dans notre esprit, comme les véritables causes dont elles nous servent à représenter les résultats, sont liés dans les desseins de la sagesse suprême. Enfin l'hypothèse des deux fluides est la seule, jusqu'ici, qui ait, relativement aux deux espèces d'électricité, l'avantage d'établir une parité exacte entre les actions qui pro-

---

(1) *Tentamen Theor. Electric. et Magnet.*, p. 39.

duisent des phénomènes que l'observation nous offre sous des traits si ressemblans , et de ramener tout à des explications dont l'une n'est , pour ainsi dire , que la contre-épreuve de l'autre.

### *Du Pouvoir des Pointes.*

Le phénomène dont nous allons maintenant nous occuper , et que l'on a appelé *le pouvoir des pointes* , est , parmi ceux que présente l'électricité , un des plus remarquables , soit en lui-même , soit par les applications utiles qui en ont été faites pour préserver les édifices des explosions de l'électricité naturelle. Nous nous bornerons , pour l'instant , à le décrire et à en donner la théorie

685. Rappelons-nous d'abord que quand un corps isolé , qui était auparavant à l'état naturel , se trouve en présence d'un second corps chargé d'électricité de l'une ou l'autre espèce , il devient lui-même électrique , et cela de manière que sa partie la plus voisine du second corps est toujours sollicitée par l'électricité contraire à celle de ce corps (673). Il arrive de même des changemens dans l'état d'un corps conducteur non isolé , qui se trouve dans la sphère d'activité d'un corps électrisé. L'action de celui-ci attire dans la partie antérieure du corps non isolé l'espèce d'électricité différente de la sienne , et repousse dans la partie postérieure l'électricité de la même nature. Or le second corps agit à son tour sur le premier ; il tend à attirer son électricité , et cette action est si forte , dans certaines circonstances , qu'elle enlève l'électricité au premier corps , même à une distance très sensible : c'est ce qui arrive lorsque l'on présente une pointe délicate de métal à un conducteur chargé d'électricité ; et il est singulier de voir un corps , dont l'action semblerait devoir être proportionnée à sa petitesse , soustraire si puissamment l'électricité accumulée sur une surface considérable , et arrêter presque entièrement , en un clin-d'œil , tous les efforts du physicien , pour continuer de charger le conducteur.

686. Franklin est le premier qui ait observé ce pouvoir des pointes , et il crut d'abord l'avoir heureusement expliqué , d'après la comparaison entre une pointe et une petite force , qui

exécute, en détail et par des actions répétées, ce dont une grande force est incapable, par une seule action dirigée vers la totalité de l'effet. Mais il se défia depuis de son explication, et il en fait l'aveu avec cette belle franchise qui est pour les vrais savans, une autre manière encore de s'honorer que par des découvertes (1).

Sans nous arrêter à d'autres explications déjà réfutées, même par les partisans de ceux qui en étaient les auteurs, nous allons essayer de ramener le fait dont il s'agit, à la théorie que nous avons adoptée.

### Action d'une Pointe pour soutirer le Fluide électrique.

687. L'observation prouve qu'un corps, même arrondi, a déjà une certaine force pour attirer le fluide d'un conducteur électrisé, puisqu'il en fait sortir quelquefois des étincelles à la distance de plus d'un décimètre. Il faut donc faire voir que la force d'une simple pointe, pour produire le même effet, est incomparablement plus grande.

Concevons d'abord une seule aiguille  $ab$  (fig. 89), dont la pointe  $a$  soit tournée vers un conducteur  $C$  que nous supposons chargé d'électricité vitrée, et dont l'extrémité  $b$  communique avec les corps environnans. L'action du conducteur attirera vers la pointe  $a$  le fluide résineux  $r$  qui s'est dégagé du fluide naturel de l'aiguille, et repoussera vers l'extrémité  $b$  le fluide vitré  $v$ . Supposons maintenant une seconde aiguille  $gd$ , placée à une petite distance de la première, dans une direction parallèle à la sienne,

(1) Expér. et Observ. sur l'Electricité; Paris, 1752, p. 144 et suiv. On voit par l'exposé que ce célèbre physicien fait lui-même de son idée, qu'elle lui a été suggérée par le trait si connu de Sertorius, qui, voulant montrer à ses soldats combien la persévérance est plus efficace que la fougue, ordonna à un homme bien constitué et plein de vigueur, d'arracher tout d'un coup la queue d'un cheval vieux et maigre, et à un autre homme fluet et débile, d'arracher cri à cri la queue d'un cheval jeune et robuste. Ce dernier parvint, avec le temps, à remplir sa tâche: les efforts de l'autre n'aboutirent qu'à faire rire les spectateurs. *Ibid.*, p. 152.

et imaginons, pour un instant, que les deux aiguilles n'aient aucune action l'une sur l'autre. Le fluide  $V$  du conducteur attirera de même vers la pointe  $g$  une certaine quantité de fluide  $r'$  égale à  $r$ , et provenue de la décomposition du fluide naturel de l'aiguille, tandis qu'il repoussera vers la partie opposée  $d$  une autre quantité de fluide  $v'$  égale à  $v$ . Rétablissons maintenant l'action des deux aiguilles, l'une à l'égard de l'autre; les fluides  $r$  et  $v'$  en s'attirant mutuellement, tendront à se mouvoir l'un de  $a$  vers  $b$ , l'autre de  $d$  vers  $g$ . Pareillement l'attraction réciproque des fluides  $r'$  et  $v$  agira pour ramener l'un de  $g$  vers  $d$ , et l'autre de  $b$  vers  $a$ . Or, ces effets balancent en partie celui du conducteur, pour attirer vers l'extrémité de chaque aiguille le fluide de l'électricité contraire à la sienne.

L'action mutuelle des deux aiguilles deviendra encore plus sensible, si on les rapproche l'une de l'autre, parce qu'elle s'exercera à une moindre distance, et suivant des directions moins obliques.

688. Au lieu de deux aiguilles, supposons-en un très grand nombre qui soient réunies en faisceau, et ne forment plus qu'un même corps. Elles agiront de même les unes sur les autres pour détruire en partie l'action électrique du conducteur par rapport à chacune d'elles, et cela d'autant plus que leur proximité leur donnera un grand avantage, relativement à la position plus éloignée du conducteur, par une suite de la loi en raison inverse du carré de la distance à laquelle sont soumises les forces électriques. Il en résulte que le fluide de l'électricité résineuse sera incomparablement moins condensé vers l'extrémité du faisceau d'aiguilles, qu'il ne l'eût été vers celle d'une aiguille isolée.

D'une autre part, chaque aiguille réagit sur le conducteur dont elle attire l'électricité; et pour que la force de cette réaction produise l'effet observé, il suffit que l'équilibre soit rompu dans un seul point entre la tendance de l'électricité à s'échapper du conducteur, et la résistance de l'air. La réaction dont il s'agit sera donc beaucoup plus efficace de la part d'une seule aiguille, à l'extrémité de laquelle l'électricité résineuse est très condensée, et dont toute l'activité se dirige vers un même point du conducteur, que de la part d'un faisceau d'aiguilles dont les force

s'entre nuisent et ne sont point assez rapprochées ; et ainsi une aiguille isolée deviendra capable de provoquer un effluve rapide de fluide électrique, qui abandonnera le conducteur pour se précipiter sur elle, et qu'elle transmettra aux corps environnans, après quoi elle recommencera aussitôt à soutirer de nouveau fluide si l'on continue de charger le conducteur.

Or, un corps arrondi peut être comparé à un faisceau d'aiguilles, qui n'exerce qu'une faible action pour dépouiller le conducteur de son électricité, tandis qu'un corps terminé en pointe soutire puissamment cette électricité par une action semblable à celle de l'aiguille isolée dont nous venons de parler.

### Action d'une Pointe pour lancer le Fluide électrique.

689. On a observé aussi qu'un conducteur sur lequel on a fixé une aiguille, présente, en quelque sorte, l'effet inverse du précédent. Le fluide électrique, dans ce cas, est lancé rapidement par la pointe de l'aiguille à mesure qu'il arrive au conducteur. On expliquera cet effet de la même manière, en supposant d'abord plusieurs aiguilles attachées au conducteur, et en considérant que les forces répulsives mutuelles des portions de fluide répandues dans ces aiguilles, balancent l'action du conducteur pour chasser son propre fluide vers leurs extrémités. Or on peut substituer par la pensée, à une partie quelconque d'un conducteur arrondi, un faisceau d'aiguilles qui agissent les unes sur les autres, de la manière que nous venons de le dire. Maintenant, qu'une seule aiguille dépasse les autres, ce qui est le cas d'un conducteur terminé en pointe, cette aiguille se trouvera débarrassée de toutes les actions répulsives qu'exerceraient sur elle d'autres aiguilles voisines, pour empêcher le conducteur de repousser une partie de son propre fluide vers l'extrémité de la même aiguille ; et comme cette partie de fluide, qui n'occupe qu'une très petite surface, tend à s'y condenser extrêmement, pour faire seule équilibre à tout le reste du fluide répandu autour du conducteur, sa densité deviendra bientôt capable de vaincre la résistance de

l'air , et le fluide s'échappera par la pointe , à mesure qu'il sera fourni par le conducteur.

### *Aigrette électrique.*

690. De quelque manière qu'un corps aigu soit électrisé , il se produit à son extrémité une lumière que l'on peut apercevoir dans l'obscurité. Mais cette lumière varie dans son aspect , suivant la nature de l'électricité qui agit sur le corps aigu. Supposons qu'un corps de cette figure soit fixé sur un conducteur électrisé vitreusement : dans ce cas , le fluide vitré sortira sous la forme d'une belle aigrette lumineuse , dont les rayons exciteront dans l'air un mouvement de vibration accompagné d'un léger bruissement. Si au contraire le conducteur est électrisé résineusement , on ne verra qu'un point lumineux à l'extrémité du corps aigu.

691. La même diversité d'effets aura lieu dans le cas où le corps aigu , étant en communication avec les corps environnans , aura sa pointe tournée vers un conducteur électrisé ; le corps aigu donnera une aigrette , si cette électricité est résineuse , et un simple point de lumière , si elle est vitrée. On peut obtenir ces deux effets , en présentant une pointe de métal alternativement vis-à-vis du crochet et de la garniture extérieure d'une bouteille de Leyde , chargée à l'ordinaire , et suspendue dans l'air au moyen d'un cordon de soie ; on verra le point lumineux et l'aigrette se succéder en devenant toujours moins sensibles , et finir par disparaître au moment où la bouteille , qui dans ce cas se décharge peu à peu , aura repris son état naturel.

Cette expérience fournit , comme l'on voit , un moyen simple de distinguer l'espèce d'électricité dont un conducteur est chargé , en lui présentant une pointe à la distance de quelques centimètres. Nous reviendrons dans la suite sur les circonstances qui peuvent modifier ainsi l'aspect de la lumière produite par les phénomènes dont nous venons de parler.

## Étincelle électrique.

692. Lorsqu'on approche d'un conducteur électrisé un autre corps de nature conductrice, et d'une forme arrondie, l'action de celui-ci, beaucoup moins forte que dans le cas d'une pointe, se borne d'abord à attirer dans la partie antérieure du conducteur une nouvelle quantité de fluide, qui est maintenue par la résistance de l'air; cette quantité augmente, et en même temps les deux parties par lesquelles les corps se regardent, s'électrisent de plus en plus, à mesure que la distance diminue; et il y a un terme où l'air cédant à la force d'attraction qui sollicite les deux fluides, ceux-ci s'échappent avec une espèce d'explosion, pour se réunir l'un à l'autre, et cette explosion est accompagnée d'une vive étincelle.

Tous ceux qui ont vu des expériences électriques, savent qu'un homme placé sur un support à isoler et mis en communication avec le conducteur de la machine, devient à son tour capable d'étinceler, et d'offrir divers autres phénomènes observés, pour la première fois, par Dufay, qui ne pouvait revenir de sa surprise, en voyant que le pouvoir de les produire, déjà si singulier dans la machine, avait passé dans l'observateur lui-même.

On sait aussi que lorsqu'on présente à cet homme électrisé une cuiller pleine d'alcool légèrement chauffé, ou d'éther à froid, l'approche de son doigt fait naître à la fois la lumière et l'inflammation.

## Pistolet électrique.

693. Une des expériences les plus intéressantes, relatives à la faculté qu'a le fluide électrique d'allumer différents corps, est celle qui se fait au moyen d'un instrument dont l'invention est due au célèbre Volta, et qui porte le nom de *pistolet électrique*. Il consiste dans un vase de cuivre en forme de sphéroïde allongé, qui est percé à ses deux sommets. Dans l'une des ouvertures, on introduit un tube de verre exactement de même diamètre, qui, d'un côté, dépasse le vase d'environ un centimètre, et de l'autre,

se plonge à l'intérieur jusque vers le milieu de la cavité du vase. Ce tube est traversé par une tige métallique, dont la partie supérieure, qui est saillante au-dessus de la sienne, porte une boule du même métal, et dont la partie inférieure excède aussi le prolongement du tube à l'intérieur. L'autre ouverture, qui est beaucoup plus grande, sert à introduire dans le vase un mélange de parties égales de gaz inflammable et d'air atmosphérique, après quoi on ferme l'ouverture avec un bouchon. On prend ensuite le vase dans la main par le milieu de sa convexité, et l'on présente la boule de métal située au-dessus du tube à un conducteur électrisé, pour en tirer une étincelle. Le fluide électrique ne pouvant se communiquer au vase, parce que le tube l'en empêche, passe le long de la tige qui traverse ce tube, et à l'instant le gaz inflammable s'allume, et sort avec une vive explosion, en faisant sauter le bouchon qui s'oppose à son passage.

### Effets de l'Electricité dans le Vide.

694. Nous avons vu que le fluide électrique, vitré ou résineux, à l'état de liberté, n'a aucune affinité pour les différens corps, et n'est maintenu à leur surface que par la résistance de l'air environnant. Cette observation suffit pour indiquer que si l'on supprime l'air qui entoure un corps électrisé, le fluide sera sollicité par la force répulsive mutuelle de ses molécules à se répandre dans l'espace, et l'expérience fait voir que cette espèce d'effusion est toujours accompagnée de lumière. Ayez un long tube de verre, terminé d'un côté par une virole de cuivre, et de l'autre par un robinet que vous ouvrirez pour faire le vide dans le tube, et que vous fermerez ensuite exactement; mettez la virole en contact avec un conducteur qui reçoive sans cesse de nouveau fluide au moyen de la machine électrique; et tenez en même temps le tube par le robinet, vous verrez paraître un flot d'une lumière purpurine, qui remplira le tube, et se renouvellera continuellement. Si vous vous servez de la virole pour faire étinceler le conducteur, le jet de lumière, dont l'apparition, dans ce cas, aura lieu par de petites interruptions, en deviendra beaucoup

plus éclatant. On a cherché à diversifier le phénomène ; en modifiant de plusieurs manières l'appareil destiné à le produire, pour déterminer le fluide à prendre la forme d'une cascade, d'une gerbe, d'un soleil, et multiplier, par rapport à l'œil, les beaux effets de ces expériences, dignes d'occuper un des premiers rangs parmi celles qui font spectacle.

### Odeur que répand l'Électricité.

695. Lorsque le fluide électrique est déterminé à s'échapper d'un corps, et à traverser l'air environnant, il arrive assez souvent qu'il y répand une odeur analogue à celle de l'ail ou du phosphore. Cette odeur devient surtout sensible, lorsqu'on s'approche d'une aigrette lumineuse qui s'élance d'un corps aigu fixé sur le conducteur de la machine.

### *De l'Expérience de Leyde.*

Nous voici arrivés à l'explication d'un des faits les plus importants qui aient été découverts, relativement à l'électricité : c'est celui qui est connu sous le nom d'*expérience de Leyde*. Quelques-uns attribuent cette découverte à Cunéus, d'autres à Musschenbroeck, qui en fit part aussitôt à Réaumur. Jamais la nouvelle d'un événement extraordinaire n'excita une sensation plus générale. Il n'y eut personne qui ne voulût se faire électriser, c'était l'expression dont on se servait, et qui s'est perpétuée, comme si la singularité de l'expérience avait fait oublier qu'il y avait beaucoup d'autres manières d'électriser un corps. L'intérêt même fit des physiciens qui étalaient des machines électriques sur les places, et, pour la première fois, la multitude courut y admirer des merveilles au lieu de prestiges.

696. Voici d'abord la manière ordinaire dont se fait l'expérience : on a une bouteille de verre *ag* (*fig.* 85), dont la surface extérieure est recouverte d'une feuille d'étain battu, jusqu'à une certaine hauteur *cd*. L'intérieur est rempli, jusqu'à la même hauteur, de menu plomb ou de feuilles minces de cuivre. Dans

L'explication que nous donnerons des effets de la bouteille, nous considérerons cette matière intérieure, comme tenant lieu d'une garniture semblable à celle qui est appliquée sur la surface extérieure. La bouteille a un bouchon de liège, traversé par une tige *an* de métal, dont la partie inférieure communique avec les corps qui garnissent la capacité de la bouteille, et dont la partie supérieure, qui est recourbée, se termine par une boule métallique *b*. On prend d'une main la bouteille par le bas, et l'on met la boule *b* en contact, pendant quelques instans, avec le conducteur d'une machine électrique dont le plateau est en mouvement; on retire ensuite la bouteille, et on touche la boule *b* avec un doigt de l'autre main, ou avec un corps métallique que l'on tient dans cette même main. Aussitôt on se sent frappé avec plus ou moins de violence dans les deux bras, surtout aux articulations, et quelquefois même dans la poitrine et dans d'autres parties du corps.

697. Franklin faisait consister la cause du phénomène que nous venons d'exposer, dans l'accumulation du fluide électrique sur la surface intérieure de la bouteille, tandis qu'une égale portion de celui de la surface extérieure était chassée dans les corps environnans par la force répulsive du premier fluide. Il en résultait que la quantité absolue d'électricité contenue dans la bouteille était la même qu'auparavant, la surface extérieure ayant perdu autant de fluide, dans le passage à l'état négatif, que la surface intérieure en avait reçu du conducteur dans le passage à l'état positif. La décharge avait lieu par une restitution subite, que faisait la surface intérieure à la surface extérieure, de tout le fluide qu'elle avait de plus, au moyen de la communication établie entre les deux surfaces.

Æpinus ajouta à cette explication un nouveau degré de précision et de justesse; et c'est en nous rapprochant de ses principes que nous allons la développer, d'après l'hypothèse des deux fluides.

### Idée générale de la Cause d'où dépend la Commotion.

698. Pour concevoir plus nettement la manière dont se charge la bouteille, rappelons-nous d'abord le cas où un corps conducteur, à l'état naturel et non isolé, s'approche par degrés du conducteur d'une machine ordinaire, dont le plateau est en mouvement (673). Dans ce cas, le fluide naturel du premier corps est décomposé, et le fluide vitré qui résulte de cette décomposition est repoussé dans les corps environnans, tandis que le fluide résineux est attiré vers l'extrémité qui regarde le conducteur de la machine. La quantité de ce fluide augmente à mesure que la distance diminue entre les deux corps; mais son accroissement n'a lieu que jusqu'au terme peu reculé, où l'attraction réciproque entre ce fluide et le fluide vitré fourni par la machine, devient capable de surmonter la résistance de l'air, et détermine ces fluides à s'échapper pour se réunir. Supposons maintenant que l'on place entre les deux corps une lame de verre qui, étant à la fois solide et imperméable au fluide électrique, oppose un obstacle comme invincible à la réunion des fluides vitré et résineux qui, dans le cas précédent, s'ouvriraient bientôt un passage à travers les molécules mobiles de l'air. Rien alors n'empêchera de mettre le conducteur de la machine et le corps non isolé en contact l'un et l'autre avec les faces de la lame de verre, et cette proximité donnera lieu à un dégagement beaucoup plus abondant des deux fluides, qui d'ailleurs ne pourront se réunir; et si l'on suppose, de plus, que chacune des faces de la lame de verre soit garnie d'une feuille de métal qui se termine à une certaine distance des bords, pour empêcher la communication d'une surface à l'autre, chaque fluide se répandra sur la garniture située de son côté, et cet effet, dû à l'attraction réciproque des deux fluides, ira en augmentant, jusqu'à une certaine limite que nous déterminerons dans un instant.

Voilà, en général, ce qui se passe lorsqu'on charge une bouteille de Leyde. Cet instrument n'est autre chose qu'un interm-

diaire entre deux fluides, l'un vitré fourni par le conducteur, l'autre résineux fourni par les corps environnans, dont le développement, beaucoup plus considérable que celui qui aurait lieu sans cet intermédiaire, prépare une explosion beaucoup plus forte, lorsqu'ensuite ces fluides se réuniront subitement à l'instant de la décharge.

### Explication détaillée du Phénomène.

699. Convevons que AB (*fig. 86*) représente un segment de la lame de verre qui forme le ventre de la bouteille armée à l'ordinaire, *impl* une portion de la matière métallique contiguë à la surface intérieure; et *oxst* une portion de la feuille d'étain qui recouvre la surface extérieure; que D soit un conducteur qui fasse partie d'une machine électrique, et touche le métal *in* par son extrémité, et qu'enfin *ch* soit une chaîne ou une matière conductrice quelconque adhérente par une extrémité au métal *ox*, et en communication avec le réservoir commun par son extrémité opposée.

Supposons que le conducteur D acquière, par le mouvement du plateau, une certaine quantité de fluide vitré. Aussitôt que ce fluide commence à se répandre sur le métal *in*, son action décompose le fluide naturel de la chaîne et de tous les corps environnans auxquels cette action peut s'étendre; d'où l'on conclura en appliquant ici les principes exposés précédemment (698), que la surface *ox* doit se charger de fluide résineux aux dépens de la chaîne et des corps voisins, tandis que le fluide vitré, sorti de la combinaison, est repoussé dans un sens contraire au mouvement du premier.

Soit *v'* une molécule de fluide vitré, qui s'échappe le long de la chaîne. Soit R la quantité de fluide résineux qui, à cet instant, est répandu sur la surface *ox*, et V celle de fluide vitré qui appartient à la surface *in*. La molécule *v'*, en même temps qu'elle obéit à la force répulsive du fluide V est sollicitée par l'attraction du fluide R qui tend à la retenir; et puisque la répulsion de V l'emporte, et que d'ailleurs elle agit de plus loin sur la molécule *v'*,

nous en concluons que la quantité de fluide vitré contenue dans  $V$  est plus grande que la quantité de fluide résineux renfermée dans  $R$ , ce qui est plus exact que dans la théorie de Francklin (697), où l'on supposait les deux surfaces également électrisées, l'une en plus, l'autre en moins.

D'une autre part, les molécules qui composent le fluide de  $R$ , tendent à se fuir en vertu de leur force répulsive mutuelle. Mais cette force est balancée par l'attraction des molécules du fluide  $V$ , qui regagnent, par l'avantage du nombre, ce qu'elles perdent encore ici du côté de la distance. Ces dernières molécules sont de même sollicitées à s'écarter, en se repoussant mutuellement, et cette force ne peut être entièrement vaincue par l'attraction du fluide  $R$ , dont la quantité est moindre, et qui agit de plus loin que la répulsion dont on vient de parler. Ainsi, il y aura une portion excédante de fluide  $V$ , qui ne sera maintenue que par la résistance de l'air environnant.

Nous pouvons donc imaginer que le fluide  $V$  soit composé d'une portion  $U$ , qui est retenue le long de  $ia$  par l'attraction de  $R$ , et d'une autre portion  $u$ , dont les molécules ne trouvent d'obstacle à l'effet de leur répulsion mutuelle, que dans la résistance de l'air (1).

Si l'on continue d'électriser le conducteur  $D$ , la quantité de fluide dont  $V$  s'accroîtra, déterminera la décomposition d'une nouvelle portion du fluide naturel contenu dans les corps en communication avec  $ox$ ; mais en même temps l'attraction du fluide  $R$ , devenu plus abondant, s'accroîtra à l'égard de chaque nouvelle molécule  $v'$  qui tend à s'échapper, ce qui exigera que la quantité  $u$  de fluide vitré, employée à compenser la distance, augmente de son côté, et il y aura un terme où le fluide  $u$  n'aura plus que la force nécessaire pour balancer la résistance de l'air. Passé cette limite, si l'on poursuit l'électrisation, toutes les nouvelles molécules de fluide que le conducteur  $D$  fournira, s'échapperont

---

(1) Il est visible que la quantité du fluide  $U$  sera toujours moindre que la quantité du fluide  $R$ , comme cette dernière est moindre que celle qui est renfermée dans  $V$  ou dans  $U + u$ .

successivement, c'est-à-dire, que la lame de verre se trouvera parvenue à son point de saturation, car on voit bien qu'alors il ne pourra plus rien se dégager des corps en communication avec  $ox$ , parcequ'autant la force de  $V$  agirait pour repousser, par exemple, une molécule de fluide vitré qui sortirait de la combinaison, autant l'attraction de  $R$  agirait pour la retenir.

700. Les choses étant dans cet état, vous détachez la chaîne  $ch$ , et vous appliquez un doigt sur la surface  $ox$ . Il n'arrivera rien de nouveau en vertu de ce contact; car vous ne faites que substituer votre doigt à la chaîne dont tous les points étaient sollicités, ainsi que nous l'avons remarqué; par des forces qui se faisaient équilibre. Maintenant vous portez le même doigt sur la surface  $in$ . Or ici l'équilibre n'a plus lieu, parce que rien ne balance l'action de la portion de fluide  $u$ , qui n'est retenue que par la résistance de l'air. Cette portion excédante agira donc sur le fluide naturel du doigt, pour le décomposer; elle repoussera le fluide vitré de ce doigt vers les parties postérieures, et s'unira avec le fluide résineux, pour recomposer du fluide naturel qui se perdra dans les corps environnans.

Quant au fluide  $U$ , il continuera d'être maintenu sur la surface  $in$ , par l'attraction du fluide  $R$ , et l'équilibre sera rétabli entre les forces électriques rapportées aux différens points de cette surface. Mais il sera rompu à la surface  $ox$ , parce que la portion d'électricité résineuse qui s'y trouvait retenue par l'attraction du fluide  $u$ , que le doigt a enlevé, ne le sera plus que par l'air adjacent. Donc, si vous ramenez le doigt vers la surface  $ox$ , il se fera de nouveau une décomposition du fluide de ce doigt en sens contraire, de manière que la partie vitrée du même fluide s'unira avec celle du fluide  $R$ , qui était en excès.

Il est facile maintenant de concevoir qu'en appliquant successivement le doigt sur les deux surfaces, où l'équilibre entre les forces électriques sera de même troublé tour à tour, vous parviendrez par degrés à décharger entièrement la bouteille, c'est-à-dire, que chacune des deux surfaces se dépouillera de son excès d'électricité vitrée ou résineuse, après quoi elle se trouvera ramenée à son état naturel. On observe en pareil cas, que le réta-

blissement de l'équilibre devient sensible chaque fois, par une petite étincelle qui jaillit entre le doigt et la surface touchée.

Or, si au lieu de décharger ainsi la lame de verre en détail, vous appliquez en même temps les deux mains sur les deux faces opposées de cette lame, tous les effets qui se succédaient dans la première manière d'opérer, concourront à la fois; en sorte que les deux faces attireront les fluides d'espèce différente, qui font partie du fluide naturel des deux bras, pour se combiner avec ces fluides, et repousseront avec la même vitesse, les fluides hétérogènes l'un vers l'autre; et c'est à cette complication d'effets, qui ont lieu avec une grande énergie et d'une manière sensiblement instantanée, qu'est due en général la forte commotion qu'éprouve celui qui fait l'expérience de Leyde. C'est un résultat de Mécanique, si l'on se borne à considérer les forces dont il dépend. C'est une double opération d'analyse et de synthèse, si l'on conçoit ces forces comme existantes dans des agens suggérés par une théorie plausible.

701. Lorsqu'on décharge la lame de verre par des contacts répétés, comme nous l'avons exposé il n'y a qu'un instant, les quantités de fluide vitré ou résineux, que le doigt enlève successivement à chaque surface *in* ou *ox*, diminuent nécessairement d'un contact à l'autre. M. Biot ayant cherché, par le calcul, la loi de cette diminution, a été conduit à ce résultat intéressant, que les quantités de fluide dont il s'agit forment une progression géométrique (1).

(1) Voici la démonstration de ce résultat, telle que son célèbre auteur a bien voulu nous la confier. Soit *A* (fig. 87), la surface de la lame de verre qui communiquait avec le conducteur, *B* celle qui communiquait avec le sol; désignons par *E* la quantité de fluide vitré qui était accumulée sur *A* au moment où l'on a isolé la lame, et par *e* la quantité de fluide résineux qui était fixée sur *B*. Il y aura entre *E* et *e* un certain rapport dépendant de l'épaisseur de la lame; ce rapport sera constant pour une même lame, puisque si *E* dissimule *e*, *kE* dissimulera *ke* à la même distance. On aura donc entre *e* et *E* l'équation  $e + mE = 0$ , *m* étant une constante positive et moindre que l'unité.

Au moment où l'on touche *A*, une partie du fluide qui s'y trouvait accumulé s'écoule dans le sol, et il ne reste que la quantité que *e* peut dissimuler

702. Ce qui rendait l'expérience de Leyde encore plus curieuse, c'est qu'on pouvait la faire en société, de sorte que plusieurs centaines de personnes rangées en demi-cercle, étaient toutes

à distance. Soit  $E'$  cette quantité, il y aura entre  $E'$  et  $e$  la même relation qu'entre  $e$  et  $E$ , ce qui donnera  $E' + me = 0$ . La tension sera alors du côté de l'électricité  $e$ . Si l'on touche ensuite B, il y restera une certaine quantité d'électricité que nous nommerons  $e'$ ; la tension renaîtra sur l'autre face et l'on aura  $e' + mE' = 0$ .

En continuant de représenter les effets des différens contacts, on trouvera une série d'équations semblables aux précédentes; et en les réunissant à celles-ci, on aura,

$$\begin{aligned} e + mE &= 0, \\ E' + me &= 0, \\ e' + mE' &= 0, \\ E'' + me' &= 0, \\ e'' + mE'' &= 0, \\ E^{(n+1)} + me^n &= 0. \end{aligned}$$

$n$  étant le nombre des contacts. à l'une des faces On tire de là les deux systèmes suivans d'équations, qui se rapportent chacun de la lame de verre.

$$\begin{aligned} E' &= m^2 E, & e' &= m^2 e, \\ E'' &= m^2 E', & e'' &= m^2 e', \\ E^{(n+1)} &= m^2 E^n, & e^{(n+1)} &= m^2 e^n. \end{aligned}$$

Le premier système fait connaître les quantités de fluide qui restent successivement sur la face A, et le second celles qui restent sur la face B.

D'après ces formules, on peut calculer les quantités dont il s'agit en fonctions des premières, et l'on aura

$$\begin{aligned} E' &= m^2 E, & e' &= m^2 e, \\ E'' &= m^4 E, & e'' &= m^4 e, \\ E^{(n+1)} &= m^{2(n+1)} E, & e^{(n+1)} &= m^{2(n+1)} e. \end{aligned}$$

Et il est visible qu'elles forment une progression géométrique. Leurs différences donneront les pertes de fluide faites successivement par les deux faces en vertu des contacts répétés. Elles seront exprimées par

$$\begin{aligned} E - E' &= (1 - m^2) E, & e - e' &= (1 - m^2) e, \\ E' - E'' &= (1 - m^2) m^2 E, & e' - e'' &= (1 - m^2) m^2 e, \\ E^n - E^{(n+1)} &= (1 - m^2) m^{2n} E, & e^n - e^{(n+1)} &= (1 - m^2) m^{2n} e. \end{aligned}$$

Et l'on conçoit, à la simple inspection de ces formules, que les pertes de fluide qui ont lieu, relativement à chaque face, à mesure que l'on décharge la lame, suivent de même une progression géométrique décroissante, dont la raison est  $m$ . Ainsi plus cette quantité  $m$  sera petite, plus aussi les quantités restantes de fluide et les pertes qui leur correspondent décroîtront rapidement; en sorte qu'après un petit nombre de contacts, elles deviendront insensibles,

frappées au même instant. On résolut d'étendre encore le champ de l'expérience, en faisant entrer dans la communication, indépendamment de plusieurs observateurs, l'eau d'une rivière, de longs fils de fer, et même des portions de terrain. Les Français commencèrent, et firent parcourir à la commotion un espace de deux milles toises, à travers lequel elle fut transmise d'une manière très-sensible. Les Anglais enchérèrent sur ce résultat, et dans une de leurs expériences, le voyage (car c'en est un) fut de quatre mille d'Angleterre. Ils essayèrent de mesurer la vitesse de la commotion par un moyen analogue à celui qu'on a employé pour estimer celle du son (509). Mais la différence entre le moment du départ et celui du retour leur parut inappréciable.

703. Si l'on voulait se servir de la bouteille, pour rendre sensible l'explication que nous avons donnée de ses effets (699), en supposant qu'elle soit déchargée progressivement par des contacts répétés aux deux surfaces, on l'électrifierait d'abord comme nous l'avons dit, puis on ferait passer sous le crochet  $m$  (fig. 85), un cordon de soie, à l'aide duquel on la tiendrait suspendue, ou bien on la poserait sur un isoloir, après quoi on toucherait alternativement, avec un doigt, la boule  $b$  et la garniture extérieure.

704. Si la bouteille était isolée pendant que la boule  $b$  est en contact avec le conducteur de la machine, elle ne se chargerait pas, surtout dans le cas où l'air environnant serait très sec. Seulement sa surface intérieure recevrait du conducteur une petite

et la lame paraîtra entièrement déchargée. Comme la valeur de  $m$  dépend de l'épaisseur du verre, on voit qu'une lame très mince exigera plus de temps pour se décharger de cette manière, qu'une lame plus épaisse.

A la rigueur il faudrait une suite infinie de contacts pour décharger entièrement la lame de verre; car si l'on ajoute les formules qui donnent les pertes successives, en supposant celles-ci continuées à l'infini, on trouve pour leur somme  $(1 - m^2) E. (1 + m^2 + m^4 + \dots)$ . La série comprise entre

les deux crochets a pour somme  $\frac{1}{1 - m^2}$ , et il en résulte que la somme totale

des pertes relatives à la face A est égale à E. On trouvera de même que la somme des pertes de la face B est représentée par  $e$ . Mais c'est là un cas purement mathématique, et il arrive en général, qu'après un certain nombre de contacts, la quantité d'électricité restante cesse d'être sensible.

quantité de fluide, dont la répulsion étant sans effet sur le fluide de même nom, situé dans la garniture extérieure, ne pourrait faire passer celle-ci à l'état opposé, comme cela est nécessaire pour déterminer la charge de la bouteille.

705. Plus la bouteille est mince, et plus toutes choses égales d'ailleurs, elle s'électrise fortement. Car, d'un côté le fluide vitré de *ilpn* (fig. 86) agit avec plus d'énergie sur celui de la partie opposée, à raison d'une moindre distance entre les deux surfaces. D'une autre part, le fluide résineux à l'état de liberté sur la lame *otsx*, étant plus abondant, devient capable de maintenir, par son attraction, une plus grande quantité de fluide vitré dans la lame *ilpn*; d'où il suit que le point de saturation de la bouteille sera plus élevé que si le verre avait eu plus d'épaisseur. Dans le même cas, les deux quantités de fluide V et R différeront moins l'une de l'autre, ou, ce qui revient au même, la quantité *x*, qui compense ce que la force du fluide de *ilpn* perd relativement à la distance, sera plus petite, puisque la distance elle-même se trouvera diminuée, en sorte que cette quantité deviendra nulle si l'on suppose l'épaisseur du verre infiniment petite.

706. Comme le verre n'est jamais parfaitement imperméable au fluide électrique, il y a toujours une certaine quantité de fluide vitré ou résineux qui pénètre un peu dans l'épaisseur de la bouteille, où elle est comme refoulée, pendant que celle-ci s'électrise. Au moment où l'on décharge la bouteille, cette portion de fluide reste engagée dans le verre, par une suite de la force coercitive, en sorte qu'elle n'entre pour rien dans l'effet qui se produit alors. Mais ensuite ses molécules se dégagent les unes après les autres, et passent dans la garniture où elles déterminent une nouvelle disposition à donner la commotion, quoique dans un degré beaucoup plus faible que la première fois. C'est ce qu'éprouvent souvent ceux qui ayant fait l'expérience de Leyde, et croyant la bouteille entièrement déchargée, la reprennent au bout d'un instant; et portant de nouveau le doigt à la boule qui termine le crochet, sont surpris de recevoir encore une commotion; ce qui peut avoir lieu à plusieurs reprises, par des degrés toujours décroissans.

707. Lorsqu'on veut décharger la bouteille, sans aucune com-

motion, on se sert d'une verge de cuivre *efh* (fig. 90) recourbée en arc et terminée par deux boules, à laquelle on a donné le nom d'*excitateur*. On la prend dans la main, à l'endroit *f* de sa courbure, on pose la boule *h* sur quelque point de la garniture extérieure de la bouteille, puis on approche la boule *e* de celle qui termine le crochet, et l'on produit ainsi impunément la décharge, qui est accompagnée d'une forte étincelle. On peut, par le même moyen, allumer du coton. Pour y parvenir, on enveloppe la boule *b* (fig. 85) d'une couche mince de cette substance filamenteuse, que l'on saupoudre ensuite de résine broyée; au moment de la décharge, l'étincelle détermine l'inflammation du coton.

708. On dit d'une bouteille de Leyde qu'elle est *électrisée vitreusement*, lorsque sa garniture intérieure et son crochet sont à l'état vitré, comme dans le cas que nous venons de considérer. Lorsqu'on veut la charger résineusement, ou de manière que sa surface intérieure parvienne à l'état résineux, on la prend par le crochet, et on maintient sa garniture extérieure en contact avec le conducteur de la machine, pendant que le plateau de verre est en mouvement. On la retire après quelques instans, et on la place sur un isoloir. On peut s'en servir alors pour recevoir la commotion, comme nous l'avons expliqué plus haut (696). Dans ce cas, la bouteille étant chargée en sens inverse de celui qui a lieu, lorsqu'en s'électrisant, elle communiquait par son crochet avec le conducteur de la machine, la même inversion subsiste par rapport aux mouvemens des deux fluides dont la réunion détermine la décharge de la bouteille.

### *Appareil portatif, pour l'expérience de Leyde.*

709. On peut, sans avoir recours à la machine électrique, obtenir un effet semblable à celui que produit une bouteille de Leyde médiocrement chargée, à l'aide d'un appareil simple et resserré dans un petit espace, dont l'invention est due à M. Ingen-Housz (1), qui suffit, pour satisfaire les personnes qui désirent

---

(1) Nouvelles expériences et observations sur divers objets de Physique; Paris, 1785, t. I, p. 117 et suiv.

prendre une idée du caractère de la commotion, sans avoir besoin d'en ressentir l'énergie.

La bouteille destinée à cet usage diffère de celle de Leyde en ce qu'elle est beaucoup plus étroite et d'une forme cylindrique. De plus la tige qui en traverse le bouchon est droite dans toute sa longueur, et se termine à la naissance du goulot de la bouteille, où elle adhère à la boule métallique par l'intermède de laquelle se charge cette bouteille. Le reste de l'appareil consiste en un ruban de taffetas gommé dont la longueur est d'environ un mètre (trois pieds), et une peau de chat que l'on a mise sous la forme de deux doigtiers, qui laissent entre eux un intervalle d'environ 40 millimètres (un pouce  $\frac{1}{2}$ ), et dont les ouvertures sont tournées l'une vers l'autre, de manière qu'en écartant le pouce et l'index d'une main on puisse les faire servir d'enveloppes à ces deux doigt. Comme les doigtiers sont destinés à faire la fonction de frottoirs, on a soin, en les façonnant, de mettre le poil en dehors.

Pour faire l'expérience, on attache le ruban par une de ses extrémités à un point fixe, en sorte qu'il y reste suspendu librement. On met les frottoirs en position sur la main droite, puis on prend de la main gauche la bouteille par sa garniture extérieure. On saisit ensuite le ruban avec les deux doigtiers, à une distance de son point d'attache, qui permette de placer la boule métallique en dessus de celui qui enveloppe le pouce, et de l'y mettre en contact avec le ruban. On passe ensuite les frottoirs avec frottement sur la longueur du ruban, et on fait glisser la boule métallique à la suite de celui dont elle est voisine, de manière qu'il puisse aussitôt enlever au ruban l'électricité que le frottement a développée (1). On recommence plusieurs fois de suite la même opération, et quand on juge la bouteille suffisamment chargée, on procède, comme

---

(1) Cette manière d'opérer nous a paru plus facile et plus commode que celle qui est en usage, et qui consiste à placer la bouteille en dessus de l'index et du petit doigt, et en dessous des deux doigts du milieu, de manière que la boule métallique qui la termine se trouve du côté de l'index et surpasse assez le frottoir qui recouvre ce doigt, pour qu'à l'aide d'un petit mouvement de la main, elle soit mise en contact avec le ruban. On se sert de la main gauche qui est libre pour tenir ce ruban suspendu, pendant l'action du frottement.

dans l'expérience ordinaire, pour faire naître l'étincelle. Lorsque le temps est favorable, la commotion se fait sentir, quoique modérément, jusque dans les articulations des bras.

Une circonstance favorable au succès de l'expérience est celle où deux observateurs s'étant réunis pour la faire en commun, l'un d'eux prend le ruban par ses extrémités, et le tient bandé, tandis que l'autre fait agir le frottement, ainsi que nous l'avons indiqué.

### Carreau fulminant.

710. On substitue quelquefois à la bouteille un carreau de verre garni, sur chacune de ses faces, d'une feuille d'étain, qui ne s'étend pas jusqu'aux bords de ce carreau, mais qui laisse, tout à l'entour environ 54 millimètres, ou 2 pouces, à découvert. On met le carreau à plat sur une table, et l'on interpose, entre cette table et la garniture inférieure, une petite chaîne qui descend jusqu'au sol. On établit, au moyen d'une tige de métal, une communication entre la garniture supérieure et le conducteur de la machine. Au moment où l'appareil est fortement électrisé, si l'on prend d'une main la chaîne en contact avec la garniture inférieure, et que, de l'autre main, on touche la garniture supérieure, on reçoit une violente commotion. Mais il est facile de l'éviter, en se servant d'un excitateur pour décharger l'appareil. On a donné au carreau de verre dont il s'agit ici, les noms de *carreau magique* et de *carreau fulminant*.

### Charge par Cascade.

711. On peut charger à la fois plusieurs bouteilles, en les disposant de la manière suivante. On suspend au conducteur de la machine une première bouteille, sous laquelle est attaché un crochet. On se sert de ce crochet pour suspendre une seconde bouteille à la première. On continue la série, à l'aide du même moyen et on suspend au crochet fixé sous la dernière bouteille, une chaîne qui communique avec le sol. Lorsqu'ensuite on met le plateau de la machine en mouvement, le fluide vitré qui s'accumule sur la garniture intérieure de la première bouteille, décompose le fluide

naturel de la garniture extérieure, et repousse la partie vitrée de ce fluide dans la garniture intérieure de la seconde bouteille, et ainsi successivement. Il en résulte que toutes les surfaces se chargent l'une par l'intermédiaire de l'autre, excepté la première, qui reçoit sa charge du conducteur, et la dernière, qui reçoit la sienne des corps environnans. Si l'on détache la chaîne suspendue sous la dernière bouteille, on pourra les décharger toutes en détail, comme nous l'avons exposé dans le cas d'une seule bouteille (700), en se bornant à toucher alternativement, d'abord le bouton qui communique avec la garniture intérieure de la première, puis la garniture extérieure de la dernière (1). On pourra aussi décharger tout d'un coup l'ensemble des bouteilles, en recevant la commotion, par les contacts simultanés des deux mains appliquées

(1) M. Biot a étendu au cas que nous considérons ici, l'analyse qui lui a servi à déterminer la loi à laquelle sont soumises les pertes que les deux surfaces d'une même bouteille font de leur fluide par des contacts successifs. Pour développer ce nouveau résultat, il se borne à considérer les états des trois lames de verre (fig. 88) qui communiquent entre elles, et qui représentent trois bouteilles disposées comme nous l'avons dit. Ces lames étant censées être égales en tout on aura d'abord

$$\begin{aligned} e + mE &= 0, \\ e_1 + mE_1 &= 0, \\ e_2 + mE_2 &= 0. \end{aligned}$$

Mais il y a de plus ici des conditions particulières, qui sont que  $e$  et  $E_1$  résultent de la décomposition du fluide naturel de la face B, et que de même  $e_1$  et  $E_2$  résultent de la décomposition du fluide naturel de la face B'. De là deux nouvelles équations à joindre aux précédentes, et qui seront

$$\begin{aligned} e + E_1 &= 0, \\ e_1 + E_2 &= 0. \end{aligned}$$

Si l'on touche la face A, B'' étant isolé, toutes les quantités de fluide varieront, excepté  $e_2$ ; et en les désignant par les mêmes lettres, on aura

$$\begin{aligned} E' + me' &= 0, & e' + E'_1 &= 0, \\ E'_1 + m'e'_1 &= 0, & e'_1 + E'_2 &= 0, \\ E'_2 + m'e'_2 &= 0. \end{aligned}$$

Et ainsi de suite à chaque contact.

Les formules relatives au premier état d'équilibre donnent par l'élimination,

$$\begin{aligned} e + mE &= 0, & E_1 - mE &= 0, \\ e_1 + m^2E &= 0, & E_2 - m^2E &= 0, \\ e_2 + m^3E &= 0. \end{aligned}$$

En sorte que les quantités de fluide dissimulées sur chacune des faces

aux mêmes endroits. Cette manière de charger plusieurs bouteilles suspendues l'une à l'autre, se nomme *la charge par cascade*.

### Effets des Batteries électriques.

712. D'après l'observation que l'effet de la décharge a lieu avec plus d'énergie, à mesure que l'on augmente l'étendue des surfaces sur lesquelles les deux fluides s'accablent, on a imaginé ces puissantes batteries qui résultent d'un assemblage de plusieurs jarres que l'on fait agir toutes à la fois. Au moyen de cet appareil, un fil de fer qui est censé faire partie de l'excitateur, devient incandescent, et se disperse en une infinité de petits grains qui sont à l'état d'oxyde. On place une feuille d'or entre deux glaces que l'on serre fortement l'une contre l'autre, à l'aide d'une petite presse de bois; l'une des extrémités de la feuille communique avec la garniture extérieure de l'appareil, et l'autre avec une des boules de l'excitateur. On fait passer ainsi la décharge à travers le métal qui se réduit en poudre et s'incruste dans le verre. Un oiseau placé de manière à recevoir la commotion, est frappé de mort. Le spectateur, effrayé de la violente explosion qui produit ces phénomènes, est moins surpris d'entendre dire que la matière de l'électricité soit la même que celle de la foudre.

B, B', B'', suivent une progression géométrique décroissante. Il en serait de même, quel que fût le nombre des lames mises en communication, et la dernière serait beaucoup moins chargée que la première. Cette différence sera d'autant plus grande, que  $m$  sera moindre, et par conséquent elle croîtra à mesure que les lames seront plus épaisses.

En combinant les formules relatives au premier contact, on trouve

$$E' + m^3 e_2 = 0,$$

$$E'_1 + m^2 e_1 = 0,$$

$$E'_2 + m e_2 = 0.$$

En mettant pour  $e$  sa valeur, il vient

$$E' - m^6 E = 0,$$

$$E'_1 - m^5 E = 0,$$

$$E'_2 - m^4 E = 0.$$

La quantité  $E'$  de fluide qui reste sur la face A, après le premier contact, est donc aussi beaucoup moindre que s'il n'y avait eu qu'une seule lame.

713. A l'égard des effets qui ont lieu lorsqu'on fait subir une forte commotion à une lame très mince de métal, comme dans l'expérience que nous venons de citer, il paraît que leur véritable cause est la force expansive du fluide électrique qui agit pour dilater les corps, et écarter leurs molécules les unes des autres. Si le métal n'est pas oxydable immédiatement, l'action de cette force expansive se borne à disperser ses molécules. L'élévation de température qui survient dans ce cas, est due vraisemblablement à ce que les parties qui se dilatent davantage, compriment celles qui se dilatent moins; d'où résulte une espèce de condensation qui occasionne un dégagement de chaleur (236). Berthollet et Charles ayant fait passer de puissantes décharges électriques à travers un fil de platine, observèrent que ce fil avait seulement acquis une chaleur qu'ils jugèrent à peu près égale à celle de l'eau bouillante, et qui était par conséquent très inférieure à la chaleur capable d'opérer la fusion du platine. Si le métal est susceptible de s'oxyder facilement; si c'est, par exemple, un fil de fer ou de cuivre, l'écartement des molécules, en diminuant leur affinité réciproque, les dispose à s'unir avec l'oxygène de l'air environnant, et c'est alors l'oxydation elle-même qui produit le haut degré de chaleur auquel le métal se trouve exposé (1).

### Solution de plusieurs Difficultés.

714. Parmi les différens résultats que l'on obtient, à l'aide d'une explosion électrique, il en est un qui a fourni aux partisans de la doctrine de Franklin une objection spécieuse contre l'hypothèse des deux fluides; voici en quoi il consiste. Soient *amb*, *cnd* (fig. 91) deux conducteurs métalliques, dont l'un, tel que *amb*, communique avec la surface intérieure d'une batterie, et l'autre *cnd* avec sa surface extérieure. Supposons que l'on place entre ces deux conducteurs une carte dont GH représente la projection verticale, de manière que le conducteur *amb* touche cette carte en dessous et que le conducteur *cnd* la touche en dessus. Si l'on électrise la

---

(1) Statique chimique, t. I, p. 209 et 263.

batterie à l'ordinaire, il y aura un terme où les deux fluides se trouveront tellement accumulés dans les conducteurs, que leur attraction mutuelle donnera lieu à une décharge spontanée de la batterie. Dans ce cas l'étincelle, en partant de l'extrémité *m* du conducteur qui est à l'état vitré, glisse sur la surface *mt* de la carte, où elle forme une traînée de lumière; au même instant la carte est percée en *t*, et l'on aperçoit un point lumineux à l'extrémité *n* du conducteur *cmd*. Cette expérience s'accorde très bien avec la supposition d'un seul fluide qui, après s'être accumulé sur la surface intérieure de la batterie, l'abandonne au moment de l'explosion, et se précipitant sur le conducteur *cmd*, va remplacer le fluide dont la surface extérieure s'était dépouillée.

715. On a cité encore en faveur de la même opinion, la diversité des aspects sous lesquels se présente la lumière que l'on aperçoit à l'extrémité d'un corps aigu situé en présence d'un conducteur électrisé. Lorsque l'aigrette avait lieu, le fluide électrique sortait du corps aigu pour se rendre au conducteur qui était dans l'état négatif, et lorsqu'au contraire on ne voyait qu'un point lumineux, le fluide s'échappait du conducteur électrisé positivement, pour se porter vers la pointe qui étant dans l'état opposé, attirait à elle ce fluide. M. Trémery, professeur de Physique, d'un mérite distingué, a imaginé, pour résoudre ces difficultés, une hypothèse très admissible, qu'il a confirmée par des expériences ingénieuses (1). Suivant cette hypothèse, la force coercitive des corps isolans, c'est-à-dire, la résistance qu'ils opposent au mouvement du fluide électrique dans leur intérieur (647), ne serait pas la même pour les deux fluides vitré et résineux, en sorte qu'il pourrait bien se faire que, dans certains corps, elle fût incomparablement plus grande, relativement à l'un des fluides, que par rapport à l'autre. L'air atmosphérique serait dans ce dernier cas, et opposerait une très grande résistance au mouvement du fluide résineux, tandis qu'il ne résisterait pas, à beaucoup près avec la même force, au mouvement du fluide vitré.

D'après cette hypothèse, lorsqu'on emploierait l'appareil que

---

(1) Journal de Physique, Floréal an x, p. 357 et suiv.

nous avons décrit, il arriverait qu'au moment de la décharge le fluide vitré sortirait du conducteur *amb*, pour aller se réunir au fluide résineux qui serait maintenu autour du conducteur *cnd*, par la force coercitive de l'air; et son passage à travers la carte aurait lieu au point *t*, situé immédiatement au-dessous du point *n*, ce que nous avons vu être conforme à l'expérience.

Maintenant si, par l'effet d'une cause quelconque, comme serait celle qui apporterait un changement dans la densité de l'air, la force coercitive de cet air pour le fluide résineux pouvait diminuer relativement à celle qui aurait lieu pour le fluide vitré, de manière que les deux forces parvinssent à l'égalité, les deux fluides, au moment de la décharge, se porteraient l'un vers l'autre, en sorte que l'on apercevrait un aigrette lumineuse à la pointe de chaque conducteur.

On peut faire d'autres suppositions, d'après lesquelles la force coercitive pour le fluide vitré l'emporterait à son tour sur celle qui aurait lieu à l'égard du fluide résineux; et si la première devenait incomparablement plus grande que l'autre, on aurait le phénomène inverse de celui qu'on observe dans le cas ordinaire.

716. Pour vérifier cette théorie, M. Trémery a placé l'appareil représenté (*fig. 91*) sous le récipient d'une machine pneumatique, et il a fait le vide jusqu'au point où la pression de l'air, indiquée par un baromètre d'épreuve, n'était plus que de 14 centimètres, environ 5 pouces 2 lignes. L'appareil ayant été ensuite électrisé, l'explosion s'est faite de manière que la carte a été percée au point *s*, situé à peu près au milieu de la distance entre les extrémités *m*, *n*, des deux conducteurs. Ce phénomène très remarquable indiquait que, par une suite de la diminution qu'avait subie la densité de l'air, le rapport entre ses forces coercitives, à l'égard des deux fluides, avait varié de manière qu'elles étaient devenues sensiblement égales.

Le même physicien a laissé ensuite, à différentes reprises, rentrer de l'air sous le récipient; il a observé que chaque degré de densité déterminait, pour l'endroit où la carte était percée, une position particulière située entre le milieu *s* de la carte, et l'extrémité *n* du conducteur électrisé résineusement.

717. On voit maintenant à quoi tient la différence entre les deux aspects sous lesquels s'offre la lumière qu'on aperçoit à l'extrémité d'un corps aigu, suivant la diversité des circonstances. Si le corps aigu est situé vis-à-vis d'un conducteur chargé de fluide résineux, le fluide vitré du premier s'élancera sous la forme de rayons divergens, pour se porter vers le conducteur où le fluide résineux, qui exerce sur lui son attraction, est maintenu par la force coercitive de l'air. Si, au contraire, le conducteur est électrisé vitreusement, son fluide sera attiré par le corps aigu, et la réunion de ce fluide avec le fluide résineux, qui n'aura lieu qu'à l'extrémité du même corps, produira le point lumineux qu'on aperçoit en cet endroit.

### *Description de quelques Instrumens électriques particuliers.*

Les physiiciens ont inventé plusieurs espèces d'instrumens propres à diverses expériences qui ont chacune un but particulier. Quatre de ces instrumens nous paraissent surtout mériter une explication.

#### Electrophore.

718. On a donné le nom d'*electrophore* à un appareil qui a la faculté de conserver long-temps sa vertu électrique. Il est composé d'un plateau *st* (*fig. 92*), de matière résineuse, sur lequel on place un disque de métal *ag*, attaché par le milieu à un cylindre de verre *mn*. Ce disque étant d'abord séparé de la résine, on électrise celle-ci en la frappant avec une peau de lièvre ou de quelque autre animal à poil; ensuite on applique le disque métallique sur la résine, et l'on pose un doigt sur le même disque pendant un petit instant. Cela fait, on retire d'abord le doigt, puis on enlève le disque au moyen du cylindre de verre *mn*, destiné à le maintenir isolé. Si l'on présente alors le doigt ou un exciteur au disque, on voit paraître une étincelle entre l'un et l'autre. En replaçant le disque sur la résine, sans être obligé d'é-

lectriser de nouveau celle-ci, et en répétant du reste le même procédé, on obtiendra de nouvelles étincelles dont la force ne paraîtra pas diminuer sensiblement; et si l'on se sert du crochet d'une bouteille de Leyde pour les produire, on parviendra, en peu de temps, à la charger.

719. Pour expliquer ces effets, remarquons qu'au moment où l'on place le disque métallique sur le plateau *st* que l'on a électrisé, le fluide résineux de ce plateau attire à lui le fluide vitré du disque métallique, lequel ne pouvant passer dans la résine dont la nature est isolante, reste sur la surface inférieure du disque. Le fluide résineux de celui-ci se trouve repoussé en même temps vers la surface supérieure. Or, le disque n'ayant ici que sa quantité naturelle de fluide électrique, qui seulement est décomposée, son fluide résineux agit, par cela seul, plus fortement sur le doigt en contact avec ce même disque, que le fluide vitré qui est à une plus grande distance (673). Mais cette action est encore aidée par celle du fluide de même nom qui appartient à la résine, et ainsi le fluide vitré, qui fait partie du fluide naturel renfermé dans le doigt, sera attiré par le disque métallique, et s'unira avec le fluide résineux répandu sur la surface supérieure. Donc si, après avoir retiré le doigt, on enlève le disque métallique, celui-ci se trouvera à l'état d'électricité vitrée; après quoi il est facile de concevoir tout le reste.

Ordinairement le plateau de matière résineuse a pour support un autre disque métallique, sur lequel on a fait couler cette matière au moment où elle était en fusion. Le fluide qui occupe la surface supérieure du plateau, agit aussi à travers l'épaisseur de celui-ci, sur le disque qui adhère à sa surface inférieure. Mais nous nous dispensons ici d'avoir égard à cette action, qui d'ailleurs est faible, pour ne considérer que la première, qui seule est dirigée vers l'effet que l'on se propose d'obtenir.

720. On peut employer le plateau de l'électrophore pour produire un de ces phénomènes, dont la première vue excite une surprise suivie du désir d'en connaître les causes. Ayant chargé résineusement une bouteille de Leyde (708), on la prend par la garniture extérieure, et après avoir mis la boule qui termine le crochet

en contact avec un point situé vers le milieu du plateau de résine, on promène cette boule, comme pour tracer au même endroit une lettre ou quelqu'autre figure. On décharge la bouteille au moyen d'un exciteur (707), et on l'électrise vitreusement, puis on reporte la boule terminale sur le plateau de résine, en la faisant serpenter vers les bords, comme pour donner un cadre à la figure du milieu.

Cela fait, on prend une espèce de petit soufflet d'une forme cylindrique, et tellement construit que quand on le fait jouer, les deux panneaux qui lui servent de bases se rapprochent et s'écartent alternativement l'un de l'autre. On introduit dans ce soufflet, par un trou pratiqué à la base supérieure, un mélange de deux poussières fines, l'une de soufre, l'autre de *minium* ou d'oxide de plomb rouge, puis on referme le trou. La base inférieure est aussi percée d'un trou que l'on laisse ouvert. On met ensuite le soufflet en mouvement, de manière à faire voler un nuage léger de poussière au-dessus de la surface du plateau qui en est bientôt parsemée. On voit paraître alors au milieu de cette surface un caractère rougeâtre, composé des parcelles de minium, qui se sont arrangées aux endroits que le crochet de la bouteille a parcourus, lorsqu'il était à l'état résineux; et la partie environnante offre une bordure jaunâtre, formée par les parcelles de soufre, qui ont pris leurs places aux endroits par lesquels a passé le même crochet électrisé vitreusement.

721. Pour expliquer ces effets, reprenons les différentes circonstances de l'expérience. Le crochet de la bouteille, chargé d'abord résineusement, communique une électricité de la même nature, à tous les points du plateau de résine successivement en contact avec lui, et le même crochet sollicité par l'électricité contraire, la partage avec les points qu'il parcourt. Lorsqu'ensuite on fait agir le soufflet, les deux poussières en s'agitant s'électrisent par leur frottement mutuel, de manière que le soufre acquiert l'électricité résineuse, et le minium l'électricité vitrée. Il en résulte que le soufre se porte vers les points du plateau qui sont à l'état vitré, tandis que le minium obéit à l'attraction de ceux qui sont à l'état résineux (662). Le plateau fait ainsi le triage des

parcelles qui doivent donner du corps aux figures tracées invisiblement par les deux fluides électriques.

Si l'on observe chacune de ces figures avec attention, on voit que les parcelles de soufre appliquées sur la partie du plateau qui est à l'état vitré, sont disposées sous la forme de petites houppes, tandis que les parcelles de minium fixées sur la partie qui est à l'état résineux ne donnent aucun signe de divergence. Ces deux aspects sont en rapport avec ceux que présentent les corps aigus, qui lancent des rayons épanouis en aigrettes, lorsque leur électricité est vitrée, et n'offrent que des points de lumière, lorsqu'ils sont à l'état résineux (690). La manière de faire l'expérience dans l'ordre que nous avons indiqué, a été raisonnée d'après la diversité dont il s'agit. Car alors les aigrettes naissent sur le cadre où elles font ornement, au lieu qu'elles porteraient la confusion dans la figure du milieu, qui doit être lisible.

### Condensateur.

722. L'invention d'un second instrument, que l'on nomme *condensateur*, est due au célèbre Volta. Son usage est de rendre sensibles de très petites quantités d'électricité fournies par des corps environnans, en les déterminant à s'accumuler sur la surface qu'il présente à leur action. Cet instrument ne diffère de l'électrophore, qu'en ce que le plateau de résine s'y trouve remplacé par un corps du genre de ceux qui n'isolent qu'imparfaitement, et qui tiennent comme le milieu entre les corps conducteurs et les corps isolans : tel est, par exemple, le marbre blanc. Concevons que le disque étant placé sur un plateau de cette substance, reçoive, par communication, un faible degré d'électricité, que nous supposerons être résineuse. Le fluide de cette électricité décomposera un peu le fluide naturel du marbre blanc, en repoussant vers le bas le fluide résineux, et en attirant vers le haut le fluide vitré. Le marbre, à son tour, agira sur le disque, en vertu de son électricité vitrée, dont la force s'exerce de plus près, pour y maintenir la petite portion d'électricité résineuse communiquée. Une seconde quantité de fluide arrivant à son

tour dans le disque métallique, décomposera une nouvelle portion du fluide naturel renfermé dans le marbre, qui acquerra de son côté un nouveau degré de force attractive, et ainsi de suite. Voici donc ce que fait le marbre : il laisse un certain jeu au fluide qu'il contient, pour s'y mouvoir, parce qu'il est demi-conducteur; mais comme il est aussi en partie isolant, le fluide résineux du disque, qu'il attire à lui, se trouve arrêté par la résistance qu'il éprouve à l'endroit du contact, qui se fait d'ailleurs par des surfaces planes, dont la figure se prête moins à l'effet de l'attraction, que celle des surfaces curvilignes. Les petites quantités d'électricité que reçoit successivement le disque, continueront donc de s'y accumuler au point que si, après l'avoir enlevé, on lui présente le doigt, on pourra en tirer une étincelle plus ou moins vive.

### Electromètre de Cavallo.

723. L'instrument ainsi appelé consiste en deux balles de moelle de sureau, d'un très petit diamètre, suspendues par le moyen de deux cheveux à une boule de cuivre qui repose sur l'orifice d'une espèce de flacon de verre. On présente un bâton de cire d'Espagne, électrisé par le frottement, à une petite distance de la boule, tandis qu'on tient un doigt posé sur cette boule. On retire ensuite, d'abord le doigt, puis la cire; et il est facile de concevoir, par un raisonnement semblable à celui que nous avons fait pour l'électrophore (719), que tout l'appareil étant alors chargé d'électricité vitrée, les deux balles doivent se repousser et se tenir écartées l'une de l'autre. Chaque fois que l'on présente de nouveau la cire à une certaine distance du point de suspension, les balles se rapprochent, parce que la cire ramène dans la boule de cuivre une partie de l'électricité des balles. Si l'on diminue la distance, il pourra arriver que les balles, en perdant tout leur fluide additionnel, rentrent dans l'état naturel, et parviennent à se toucher; alors si vous approchez encore davantage le bâton de cire, la force de son électricité résineuse, en déterminant une plus grande quantité de fluide vitré à se porter vers le point de suspension, décomposera le fluide naturel des balles, qui passera

ront ainsi à l'état d'électricité résineuse, et se repousseront de nouveau : en sorte qu'aux yeux de ceux à qui cette observation s'offrirait, sans être éclairée par la théorie, elle se trouverait en contradiction avec la première, où la cire, en s'approchant du point de suspension, sollicitait les balles à se mouvoir l'une vers l'autre.

724. Cet électromètre fournit un moyen facile de déterminer l'espèce d'électricité d'un corps quelconque. Par exemple, dans le cas que nous venons de citer, tout corps qui aura l'électricité vitrée, si on l'approche de la boule qui termine l'appareil, augmentera l'écartement entre les deux petites balles de moelle de sureau; si, au contraire, le corps est chargé d'électricité résineuse, le premier mouvement des balles sera de tendre l'une vers l'autre.

Si l'on attache sur la boule de métal une aiguille terminée par une pointe délicate, et qu'on expose l'appareil sur une fenêtre, dans un temps d'orage, on verra souvent les balles s'écarter spontanément l'une de l'autre; et en les électrisant, par le procédé que nous venons d'indiquer, on pourra connaître l'espèce d'électricité dont l'air est animé.

### Electromètre condensateur.

725. Si l'on suppose que les effets du condensateur soient combinés avec ceux de l'électromètre de Cavallo, on aura une idée du quatrième instrument, auquel Volta a donné une destination bien remarquable, en l'employant à déterminer les effets de l'électricité galvanique, dont nous parlerons dans la suite. La partie de cet instrument, qui fait l'office d'électromètre, est composée de deux brins de paille *or, us* (*fig. 93*), qui doivent être égaux et très droits. On les suspend au moyen de deux fils déliés de métal terminés en crochet, et qui jouent librement dans deux petites ouvertures pratiquées à l'extrémité inférieure d'une petite pièce de métal, dont l'extrémité opposée est soudée en dessous de l'obturateur d'un flacon *fik*. Au-dessus du même obturateur est vissé un plateau ou disque de cuivre *cd*, garni infé-

rièvement d'un fil métallique terminé par un globule  $g$ . On a donné à ce disque le nom de *plateau collecteur*, parce que son usage est de recueillir les petites quantités de fluide électrique que l'on veut rendre sensibles par leur accumulation. Ce plateau en porte un autre  $ab$ , auquel est attaché un cylindre de verre  $mn$ , et qui communique avec les corps environnans, au moyen d'une lame métallique  $ily$  courbée de manière qu'elle n'approche pas trop du plateau collecteur. Chaque plateau est verni sur la surface par laquelle il est en contact avec l'autre. Le flacon porte à l'extérieur une graduation  $tz$ , d'après laquelle on juge à peu près de l'écartement des deux pailles, suivant des lignes telles que  $op$ ,  $ux$ , mais qui n'est pas propre à donner la mesure de la force électrique d'où résulte cet écartement; car indépendamment du peu de précision d'une pareille mesure considérée en elle-même, elle n'est pas en rapport avec la force, qui suit la raison inverse du carré de la distance, et dont l'action est altérée, dans le cas présent, par l'effet de la pesanteur qui sollicite les pailles en sens contraire de l'écartement produit par l'électricité.

A mesure que le plateau collecteur reçoit successivement, à l'endroit du globule  $g$ , de petites quantités de fluide électrique, par les contacts répétés de la substance qui fournit ce fluide, que nous supposons être celui de l'électricité vitrée, il se fait une décomposition du fluide naturel renfermé dans le plateau supérieur  $ab$ ; de manière que le fluide résineux attiré vers le plateau collecteur, se trouve arrêté par les couches de vernis interposées entre les deux disques, tandis que le fluide vitré s'échappe par la lame métallique  $ily$ . Après un certain nombre de contacts, on enlève le plateau supérieur  $ab$ ; à l'instant les pailles s'écartent; et pour savoir de quelle espèce est l'électricité dont elles sont animées, et en même temps celle qui a été fournie au plateau collecteur, on emploie le moyen que nous avons indiqué, en parlant de l'électromètre de Cavallo (724).

Dans l'instrument que nous venons de décrire, le plateau collecteur représente le disque métallique du condensateur ordinaire, et le plateau supérieur produit le même effet que le plateau de marbre, avec cette différence, que les fluides s'y meuvent

librement, et que l'obstacle qui empêche l'un d'eux de passer dans le plateau collecteur, est une substance isolante intermédiaire.

## 2. De l'Electricité naturelle.

726. L'identité du fluide électrique avec la matière du tonnerre avait déjà été soupçonnée par différens physiciens, lorsque Franklin, après avoir reconnu le pouvoir des pointes, dont nous avons parlé précédemment (686), proposa d'élever en l'air une verge de fer terminée en pointe aiguë, et de s'en servir pour vérifier cette même analogie. Dalibard fut un des premiers qui mit l'idée de Franklin en exécution. Il fit construire auprès de Marly-la-Ville une cabane, au-dessus de laquelle était fixée une barre de fer de 13 mètres, ou 40 pieds de longueur, isolée par le bas. Un nuage orageux ayant passé dans le voisinage de cette barre, elle donna des étincelles à l'approche du doigt, et l'on reconnut les effets des conducteurs ordinaires que nous électrisons à l'aide de nos machines.

727. Romas, qui cultivait à Lille la Physique, poussa depuis la hardiesse au point d'envoyer vers le nuage même un cerf-volant armé d'une barre qui se terminait en pointe. La corde du cerf-volant était entrelacée avec un fil de métal, jusqu'à une certaine distance de son point d'attache, et le reste était un cordon de soie destiné à tenir l'appareil isolé et à préserver l'observateur de l'explosion. On vit sortir de cet appareil des jets spontanés de lumière de 32 décimètres, ou dix pieds de longueur, et dont le bruit était semblable à un coup de pistolet. Les dangers de toutes les expériences de ce genre sont si évidens, même en supposant des précautions, qu'elles ne peuvent être tentées que par ceux chez qui la curiosité est plus forte que la crainte. Plusieurs physiciens, renversés par les commotions qu'ils reçurent en tirant des étincelles d'un appareil qui communiquait avec l'intérieur de leur appartement, ont eu à se repentir de s'être donné un hôte si redoutable. Le célèbre Richman, professeur de Physique à Pétersbourg, y perdit la vie dans une circonstance qui semblait faite pour rendre la leçon plus frappante. Il fut renversé à côté de

l'appareil même qu'il avait disposé pour mesurer la force de l'électricité des nuages.

### *Des Éclairs et de la Foudre.*

728. L'action exercée par les instrumens que nous employons aux expériences électriques, est si éloignée de rien offrir qui soit comparable, sous le rapport de l'énergie, avec la puissance du redoutable météore qui nous occupe, qu'elles avaient paru pendant long-temps comme étrangères l'une à l'autre. Mais dans l'état actuel de nos connaissances où la parfaite ressemblance des causes dont elles dépendent, a été vérifiée par des observations décisives, il suffit de faire un retour sur les effets de la première, pour voir ces mêmes causes se rapprocher par leur manière d'agir, soit dans les grands phénomènes produits par l'électricité naturelle, soit dans les résultats de celle que développent les faibles moyens qui sont entre nos mains.

729. Lorsqu'un nuage médiocrement chargé d'électricité, lance par ses parties les plus avancées des lueurs spontanées, qui sont pour nous de faibles éclairs, nous avons le terme de comparaison dans les aigrettes lumineuses qui s'échappent en silence des pointes fixées sur le conducteur que nous électrisons, ou même des aspérités qui interrompent le poli de sa surface.

730. Lorsqu'un autre nuage saturé de fluide électrique s'approche assez d'un édifice ou d'un autre objet situé dans sa sphère d'activité, pour qu'il soit foudroyé par l'explosion que fait ce nuage et qu'accompagne un vaste éclair d'où sort un bruit formidable qui retentit au loin dans l'espace environnant, c'est le phénomène que représente, d'une manière pour ainsi dire ébauchée, l'étincelle qui sort en pétillant d'un conducteur électrisé à l'approche du doigt ou de quelque autre corps dans l'état naturel.

731. Une troisième circonstance est celle où deux nuages situés l'un au-dessus de l'autre, à une distance convenable, étant fortement électrisés en sens contraire, la double action qui en résulte, élève le phénomène au plus haut degré d'énergie. Les deux fluides entraînés par leurs attractions mutuelles se précipitent

l'un sur l'autre avec violence. Le bruit effrayant des explosions qui se succèdent sans interruption, mêlé à la lumière éblouissante des éclairs, semble annoncer à chaque instant la chute de la foudre. Mais les deux attractions qui ont donné naissance au phénomène dans l'espace compris entre les deux nuages, l'y tiennent renfermé sans lui permettre de se porter vers la terre (1), en sorte que tous ces symptômes en apparence si alarmans, se termineraient presque toujours par un calme inattendu, s'ils n'étaient ordinairement suivis d'une grêle, désastreuse à la formation de laquelle ils ont eux-mêmes concouru, comme nous le dirons bientôt. Ce phénomène nous est retracé par les effets de nos machines que peignent si bien les expressions de *décharges électriques*, dont nous nous servons pour les désigner. Telle est en particulier celle que subit une grande bouteille de Leyde, au moment où une vive étincelle qui éclate entre l'excitateur et la boule métallique dont on l'approche, signale la réunion subite des deux fluides accumulés sur les deux surfaces de la garniture. Toute la différence consiste en ce que les fluides ne pouvant se réunir immédiatement comme ceux des deux nuages, parce que le verre leur refuse le passage, arrivent l'un à l'autre en faisant un détour à travers le corps conducteur qu'on leur présente.

On trouverait difficilement dans tout le domaine de la Physique un autre sujet où nous soyons parvenus à copier plus fidèlement la nature à l'aide de nos moyens artificiels.

### *Des Paratonnerres.*

732. Franklin, en imaginant de soutirer la matière de la foudre, s'était proposé un but plus philosophique que celui de faire des expériences électriques. Il pensait que si l'on dressait sur un bâtiment une verge de fer terminée en pointe aiguë, et que l'on établit une communication entre cette verge et le sein de la terre, elle pourrait préserver le bâtiment d'une explosion, en épuisant

---

(1) Mémoire de Volta sur la formation de la grêle. Journ. de Phys., année 1809, t. LXIX, p. 345.

le fluide des nuages orageux qui passeraient dans le voisinage. D'après cette idée, on a construit dans plusieurs endroits des instrumens de cette espèce, auxquels on a donné le nom de *paratonnerres*.

733. Beyer, artiste avantageusement connu par ses talens en plus d'un genre, et qui s'occupait spécialement de la construction des paratonnerres, avait imaginé de terminer la verge de cet instrument par une pointe de platine, comme étant un métal à la fois très réfractaire et exempt d'oxydation. Il employait pour conducteurs, des espèces de cordes formées de fils de fer tressés, et enduites d'une couche de vernis gras. La corde se prolonge jusqu'au bord d'un puits, où elle est attachée à une tige de fer dont l'extrémité inférieure est plongée dans l'eau. L'emploi de cette matière conductrice a l'avantage d'exiger beaucoup moins de temps pour la communication à établir entre la verge et le réservoir commun, et de diminuer relativement à l'édifice lui-même, les dommages et les réparations inséparables d'une opération de cette nature.

734. Parmi les physiiciens, les uns ont regardé les avantages des paratonnerres comme incontestables. D'autres ont pensé que leur action devait être trop faible pour protéger l'édifice qui les portait; c'était vouloir détourner, au moyen d'un simple tube, un grand fleuve prêt à se déborder. Quelques-uns même ont prétendu que les paratonnerres étaient plus propres à provoquer la chute de la foudre sur le bâtiment, qu'à la prévenir. Mais on ne peut douter de l'utilité de ces instrumens, surtout depuis que l'expérience a appris qu'une explosion, qui d'ailleurs paraissait inévitable, s'était faite sur la pointe même du paratonnerre, sans que l'édifice en eût été endommagé. On a présenté, il y a un certain nombre d'années, à l'Académie des Sciences, une verge de paratonnerre sur laquelle la foudre était tombée, et dont la pointe était émoussée et semblait avoir été fondue. Le fluide électrique avait suivi la communication établie entre la verge de fer et le sein de la terre, et la maison était restée intacte. Mais lorsqu'on veut élever des paratonnerres sur des édifices d'une certaine étendue, il est nécessaire de les multiplier. Ils ne doivent pas être trop rapprochés, sans quoi ils se nuiraient entre eux, comme nous avons

vu (688) que plusieurs pointes situées à de petites distances respectives, vis-à-vis un conducteur électrisé, s'empêchaient mutuellement de soutirer le fluide électrique. D'une autre part, ils doivent être assez voisins, pour que leurs différentes sphères d'activité ne laissent aucun espace intermédiaire; et l'on a jugé que le rayon d'une pareille sphère devait être de 10 mètres, ou environ 30 pieds, et qu'ainsi il suffirait de mettre une distance de 20 mètres, ou 60 pieds, entre un paratonnerre et l'autre.

On voit, par ce que nous venons de dire, que l'effet du paratonnerre ne se borne pas à soutirer en silence le fluide électrique, quoique ses services ne soient pas même à dédaigner dans ce cas. Mais son moment décisif est celui où tout annonçant une explosion prochaine, il se présente pour la recevoir, et détermine le fluide à prendre la route tracée d'avance, par le physicien, à côté de l'édifice, qui en est quitte pour l'ébranlement causé par le bruit.

### *Du Choc en retour.*

735. Parmi les différentes manières dont l'explosion de la foudre peut devenir funeste à ceux qui se trouvent sur un terrain dominé par un orage, il en est une qui paraît d'abord inexplicable. Elle consiste en ce qu'il est possible qu'un homme ou un animal, situé fort loin de l'endroit où la foudre éclate, soit néanmoins exposé à être dangereusement blessé, ou à perdre la vie, par une suite de l'explosion; et l'on a même cité des exemples de cette action, pour ainsi dire cachée, de la foudre. Milord Mahon, savant physicien anglais, qui, dans son *Traité d'Électricité*, s'est beaucoup occupé de cet effet singulier, en trouve l'explication dans un rétablissement d'équilibre, auquel il a donné le nom de *choc en retour* (1), et que nous allons faire connaître, en ramenant à la théorie des deux fluides le point de vue sous lequel nous le considérerons.

Soit *ab* (fig. 94) le conducteur d'une machine ordinaire, dont

---

(1) Principes d'Électricité, Londres, 1781, p. 69 et suiv.

on fasse tourner le plateau; supposons que derrière ce conducteur on en place un second  $cd$ , isolé et dans l'état naturel, à une telle distance qu'il ne puisse tirer aucune étincelle du premier; supposons enfin un troisième conducteur  $ef$ , non isolé, situé assez près du second pour que celui-ci étant électrisé, l'autre en tire des étincelles. Des deux fluides qui composent le fluide naturel de  $cd$ , celui de l'électricité résineuse restera dans ce corps, en vertu de l'attraction que le fluide vitré de  $ab$  exerce sur lui; l'autre, savoir, le fluide de l'électricité vitrée, sera repoussé dans le corps  $ef$ , qui le transmettra aux corps environnans, en sorte que le conducteur  $cd$  se trouvera électrisé résineusement. Si, dans ce moment, on décharge le conducteur  $ab$ , le suivant  $cd$  reprendra rapidement son fluide vitré qui lui sera restitué par l'intermédiaire du conducteur  $ef$ ; et si l'on suppose, au lieu du conducteur  $cd$ , une personne isolée qui présente les mains à la distance convenable des conducteurs  $ab$ ,  $ef$ , la décharge fera naître entre  $ef$  et le doigt situé du même côté, une étincelle très piquante, produite par la rentrée subite du fluide vitré qui était sorti du corps de la personne. Parmi les différentes manières d'éprouver le choc en retour, indiquée par milord Mahon, nous avons choisi celle-ci, parce qu'elle offre le cas où l'effet est le plus sensible.

Maintenant on conçoit que si l'électricité du conducteur  $ab$  était extrêmement forte, le choc en retour aurait encore lieu, dans la supposition même où il n'y aurait en présence de ce conducteur que le seul corps  $cd$  qui ne fût pas isolé; et tel est le cas qui arrive dans la nature, lorsque le choc provient d'un nuage orageux.

614. Soit  $NG$  (*fig.* 95) un de ces nuages, fortement chargé d'électricité vitrée, et  $D$  un voyageur situé dans la sphère d'activité du même nuage. Le fluide vitré de cet homme sera refoulé dans la terre par la répulsion du fluide que renferme le nuage, en sorte que le voyageur se trouvera très sensiblement à l'état d'électricité résineuse. Que dans ce moment la présence d'un objet terrestre  $G$  détermine le nuage à faire explosion, le fluide vitré repassera dans le corps du voyageur avec une rapidité et une abondance proportionnées à l'énergie avec laquelle agissait l'é-

lectricité du nuage, et la secousse qui en résultera pourra être assez forte pour tuer le voyageur. Il sera possible que, dans le même temps, des hommes ou des animaux situés à des endroits *f, b*, qui auraient paru plus exposés au danger de l'explosion, n'en reçoivent aucune atteinte.

### *Formation de la Grêle.*

736. La grêle que l'on serait tenté, au premier abord, de considérer comme ayant une grande analogie avec la neige, en diffère surtout par l'époque de sa formation qui n'a presque jamais lieu que dans les saisons chaudes. Cette formation est encore moins facile à concevoir sous d'autres rapports dont nous parlerons dans la suite, et les explications que l'on avait essayé d'en donner, étaient bien éloignées de satisfaire à l'observation des circonstances qui la déterminent ou l'accompagnent.

On supposait que la grêle devait son origine à une eau de pluie dont les gouttes s'étaient congelées au haut de l'atmosphère par l'effet d'un refroidissement dont on n'assignait pas la cause. Les globules de glace rencontraient, pendant leur chute, des gouttes d'eau liquides dont les molécules congelées elles-mêmes par le contact de ces globules, leur faisaient subir une augmentation plus ou moins sensible de volume en s'arrangeant autour d'elles par couches concentriques.

737. Mais cette hypothèse avait contre elle une difficulté insoluble, car les grains de grêle en parcourant avec des vitesses accélérées, l'intervalle entre un nuage dont l'élévation n'était pas aussi considérable qu'on l'imaginait, et la surface de la terre, n'aurait pas eu le temps de parvenir à un accroissement aussi considérable que celui qui a lieu à l'égard de quelques-uns dont le poids va jusqu'à 4 décagrammes (une once) et peut même aller beaucoup au-delà. (1)

Il fallait donc que les grains de grêle fussent restés suspendus au milieu de l'air, pendant le temps de leur formation; et d'après

---

(1) Journal de Physique, année 1809, t. LXIX, p. 286, 433 et 343.

la manière dont on considérait les choses, quelle puissance aurait pu les soutenir contre la force de la gravité ?

738. Toutes les difficultés s'évanouissent dans l'explication aussi ingénieuse que satisfaisante que le célèbre Volta a proposée du phénomène dont il s'agit (1). Voici en quoi elle consiste.

On avait remarqué depuis long-temps que la formation de la foudre, que l'on savait être produite par un dégagement rapide et abondant de fluide électrique, était souvent accompagnée de celle de la grêle. La réunion de ces deux effets, quoique très différens, dans une même partie de l'atmosphère, fit naître à M. de Volta l'idée qu'ils dépendaient d'une double action du même fluide, qui ne faisait que changer de rôle en passant de l'un à l'autre.

739. Leur rapprochement sous le rapport de la théorie se trouvait pour ainsi dire indiqué d'avance. Les physiciens avaient imaginé un appareil électrique, qui offrait une imitation en petit des explosions de la foudre. M. Volta reconnut l'image d'un autre phénomène encore plus redoutable, dans le résultat d'une expérience également familière dont on avait fait un objet d'amusement. Cette expérience, que nous avons citée plus haut, était celle où des globules de moelle de sureau sont, pour ainsi dire, ballottés entre deux disques métalliques. Il faut seulement supposer qu'on ait électrisé ces disques en sens contraire, ce qui ajoutera encore l'énergie de leurs effets.

Mais pour donner à l'explication proposée par ce savant physicien toute l'étendue dont elle est susceptible, il est nécessaire de reprendre les choses de plus haut.

740. La formation de la grêle est déterminée par le refroidissement considérable que subit la partie supérieure d'un nuage d'un brun obscur situé dans le même espace. Deux causes principales contribuent à ce refroidissement. La surface du nuage frappée par les rayons d'un soleil très vif, tel que ceux qu'il lance dans les jours les plus chauds de l'année, subit une évaporation rapide qui dépouille le nuage d'une grande partie de son calorique. De plus, diverses observations ont prouvé que la sécheresse de

---

(1) Journal de Physique, année 1809, t. LXIX, p. 286, 433 et 343.

L'air qui entoure le même nuage est beaucoup plus grande que celle des couches inférieures, en sorte que cet air avidé de molécules aqueuses ajoutait son action à celle du soleil pour favoriser l'évaporation.

741. Maintenant, pour concevoir la manière dont les grains de grêle se forment et s'accroissent, il faut supposer un second nuage situé en dessous de celui dont nous venons de parler, à la distance convenable pour que les actions d'où dépend le phénomène, et que nous ferons connaître dans un instant, puissent s'exercer librement. On doit encore admettre d'après les observations faites sur les nuages orageux, que ceux dont il s'agit ici sont dans deux états contraires d'électricités, l'une vitrée et l'autre résineuse. Les molécules aqueuses situées à la surface du nuage supérieur, congelées par l'effet du refroidissement que ce nuage a subi, composent par leur réunion des particules de neige et quelquefois de glace dont la même surface est bientôt couverte et qui sont comme les noyaux des grains de grêle dont la formation aura lieu dans les instans suivans. Ceux de ces noyaux qui sont en contact avec la partie du nuage supérieur tournée vers la terre et qui participent à son électricité, sont bientôt repoussés vers le nuage inférieur qui après les avoir attirés jusqu'au contact les repousse à son tour.

Rien ne rappelle mieux l'expérience électrique citée plus haut, dans laquelle on voit des corps légers subir une semblable alternative de mouvemens par l'effet des mêmes causes. Toute la différence entre les deux résultats consiste en ce que les grains de grêle tandis qu'ils bondissent d'un nuage à l'autre rencontrent sur leur passage des globules de vapeurs vésiculaires, disséminées dans le même espace, qui aussitôt qu'ils les ont touchés, passent à l'état de congélation dont ils sont très voisins, et s'incorporent avec eux, par une succession de couches qui font croître leur volume et leur poids jusqu'au terme où la force prépondérante de la pesanteur les précipite vers la terre.

742. On entend souvent, aux approches de la grêle, et même long-temps avant sa chute, un bruit qui paraît venir de l'endroit où se forme l'orage, et qui est semblable à celui que feraient entendre de petits corps durs, qui agités par un mouvement rapide se

heurteraient les uns contre les autres. On ne peut expliquer ce bruit, qu'en le supposant produit par les chocs qui résultent de la rencontre mutuelle des grains de grêle, tandis qu'ils s'élancent d'un nuage vers l'autre. M. de Volta semble hésiter en citant ce fait, qui lui paraît avoir besoin d'être confirmé, et qui, dans le cas où il l'aurait été, serait décisif en faveur de sa théorie. Les nombreux témoignages qui depuis en ont garanti l'existence ne permettent plus aujourd'hui de le révoquer en doute (1).

M. de Volta cite des observations qui tendent à prouver que la grande force avec laquelle les deux nuages agissent sur des grains de grêle dont le poids peut être égal à plusieurs décagrammes, n'a rien qui doive nous surprendre. Selon ce savant physicien, il suffit qu'il y ait dans l'atmosphère un vaste nuage orageux qui ne soit pas élevé de plus de 45<sup>d</sup> au-dessus de l'horizon pour que son action détermine dans un électromètre situé à une distance de plusieurs lieues, des indications très sensibles d'électricité vitrée ou résineuse. De là on peut juger combien cette action doit être puissante au contact, attendu surtout qu'elle suit la raison inverse du carré de la distance, et doit, en vertu de cette loi, s'accroître très rapidement aux approches du terme où la distance devient nulle.

M. de Volta passe en revue toutes les objections que l'on peut lui opposer et les solutions satisfaisantes qu'il en donne s'ajoutent aux motifs qui déjà en sollicitent l'adoption, lorsqu'on la considère en elle même.

(1) Ce fait est même connu depuis long-temps. On trouve dans la première encyclopédie, ayant pour titre, *Dictionnaire raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers*, t. VII. p. 928, au mot Grêle, un article très détaillé, dont l'auteur est M. de Ratte, membre de la société royale de Londres, et dans lequel ce savant dit que quand il tombe de la grêle, par un temps couvert et orageux, et même avant sa chute, on entend souvent un bruit excité dans l'air par le choc des grains de grêle, que le vent pousse les uns contre les autres avec impetuosité. Ce qu'il importe de remarquer dans ce récit, c'est que suivant l'auteur, il y a des circonstances où le bruit dont il s'agit précède l'apparition du météore.

### 3. De l'Electricité produite par la chaleur.

743. Indépendamment de tous les phénomènes que nous avons considérés jusqu'ici, et qui appartiennent tout entiers à la Physique, il en est plusieurs dont elle partage l'observation avec l'histoire naturelle. Nous nous abstenons de parler, pour l'instant, de l'électricité produite par la torpille et par quelques autres poissons qui renferment un organe particulier, dans lequel ils ont la faculté d'exciter des mouvemens, d'où résulte un phénomène semblable à celui de la bouteille de Leyde. Ce sujet sera mieux placé dans l'article où nous traiterons de l'influence de ce qu'on a appelé *galvanisme* sur l'économie animale. Il ne s'agit ici que de la vertu électrique qu'acquière certains minéraux, à l'aide de la chaleur, qui produit, dans ce cas, le même effet que le frottement sur les corps isolans ordinaires. Ce point de Minéralogie physique est d'autant plus intéressant, que la distribution de la matière électrique, dans les minéraux dont nous avons parlé, a la plus grande analogie avec celle de la matière magnétique dans le fer à l'état d'aimant, en sorte que ces minéraux offrent le véritable terme de comparaison entre l'électricité et le magnétisme.

744. Chacun des mêmes minéraux a deux points, dont l'un est le siège de l'électricité vitrée, et l'autre celui de l'électricité résineuse. Nous donnons les noms de *pôles électriques* à ces points, qui sont toujours situés dans deux parties opposées du minéral. Nous supposerons que le cristal dont nous nous servirons, pour expliquer le passage de son état ordinaire à l'état électrique, soit un de ceux dont la forme est celle d'un prisme ou d'un cylindre plus ou moins allongé, et qui appartiennent à la tourmaline. Nous décrirons plus bas des variétés de ce minéral dont la cristallisation ne laisse rien à désirer. Mais nous nous bornerons ici à la considération de la forme prismatique qui nous suffit pour remplir notre but.

745. Nous nous réservons aussi de citer, dans la suite, les circonstances où la température de l'atmosphère naturelle est seule

capable de faire naître la vertu polaire dans un cristal de tourmaline. Comme notre dessein est ici de décrire les expériences ordinaires dans lesquelles le cristal agit avec toute l'énergie dont il est susceptible, nous supposerons qu'après l'avoir fixé dans une pince d'acier attachée à un manche de bois, on l'expose à la chaleur d'un brasier; à mesure qu'elle le pénètre, elle décompose le fluide électrique qu'il renferme naturellement, et détermine les deux fluides dont il est l'assemblage à se séparer et à s'écarter l'un de l'autre par des mouvemens contraires qui ont lieu dans le sens de l'axe du cristal, en sorte que le fluide vitré se porte vers un des sommets de ce cristal, et le fluide résineux vers le sommet opposé. L'action continuée de la même cause met en liberté de nouvelles quantités de chaque fluide; mais l'accroissement de vertu qui en résulte n'a lieu que jusqu'à un certain terme au delà duquel cette vertu commence à diminuer, malgré l'augmentation de chaleur, de manière qu'à un terme plus reculé elle s'évanouit. Il arrive assez souvent que la tourmaline se trouve dans ce dernier état, lorsqu'on la retire de devant le brasier. Il faut la laisser revenir d'elle-même à la limite qu'elle avait dépassée, et c'est alors que son effet est le plus grand possible. Pendant que la température de la pierre s'abaisse ensuite graduellement, les deux fluides cédant à leur attraction mutuelle se réunissent peu à peu, et la tourmaline finit par rentrer dans l'état naturel.

746. Telle est la manière dont se combinent les actions qui déterminent le passage à l'état d'électricité, que quand l'équilibre est rétabli entre elles, les densités électriques décroissent rapidement, en partant des extrémités, en sorte qu'elles sont nulles ou presque nulles dans un espace sensible, situé vers le milieu du prisme. Par une suite nécessaire, les centres d'action qui résident dans les deux pôles sont situés près des extrémités. Nous citerons bientôt une expérience qui offre la preuve de cette distribution des deux fluides.

### Action d'une Tourmaline sur un corps à l'état naturel.

747. Lorsqu'après avoir fait chauffer une tourmaline, on la présente par un de ses pôles, à l'un des globules qui terminent l'aiguille isolée, quel que soit celui des deux fluides qui est en activité dans ce pôle, la pierre se trouve dans le même cas que si elle était uniquement sollicitée par une quantité du même fluide dont l'action fût proportionnelle à la différence entre les actions que les deux pôles exercent sur l'aiguille, à raison de celle qui existe entre les deux distances; d'où l'on conclura, d'après les principes exposés ci-dessus (675), que le globule doit être constamment attiré.

### Détermination des deux Pôles d'une tourmaline électrisée.

748. Nous verrons plus bas que le seul aspect de la forme d'une tourmaline complète suffit pour reconnaître les positions de ses pôles. Mais comme nous supposons ici que le cristal est un prisme fracturé à ses extrémités, comme le sont la plupart de ceux que l'on emploie, on ne peut de même deviner d'avance à laquelle répond le pôle vitré ou résineux; il faut que ce soit l'expérience qui le dise. On se servira, pour l'interroger, des deux appareils dont nous nommons l'un *électroscope vitré*, et l'autre *électroscoperésineux*, après les avoir mis l'un et l'autre dans l'état électrique. On leur présentera successivement l'un des pôles de la tourmaline pris à volonté. Si c'est le pôle vitré, il agira par répulsion sur l'électroscope de même nom, et par attraction sur le résineux. Le pôle de ce dernier nom sera indiqué par les effets inverses des précédens. L'explication de ce qui se passe dans ces expériences est si facile à saisir, que nous croyons devoir nous dispenser de la donner.

749. Si la tourmaline était peu électrique par la chaleur, ainsi qu'on pourrait le reconnaître à la faible action qu'elle aurait d'a-

bord exercée sur l'aiguille isolée, pour éviter alors le changement de répulsion en attraction, on substituerait aux électroscopes deux aiguilles isolées, électrisées l'une vitreusement, l'autre résineusement.

750. Si l'on a une seconde tourmaline semblable à la précédente, on peut, en combinant leurs actions, ajouter à l'expérience un nouveau degré d'intérêt. L'appareil dont nous nous servons dans ce cas, et que représente la fig. 96, est composé essentiellement de deux pièces; l'une est une tige d'argent ou de cuivre  $ab$  fixée sur une rondelle  $cc'$ , et terminée supérieurement par une pointe d'acier très aiguë  $ag$ . L'autre pièce consiste principalement dans une lame rectangulaire de même métal, relevée en équerre à échancrures  $o, l$ . Cette lame est percée en son milieu d'un trou circulaire pour recevoir une petite chape  $x$  de cristal de roche ou d'agate, qui est maintenue par un cercle métallique au moyen de deux vis  $s, z$ . L'aiguille  $ag$  fait l'office d'un pivot qui entre dans une petite ouverture pratiquée en-dessous de la chape. Vers les extrémités de la surface inférieure de la lame  $h k$ , sont attachés deux fils métalliques  $pi, uy$ , dirigés un peu obliquement à cette surface, et terminés par deux globules qui sont destinés à faire descendre le centre de gravité de l'ensemble, de manière que la lame reste toujours soutenue pendant son mouvement de rotation.

751. Après avoir fait chauffer les deux tourmalines, on en place une que représente  $m n$  dans l'échancrure  $h k$ , et l'on approche successivement de ses deux extrémités un autre corps que l'on a électrisé à l'aide du frottement. Si ce corps est, par exemple, un morceau de succin ou un bâton de cire d'Espagne, le pôle de la tourmaline sur lequel il agira par répulsion sera le pôle résineux de la pierre, et celui qu'il attirera sera le pôle vitré. On présentera ensuite l'un des deux pôles de la seconde tourmaline successivement aux deux pôles de celle qui sera dans l'appareil; s'il repousse le pôle vitré  $v$  de celle-ci et attire son pôle résineux  $r$ , on en conclura qu'il est le pôle vitré de la seconde tourmaline. S'il produit des effets inverses des précédens, ce sera le pôle résineux. On saura donc d'avance le nom de l'autre pôle qui est resté sans action; et si on le substitue au premier, l'attraction se chau-

gera en répulsion, et réciproquement, comme on a dû s'y attendre. Tous ces résultats ont été démontrés dans l'article où nous avons traité des attractions et répulsions qu'exercent l'un sur l'autre deux corps dont chacun n'est sollicité que par les fluides qui se sont dégagés de son fluide naturel. (*Voyez* p. 449.)

On a cet avantage dans les expériences de ce genre, qu'elles réussissent très bien, même par un temps humide. C'est une suite de ce que les deux fluides, après leur séparation, restent engagés dans les corps où ils sont à l'abri de toute influence extérieure.

752. Si l'on donne à la seconde tourmaline une position fixe, élevée au-dessus de celle de la tourmaline qui est dans l'appareil, de manière que les deux axes soient parallèles et éloignés de quelques millimètres l'un de l'autre, et si en même temps les pôles de noms différens se correspondent, les deux pierres conserveront leurs positions respectives; mais si elles se regardent par les pôles de même nom, la tourmaline de l'appareil commencera à tourner jusqu'à ce qu'elle ait fait une demi-révolution autour de son centre, et, après quelques oscillations, elle se fixera au-dessous de l'autre en vertu de l'attraction réciproque des pôles de noms différens.

On peut faire la même expérience de manière que les deux tourmalines changent de rôle, en fixant celle de l'appareil et en suspendant l'autre à un fil de soie. Ce sera alors celle-ci qui tournera jusqu'à ce que les pôles de noms différens se trouvent l'un au-dessous de l'autre. Le même effet aurait lieu dans le cas où la tourmaline suspendue à un fil serait plus courte que celle de l'appareil, pourvu que cette dernière eût assez de force pour agir aux distances qui résulteraient de la différence de longueur.

753. Si la seconde tourmaline que nous supposons de nouveau être fixe, se trouve placée d'un côté ou de l'autre de celle de l'appareil, et dans le même alignement, elle n'y produira aucun mouvement dans le cas où les deux pôles voisins seraient de noms différens; mais s'ils étaient de même nom, la tourmaline de l'appareil ferait une demi-révolution autour de son centre pour se mettre, à l'égard de l'autre, dans la position exigée par l'attraction électrique.

*Attractions et répulsions, que le même côté  
de la Pierre exerce sur des Corps légers.*

754. Si l'on présente un des pôles de la tourmaline à des corps légers, tels que des grains de cendre ou de râpures de bois, chaque grain, devenant un petit corps électrique, dont la partie tournée vers le pôle qui agit sur lui a acquis une électricité contraire à celle de ce pôle, se portera vers la tourmaline. Parvenu au contact, il y restera appliqué, parce que le fluide de la tourmaline, qui est un corps non conducteur, ne pouvant se communiquer à lui, tout reste dans le même état qu'auparavant. Cependant il arrive assez souvent que quelques-uns de ces grains, aussitôt qu'ils ont touché la pierre, sont repoussés. Cet effet a lieu, lorsque le petit corps a rencontré quelque molécule conductrice ferrugineuse ou autre, située à la surface de la tourmaline. Dans ce cas, si l'on suppose, par exemple, que cette molécule eût l'électricité résineuse, une portion de son fluide passera sur la partie contiguë du petit corps, qui est occupée par du fluide vitré, et s'unira avec ce fluide en le neutralisant. Alors le fluide résineux qui enveloppait l'autre partie du petit corps se trouvant en excès, ce corps sera tout entier à l'état résineux; d'où il suit que la molécule conductrice qui est dans un état semblable, le repoussera. On voit par là de quelle manière on doit entendre ce qu'ont dit quelques auteurs, que la tourmaline attirait et repoussait indifféremment par les deux bouts, sans produire ces effets constans d'attraction d'un côté, et de répulsion de l'autre, qu'on lui avait attribués. Ces derniers effets n'ont lieu qu'avec une tourmaline placée vis-à-vis d'un corps qui est déjà lui-même dans un certain état d'électricité. Les autres, qui sont variables, ont rapport au cas où les corps sur lesquels agit la tourmaline, étaient primitivement dans leur état naturel.

*Expérience relative à la Distribution des deux fluides dans une tourmaline électrisée par la chaleur.*

755. L'expérience à l'aide de laquelle on s'assure que les centres d'action d'une tourmaline sont voisins des extrémités, et que la partie moyenne est à peu près dans l'état naturel, n'est qu'une manière de répéter la précédente, en variant les positions respectives des deux corps. Soit  $m'n'$  (fig. 97), la tourmaline que l'on tient à l'aide d'une pince, et  $mn$  celle de l'appareil. Soit de plus  $\nu'$  le centre d'action vitré de la première, et  $\nu$  celui de la seconde, que nous adoptons ici par préférence aux deux centres  $r'$ ,  $r$ , dont on pourrait tout aussi bien faire choix. On dirigera la tourmaline  $m'n'$  verticalement, à une distance de l'autre, où leurs actions réciproques soient encore insensibles, et de manière que leurs positions respectives soient celles qu'indique la figure 98, qui représente leurs projections verticales. On voit qu'elles se dépassent mutuellement d'une petite quantité qui est censée être égale à la distance entre les centres d'action et les extrémités, et qui, dans plusieurs tourmalines que nous avons soumises à l'expérience, et dont l'axe avait environ 40 millimètres (13 lignes  $\frac{1}{2}$ ) de longueur, était à peu près de  $\frac{1}{25}$  de cette longueur. Les choses étant dans cet état, on fera avancer lentement la tourmaline  $m'n'$  (fig. 98), vers celle de l'appareil en la maintenant dans la même position, jusqu'à ce que le pôle  $\nu$ , fasse un petit mouvement en arrière par l'effet de la répulsion mutuelle des deux pôles (1), et à l'instant, on fera descendre peu à peu la tourmaline  $m'n'$  sur elle-même. Aussitôt qu'elle aura quitté sa première position, on verra la tourmaline  $mn$  rester immobile pendant que le centre  $\nu$  correspondra à quelque point de la partie moyenne de la tourmaline  $m'n'$ . Mais dès qu'elle sera arrivée au terme où le centre  $r'$  se trouvera vis-à-vis du centre  $\nu$ , l'extrémité  $n$ , voisine de ce dernier centre, se mettra en mouvement

(1) On doit éviter que ce pôle soit entraîné par la vitesse de rotation, ce qui serait contre le but de l'expérience

pour s'approcher de la tourmaline *m'n'* en vertu de l'attraction mutuelle des deux centres. Il est facile de voir que la marche du phénomène s'accorde avec la distribution des deux fluides dans l'une et l'autre tourmaline, telle que nous l'avons annoncée ci-dessus.

### Phénomène que présente une Tourmaline cassée.

756. Si l'on casse une tourmaline au moment où elle manifeste son électricité, chaque fragment, quelque petit qu'il soit, a ses deux moitiés dans deux états opposés, comme la tourmaline entière; ce qui paraît d'abord très singulier, puisque ce fragment, en supposant, par exemple, qu'il fût situé à l'une des extrémités de la pierre encore intacte, n'était alors sollicité que par une seule espèce d'électricité. On résout heureusement cette difficulté, à l'aide d'une hypothèse très plausible, semblable à celle que Coulomb a faite par rapport aux corps magnétiques qui présentent la même singularité, c'est-à-dire, en considérant chaque molécule intégrante d'une tourmaline, comme étant elle-même une petite tourmaline pourvue de ses deux pôles. Il en résulte que dans la tourmaline entière il y a une série de pôles alternativement vitrés et résineux; et telles sont les quantités de fluide libre qui appartiennent à ces différens pôles, que dans toute la moitié de la tourmaline encore intacte, qui manifeste l'électricité vitrée, les pôles vitrés des molécules intégrantes sont supérieurs en force aux pôles résineux en contact avec eux; tandis que c'est le contraire qui a lieu dans la moitié qui manifeste l'électricité résineuse; d'où il suit que la tourmaline est dans le même cas, que si chacune de ses moitiés n'était sollicitée que par des quantités de fluide vitré ou résineux, égales aux différences entre les fluides des pôles voisins. Maintenant, si l'on coupe la pierre à un endroit quelconque, comme la section ne peut avoir lieu qu'entre deux molécules, la partie détachée commencera nécessairement par un pôle d'une espèce, et se terminera par un pôle de l'espèce contraire. Nous donnerons un plus grand développement à cette explication, lorsque nous parlerons du magnétisme.

*Retour de l'Action polaire, en sens inverse, par l'abaissement de la température.*

757. Nous avons fait connaître les phénomènes électriques que présentent les cristaux de diverses substances, et en particulier ceux des tourmalines, à l'aide de l'élévation que l'on a fait subir à leur température en les exposant à l'action du feu. Mais la vertu polaire que ces corps sont susceptibles d'acquérir et de manifester, ne s'arrête pas au terme que l'expérience paraît indiquer lorsqu'ensuite on les laisse refroidir; et il existe, dans l'abaissement de leur température, un autre terme, où la même vertu reparaît avec des caractères qui la distinguent de la première. Que l'on nous permette de raconter ici comment la circonstance d'un froid rigoureux, où cette vertu aurait dû paraître avoir entièrement perdu la trace de son origine, a fixé notre attention sur son renouvellement qui jusqu'alors lui avait échappé.

Les observations auxquelles cette circonstance a donné lieu, ont été faites sur des cristaux de zinc oxydé de Limbourg, aux environs d'Aix-la-Chapelle, et sur des morceaux de la variété aciculaire du même minéral que l'on trouve dans le Brîsgaw. Nous avons déjà annoncé que ce minéral n'avait pas besoin d'être chauffé, pour donner des signes de la vertu électrique, et nous avons même observé qu'il la manifestait encore par un froid de 6<sup>d</sup> au dessous du zéro du thermomètre de Réaumur. C'est à l'occasion de celui qui a régné pendant l'hiver de 1819, que nous avons repris nos expériences. Le 16 janvier, ayant placé un petit morceau du minéral dont il s'agit, sur une fenêtre où était un thermomètre qui indiquait onze degrés au-dessous du zéro, et l'y ayant laissé pendant quelques instans, nous remarquâmes qu'il agissait encore très sensiblement sur l'aiguille non isolée. Nous déterminâmes ses pôles, et l'ayant porté dans une chambre où le thermomètre marquait quatre degrés au-dessus du zéro, nous continuâmes de le soumettre à l'expérience, et nous vîmes son action polaire s'affaiblir progressivement, et finir par devenir nulle. Nous l'approchâmes par degrés d'une cheminée où l'on avait

allumé du feu, jusqu'à ce qu'il n'en fût plus éloigné que d'environ un mètre ou trois pieds. Bientôt les actions de ses pôles se renouvelèrent, mais en sens inverse de celui qui avait eu lieu dans l'expérience précédente.

Nous ne doutâmes pas que ces résultats ne se vérifiassent sur des cristaux d'une espèce différente, et en particulier sur ceux qui appartiennent à la tourmaline. Nous prendrons ceux-ci pour exemples, et nous réunirons sous un même point de vue tout ce qui se passe à leur égard, dans l'intervalle compris entre les deux limites de température au-delà desquelles l'action électrique disparaît sans retour. Nous donnerons l'un nom d'*électricité ordinaire*, à celle qui est produite par la chaleur du feu, et nous appellerons *électricité extraordinaire*, celle qui naît spontanément pendant l'abaissement de la même température.

758. Nous partirons du terme où l'excès de chaleur que la tourmaline a acquis en restant exposée à l'action du feu, a fait disparaître les effets de l'électricité ordinaire. Supposons qu'après l'avoir retirée, on la laisse abandonnée à elle-même. Bientôt l'abaissement de sa température, ramènera les actions de ses pôles, telles que nous les avons décrites, et qui d'abord peu sensibles, augmenteront en énergie jusqu'à un certain terme, passé lequel elles s'affaibliront graduellement, et finiront par s'évanouir. Mais un peu au-delà de ce dernier terme, les premiers signes de l'électricité extraordinaire se montreront, c'est-à-dire que la tourmaline reprendra ses pôles, avec cette différence que leurs positions seront renversées, en sorte que celui dans lequel résidait l'électricité vitrée, manifestera l'électricité résineuse et réciproquement. Leurs actions seront d'abord croissantes, comme dans le premier cas, et ensuite décroîtront jusqu'à devenir nulles. Mais elles ne seront pas à beaucoup près aussi sensibles que celles de l'électricité ordinaire, et leur durée sera beaucoup plus courte. L'aiguille isolée, électrisée soit vitreusement, soit résineusement, est très convenable pour les expériences relatives à ce cas, parce que son électricité étant à peu près en équilibre avec celles des deux pôles, rien ne contrarie sa tendance pour agir sur l'un par attraction et sur l'autre par répulsion.

Il arrive quelquefois qu'au moment où l'électricité extraordinaire est près de se montrer, les deux pôles sont à la fois vitrés ou résineux, parce que l'un est en retard dans son passage à l'état opposé, mais il finit toujours par y arriver.

759. Nous avons observé que le degré auquel répond le point neutre, qui fait la séparation des deux électricités, variait suivant les saisons, en sorte qu'il s'élevait ou s'abaissait à mesure que la chaleur de l'atmosphère augmentait ou diminuait ; mais dans le cas même de sa plus grande élévation, nous l'avons toujours trouvé beaucoup au-dessous de celui qui se déduit de l'indication d'OEpinus, d'après laquelle la tourmaline ne deviendrait électrique qu'à une température comprise entre le 30<sup>e</sup> et 80<sup>e</sup> degré de Réaumur.

Dans des circonstances où le thermomètre était, à environ 10<sup>d</sup> au-dessus du zéro, les tourmalines que nous avons retirées de notre collection, pour les soumettre à l'action de la chaleur, étaient déjà dans l'état électrique, en sorte que quand nous les approchions de l'aiguille non isolée, elles agissaient sur elle par attraction, et lorsqu'ensuite nous présentions successivement leurs deux extrémités à l'aiguille isolée et électrisée soit vitreusement soit résineusement, elles exerçaient sur elle une vertu polaire, qui était ordinairement celle de l'électricité extraordinaire, il suffisait ensuite d'exposer la pierre à l'action du feu pendant un petit instant, pour la faire passer à l'état d'électricité ordinaire, et nous avons vu, dans certains cas, la succession des deux effets se renouveler rapidement, à mesure que nous tenions la pierre pendant une ou deux minutes, à environ 2 mètres (6 pieds) de distance du brasier, avant de la présenter à l'électromètre, et qu'ensuite nous ne faisons, pour ainsi dire, que lui montrer le feu, pour l'éprouver de nouveau.

760. Dans toutes les tourmalines que nous avons soumises à l'expérience, le degré auquel l'électricité extraordinaire a disparu, s'est trouvé le plus ordinairement au-dessus du zéro du thermomètre. Le zinc est ici dans un cas tout particulier. Nous avons vu qu'il donnait encore des signes marqués de cette espèce d'électricité, à une température de 11 degrés au dessous du zéro,

de Réaumur. On ne peut savoir ce qui serait arrivé dans le cas où l'abaissement de la température aurait continué, et si, comme il y a lieu de le croire, la vertu électrique, après s'être affaiblie graduellement, se serait éteinte à un certain terme, qui aurait donné le zéro absolu de cette vertu. Nous nous trouvons ici dans un cas semblable à celui où nous étions à l'égard du mercure, avant que le degré de froid auquel répond sa congélation, fût connu.

761. On peut observer la succession rapide des deux électricités dans le même minéral, à l'aide d'une expérience à la fois plus simple et plus curieuse, en se dispensant d'employer l'action du feu. Le cristal étant dans l'état d'électricité extraordinaire, on le presse pendant un instant entre les doigts, pour l'échauffer un peu. L'action polaire reparaît en sens inverse. On laisse le cristal placé pendant un instant sur une table de marbre. Il revient de lui-même au point neutre, et de là repasse à l'état d'électricité extraordinaire. Une nouvelle pression entre les doigts, le ramène à l'état opposé, et ainsi de suite.

*Corrélation entre la Forme des Corps électriques par la Chaleur, et les Positions de leurs Pôles.*

762. Les corps susceptibles de s'électriser par la chaleur, présentent, relativement à leurs formes, une nouvelle singularité, qui semble annoncer une dépendance mutuelle entre leur cristallisation et leur propriété électrique. On sait qu'en général la manière dont la nature élabore les cristaux est soumise à la loi de la plus grande symétrie, en ce que les parties opposées et correspondantes sont semblables par le nombre, la disposition et la figure de leurs faces. Mais les formes des cristaux électriques par la chaleur, dérogent à cette symétrie, de manière que les parties dans lesquelles résident les deux espèces d'électricité, quoique semblablement situées aux deux extrémités du cristal, diffèrent par leur configuration; l'une subit des décroissemens qui sont nuls sur la partie opposée, ou auxquels répondent des décroissemens qui dépendent d'une autre loi, ce qui peut servir à faire deviner d'avance, d'a-

près la seule inspection du cristal, de quel côté se trouvera chaque espèce d'électricité, lorsqu'on soumettra ce cristal à l'expérience. On dirait que l'affinité en réunissent les molécules de ces corps s'est concertée avec la vertu électrique, pour représenter les forces contraires des deux fluides, par la différence des lois de structure relatives aux deux sommets.

763. Ainsi dans la variété de tourmaline que nous nommons *isogone*, et que représente la figure 99, la forme est celle d'un prisme à neuf pans, terminé d'un côté par un sommet à six faces, dont trois, savoir, P, P, P, appartiennent à la forme primitive, qui est un rhomboïde, et du côté opposé par un sommet à trois faces qui sont les analogues des faces P. L'expérience prouve que c'est ce dernier sommet qui est le siège de l'électricité résineuse et que c'est le premier qui manifeste l'électricité vitrée.

Parmi les autres variétés de la même substance que nous avons déterminées, il en est une à laquelle nous donnons le nom de tourmaline *nonodécimale*, et qui mérite d'être citée de préférence. La figure 100 servira à en donner une idée. On voit que les trois faces P, P, P de la précédente y sont entourées de six facettes *t*, *t*, *t*, etc., disposées en anneau. Le prisme est terminé de même par neuf pans; mais le sommet inférieur n'offre qu'une seule face *k*, perpendiculaire à l'axe, ce qui fait ressortir, par un contraste remarquable, la différence de configuration entre les parties opposées.

764. Mais de tous les cristaux qui offrent cette corrélation entre la configuration extérieure et la vertu électrique, les plus remarquables sont ceux qui appartiennent à une substance acidifère, nommée *magnésie boratée*, et dont la forme est, en général, celle d'un cube incomplet dans toutes ses arêtes, et modifié encore par des facettes qui répondent aux angles solides. Ici les deux électricités agissent suivant les directions de quatre axes, dont chacun passe par deux angles solides opposés du cube, qui est la forme primitive. Dans une des variétés (*fig. 101*) que nous nommons *defective*, l'un des deux angles solides situés aux extrémités d'un même axe, est intact, l'autre est remplacé par une facette *s*. Il y a électricité résineuse à l'angle qui n'a subi aucune altération,

et électricité vitrée à la facette qui remplace l'angle opposé, ce qui fait huit pôles électriques, quatre pour chaque espèce d'électricité. Dans une autre variété (*fig. 102*), les angles solides analogues à ceux de la précédente, qui étaient remplacés par la facette *s*, continuent d'offrir la même modification. Les autres angles, situés comme ceux qui étaient intacts, sont ici remplacés chacun par une semblable facette *s'*; mais si elle existait seule, la symétrie se trouverait rétablie, et la loi du phénomène veut qu'elle soit altérée. Aussi observe-t-on trois autres facettes *r*, *r*, *r*, situées à l'entour de chacune des premières, en sorte que les angles qu'elles modifient, offrent, à cet égard, une sorte de surabondance, d'où est venu à cette variété le nom de *magnésie boratée surabondante*.

On pourrait demander si, au milieu de l'appareil imposant de nos machines artificielles, et de cette diversité de phénomènes qu'il offre à l'œil surpris, il y a quelque chose de plus propre à exciter l'intérêt des physiciens, que ces petits instrumens électriques exécutés par la cristallisation, que cette réunion d'actions distinctes et contraires, resserrées dans un cristal qui peut n'avoir pas deux millimètres d'épaisseur; et ici revient l'observation déjà faite tant de fois, que les productions de la nature, qui semblent vouloir se cacher à nos regards, sont quelquefois celles qui ont le plus de choses à nous montrer.

FIN DU TOME PREMIER.

---

*ERRATA pour le premier volume.*

Page 417, (Note) dernière ligne, celui de l'électricité, *ajoutez* vitrée

Page 434, 7<sup>e</sup> ligne en remontant, *au lieu de* électroscopes négatifs, *lisez* électroscopes résineux.

---

---

T A B L E

DES PRINCIPAUX ARTICLES

CONTENUS DANS CE VOLUME.

---

|  |        |
|--|--------|
| INTRODUCTION,  | pag. j |
| I. DES PROPRIÉTÉS LES PLUS GÉNÉRALES<br>DES CORPS,   | 1      |
| 1. <i>De l'Étendue,</i>  | 2      |
| 2. <i>De la Mobilité,</i>  | 6      |
| 3. <i>De l'Impénétrabilité,</i>  | 10     |
| 4. <i>De la Divisibilité,</i>  | 11     |
| II. DE L'ATTRACTION,   | 15     |
| 1. <i>De la Pesanteur,</i>   | 16     |
| 2. <i>De l'Affinité ou de l'Attraction moléculaire,</i>  | 40     |
| III. DU CALORIQUE,   | 79     |
| 1. <i>Des principes sur lesquels est fondée la Théorie<br/>        du Calorique,</i>                             | 82     |
| 2. <i>Application de la Théorie précédente à divers<br/>        Phénomènes,</i>                                  | 95     |
| 3. <i>Du Calorique spécifique,</i>   | 122    |
| 4. <i>Des Effets du Calorique pour produire dans les<br/>        corps un changement d'état,</i>                 | 126    |
| 5. <i>Des Effets de la Compression et de la Dilatation<br/>        sur le Calorique renfermé dans les Corps,</i> | 140    |

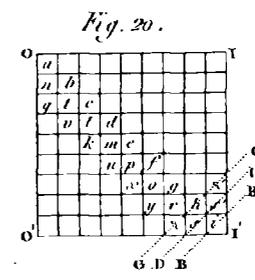
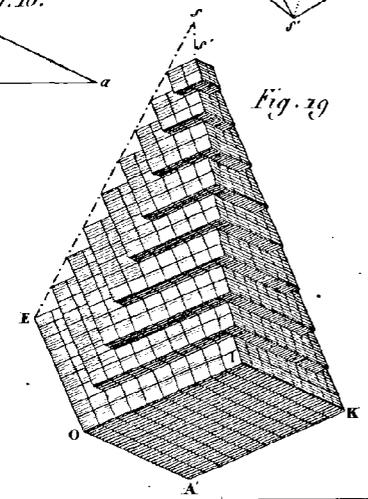
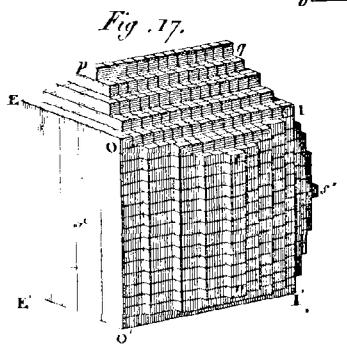
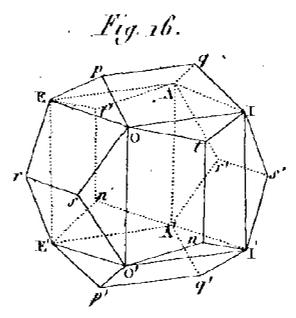
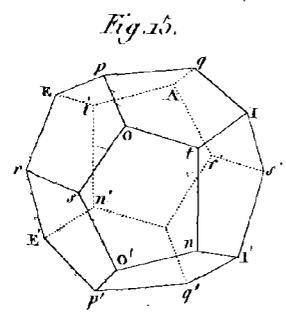
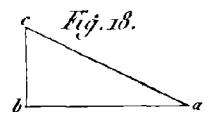
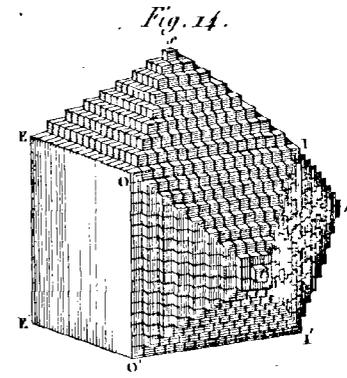
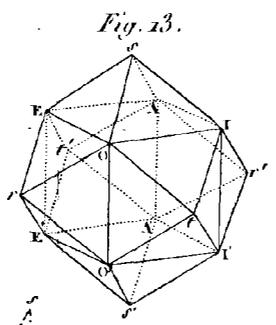
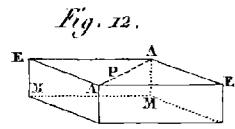
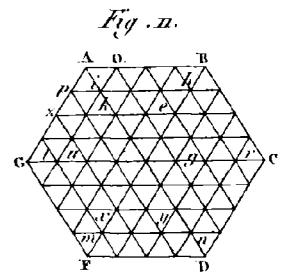
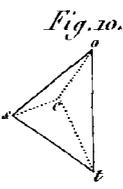
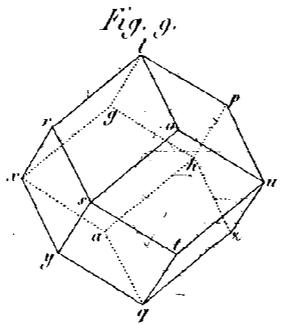
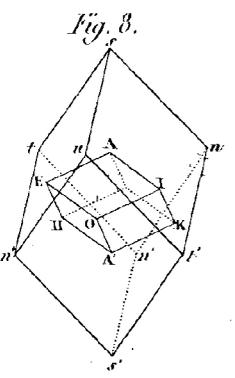
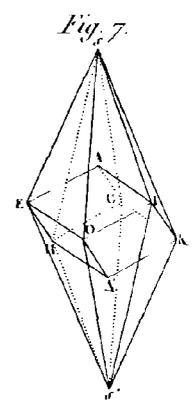
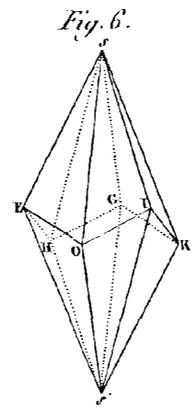
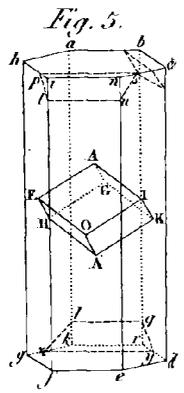
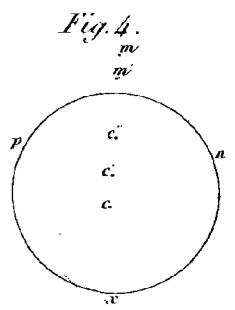
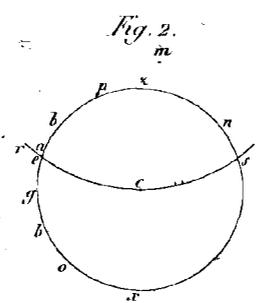
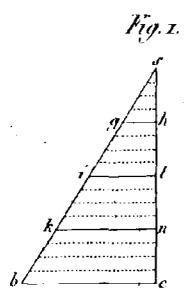
|  |          |
|--|----------|
| 6. <i>De la Loi que suivent les Fluides élastiques dans la variation de leur volume, par l'effet de la pression,</i>                 | pag. 147 |
| 7. <i>Phénomènes qui dépendent de l'action du Calorique, pour faire varier le volume et le ressort du fluide qui en est l'agent,</i> | 150      |
| 8. <i>De la Pesanteur spécifique des Fluides élastiques,</i>   | 160      |
| 9. <i>Des Dilatations et Contractions de divers Corps solides, par la variation de la Température,</i>                               | 161      |
| 10. <i>Du Thermomètre,</i>   | 165      |
| 11. <i>Des Vapeurs, et de leur Mélange avec les Gaz,</i>   | 181      |
| 12. <i>De la Combustion,</i>   | 203      |
| IV. DE L'EAU,  | 205      |
| 1. <i>De l'Eau à l'état de Liquidité,</i>  | 206      |
| 2. <i>De l'Eau à l'état de Glace,</i>  | 254      |
| 3. <i>De l'Eau à l'état de Vapeur,</i>   | 271      |
| V. DE L'AIR,   | 279      |
| 1. <i>De la Pesanteur et du Ressort de l'Air,</i>  | 280      |
| 2. <i>Des différentes Modifications dont l'Atmosphère est susceptible,</i>   | 309      |
| 3. <i>De l'Air considéré comme Véhicule du Son,</i>  | 333      |
| VI. DE L'ÉLECTRICITÉ,  | 390      |
| 1. <i>De l'Électricité produite par le Frottement ou par la Communication,</i>   | 393      |
| 2. <i>De l'Électricité naturelle,</i>  | 485      |
| 3. <i>De l'Électricité produite par la Chaleur,</i>  | 495      |

Fin de la Table des principaux Articles du Tome I.

**EXTRAIT du Catalogue de M<sup>ME</sup> COURCIER.**

- HAUY. *Traité des Caractères physiques des Pierres précieuses*, un volume in-8, 1817, 6 fr.
- *Tableau comparatif des résultats de la Cristallographie*, un volume in-8., 5 fr. 50 c.
- *Traité de Minéralogie*, deuxième édition, entièrement refaite sur un nouveau plan. Première partie, *Traité de Cristallographie*, 2 vol. in-8., et atlas in-4. (*Sous presse, pour paraître très incessamment.*)
- DELABRE, Secrétaire perpétuel de l'Institut. *Traité complet d'Astronomie théorique et pratique*, 3 vol. in-4., avec 29 planches, 1814, 60 fr.
- Ce Traité est le plus moderne, le plus complet et le plus méthodique qui existe en aucune langue, et il a l'inappréciable avantage de ne supposer à celui qui l'étudie que les connaissances les plus élémentaires d'Arithmétique, d'Algèbre et de Géométrie.*
- *Leçons élémentaires d'Astronomie* (abrégé des trois volumes ci-dessus, 1 vol. in-8., 1813, avec 14 planches, 10 fr.
- *Histoire de l'Astronomie ancienne*, deux volumes in-4., avec 17 planches, 1817, 40 fr.
- *Histoire de l'Astronomie du moyen Age*, 1 vol. in-4., 1819, avec 17 planches, 25 fr.
- *Histoire de l'Astronomie moderne*, 2 forts vol. in-4., avec 17 planches, 1822, 50 fr.
- Ces trois ouvrages réunis forment le Cours le plus complet d'Astronomie, depuis les temps les plus anciens jusqu'à nos jours. Le Lecteur, à mesure qu'il avancera, s'y trouvera partout au niveau de la science, au temps dont il étudiera l'histoire.
- Et LEGENDRE. *Détermination d'un Arc du Méridien*, in-4., 6 fr.
- DELAMÉTHÉRIE. *Considérations sur les Êtres organisés* deux volumes in-8., 12 fr.
- *De la Perfectibilité et de la Dégénérescence des Êtres organisés*, formant le tome III des *Considérations sur les Êtres organisés*, un volume in-8., 6 fr.
- *De la nature des Êtres existans*, 1 vol. in-8., 6 fr.
- *Leçons de Minéralogie* données au Collège de France, deux volumes in-8., 1812, 14 fr.
- DESTUTT-TRACY. *Éléments d'Idéologie*, 5 vol. in-8., 24 fr.
- Chaque volume se vend séparément, savoir :
- Idéologie* proprement dite, in-8., troisième édition, 1817, 5 fr.
- Grammaire*, in-8., deuxième édition, 1817, 5 fr.
- Logique*, in-8., deuxième édition, 1818, 6 fr.
- Traité de la Volonté*, deuxième édition, in-8., 1818, 6 fr.
- Principes logiques*, in-8., 1817, 2 fr.
- DUCOUÉDIC. *Ruche pyramidale*, in-8., 3 fr.
- DUPIN, Membre de l'Institut. *Développemens de Géométrie*, in-4., avec figures, 15 fr.

|   |              |
|---|--------------|
| DUPIN. <i>Essais sur Démosthène</i> , in-8.,  | 4 fr.        |
| EULER. <i>Elémens d'Algèbre</i> , 2 vol. in-8.,   | 12 fr.       |
| — <i>Lettres à une Princesse d'Allemagne</i> , 2 vol. in-8.,  | 15 fr.       |
| MARCHAND ET FLEURIEU. <i>Voyage autour du Monde</i> , en 1790, 1791 et 1792, 4 vol. in-4. et atlas,   | 40 fr.       |
| GARNIER, ex-Professeur de l'École Polytechnique, <i>Cours complet de Mathématiques</i> ,  | 52 fr. 80 c. |
| Chaque volume se vend séparément, voyez le Catalogue.   |              |
| LACROIX, Membre de l'Institut. <i>Traité du Calcul différentiel et du Calcul intégral</i> , deuxième édition, revue et corrigée, 3 vol. in-4, fig.,           | 66 fr.       |
| Le troisième volume se vend séparément,   | 25 fr.       |
| L'Auteur a fait des changemens et augmentations considérables à cette nouvelle édition, qu'il a revue avec le plus grand soin.                                |              |
| LASSALLE. <i>Traité élémentaire d'Hydrographie</i> , 1 vol. in-8., 1817, avec figures,  | 6 fr.        |
| LIBES. <i>Histoire philosophique des Progrès de la Physique</i> , 4 atre volumes, in-8.,  | 20 fr.       |
| — <i>Traité complet et élémentaire de Physique</i> , 3 vol. in-8., 1813, avec figures,  | 18 fr.       |
| MONTUCLA. <i>Histoire des Mathématiques</i> , revue et continuée par Lalande 4 vol. in-4.,  | 60 fr.       |
| PUISSANT. <i>Traité de Géodésie</i> , deuxième édition, considérablement augmentée, 2 vol. in-4., avec 13 planches, 1819,                                     | 30 fr.       |
| — <i>Traité de Topographie, d'Arpentage et de Nivellement</i> , deuxième édition, considérablement augmentée, un fort volume in-4., avec neuf planches, 1820, | 27 fr.       |
| CAGNOLI. <i>Traité de Trigonométrie</i> , 1 vol. in-4., deuxième édition,   | 18 fr.       |
| CARNOT. <i>Défense des Places fortes</i> ; 1 vol. in-4., 1812,  | 24 fr.       |
| — <i>Géométrie de Position</i> , in-4., papier vélin,   | 18 fr.       |
| — <i>Corrélation des figures de Géométrie</i> . in-8.,  | 3 fr.        |
| — <i>Réflexion sur la Métaphysique du Calcul infinitésimal</i> , in-8., nouvelle édition,   | 3 fr. 50 c.  |
| HACHETTE. <i>Traité élémentaire des Machines</i> , nouvelle édition, 1819, 1 vol. in-4. avec 32 planches,   | 25 fr.       |
| — <i>Programme d'un Cours de Physique</i> , 1 vol. in-8.,   | 5 fr. 50 c.  |
| LAGRANGE. <i>Leçons sur le Calcul des Fonctions</i> , 1 vol. in-8.,   | 6 fr. 50 c.  |
| — <i>Théorie des Fonctions analytiques</i> , 1 vol. in-4.,  | 15 fr.       |
| — <i>Mécanique analytique</i> , 2 vol. in-4.,   | 36 fr.       |
| LEGENDRE. <i>Exercices sur le Calcul intégral</i> , 3 vol. in-4.,   | 72 fr.       |
| — <i>Essai sur la Théorie des Nombres</i> , deuxième édition, un volume in-4.,  | 21 fr.       |
| — <i>Nouvelle Méthode pour la détermination des orbites des Comètes</i> , avec deux supplémens, in-4.,  | 10 fr.       |
| — Le deuxième supplément, 1820, fig., se vend séparément,   | 4 fr.        |
| MONGE. <i>Géométrie descriptive</i> , quatrième édition, revue par M. BRISSON, in-4., avec 28 planches,   | 12 fr.       |



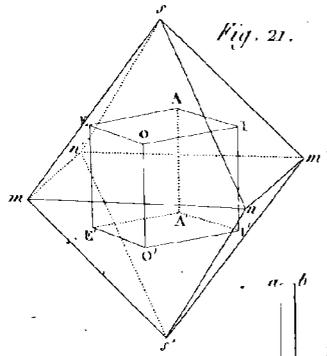


Fig. 21.

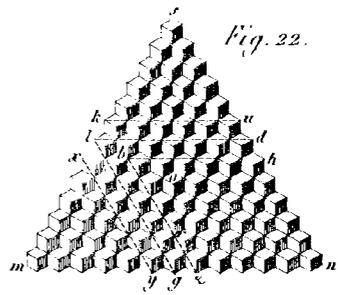


Fig. 22.

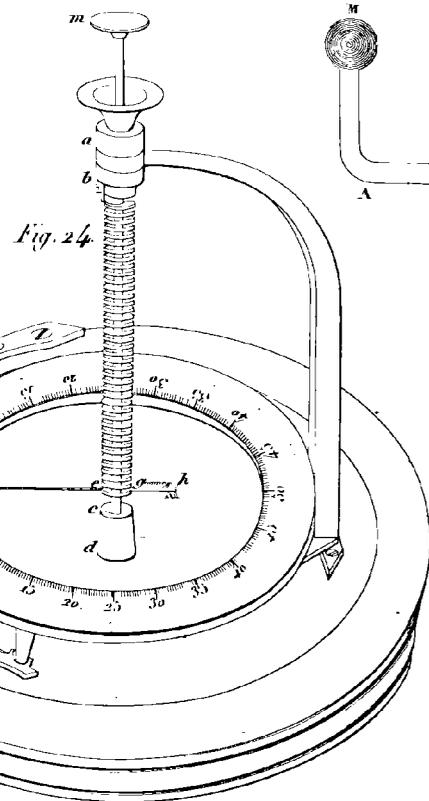


Fig. 24.

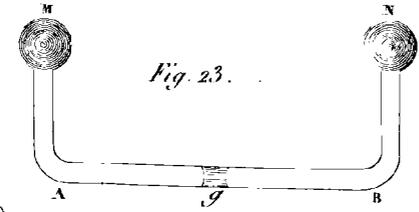


Fig. 23.

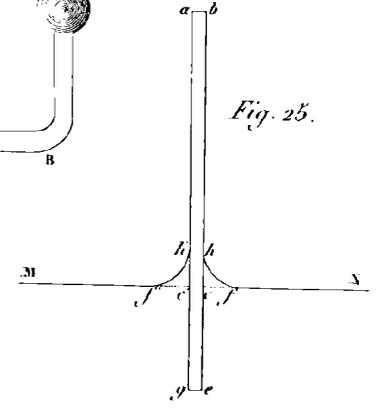


Fig. 25.

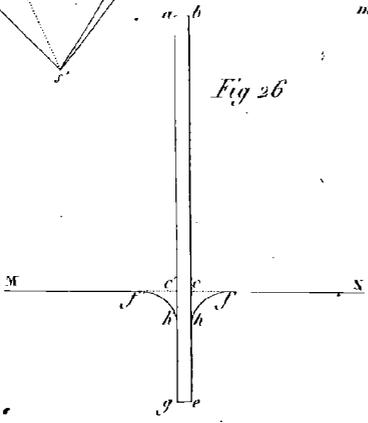


Fig. 26.

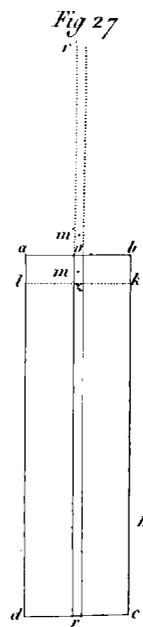


Fig. 27.

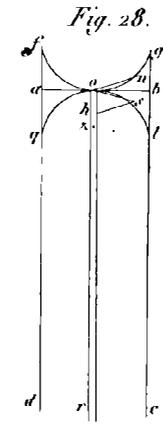


Fig. 28.

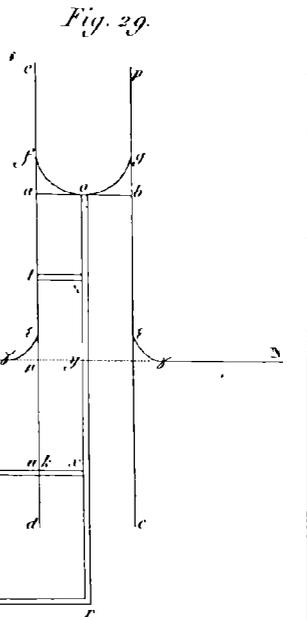


Fig. 29.

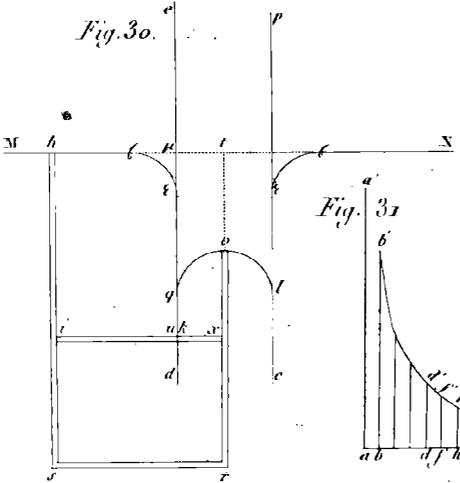


Fig. 30.

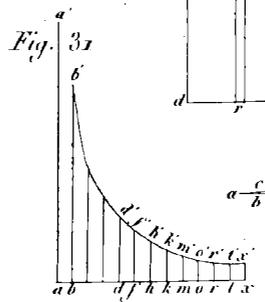


Fig. 31.

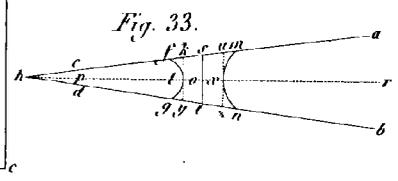


Fig. 33.

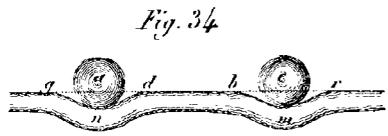


Fig. 34.

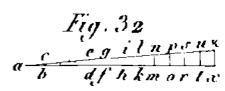


Fig. 32.

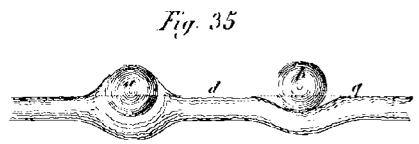


Fig. 35.

Fig. 36.

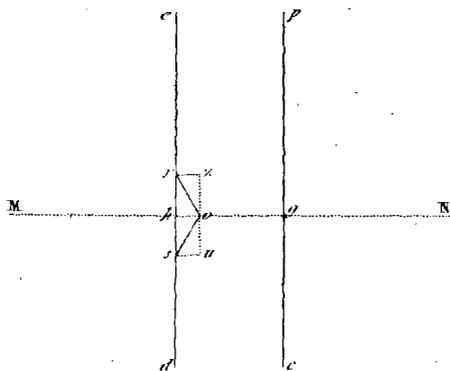


Fig. 37.

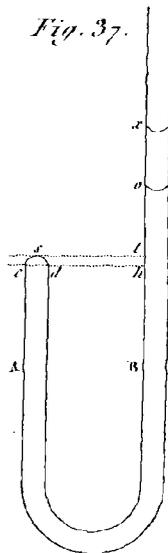


Fig. 38.

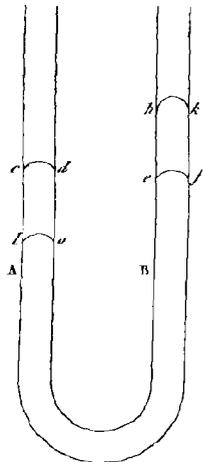


Fig. 39.

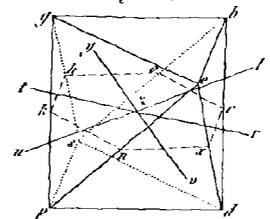


Fig. 40.

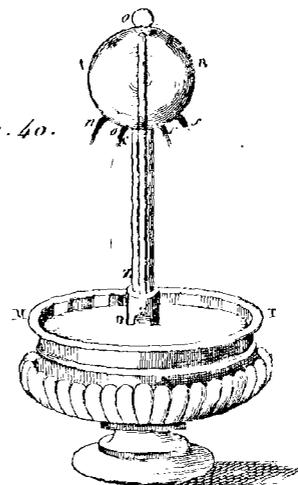


Fig. 41.

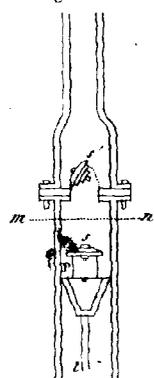


Fig. 42.

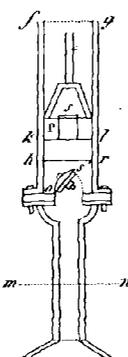


Fig. 43.

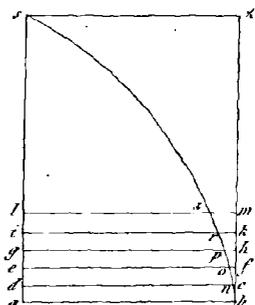
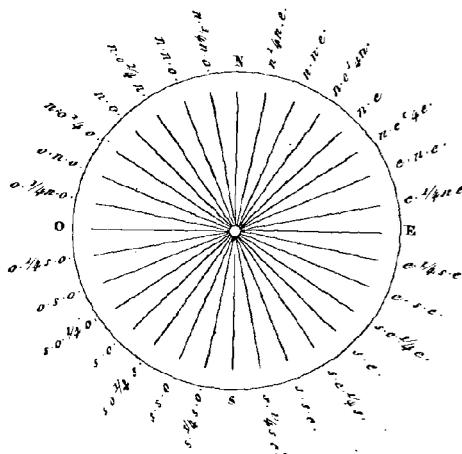


Fig. 44.



A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

Y

Z

a

b

c

d

e

f

g

h

i

j

k

l

m

n

o

p

q

r

s

t

u

v

w

x

y

z

aa

bb

cc

dd

ee

ff

gg

hh

ii

jj

kk

ll

mm

nn

oo

pp

qq

rr

ss

tt

uu

vv

ww

xx

yy

zz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

lll

mmm

nnn

ooo

ppp

qqq

rrr

sss

ttt

uuu

vvv

www

xxx

yyy

zzz

aaa

bbb

ccc

ddd

eee

fff

ggg

hhh

iii

jjj

kkk

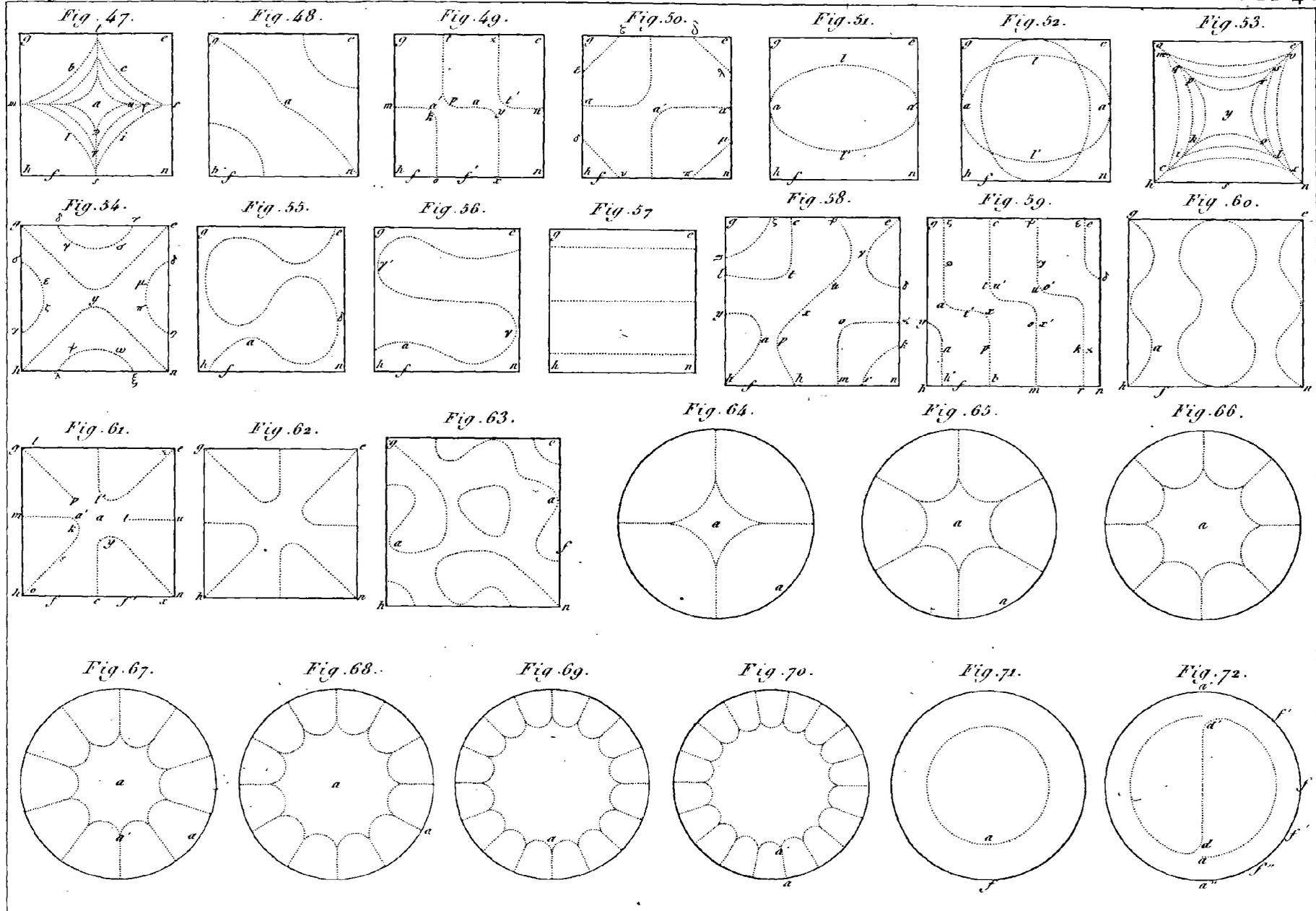
lll

mmm

nnn

ooo

ppp



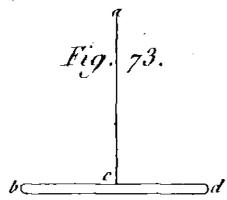


Fig. 73.

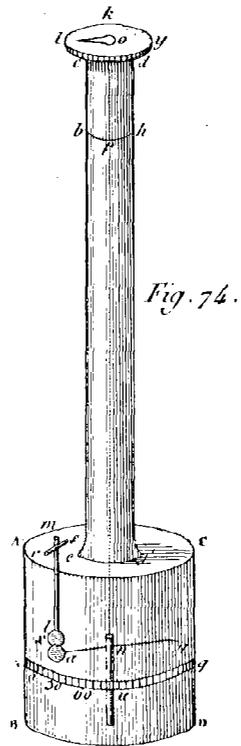


Fig. 74.

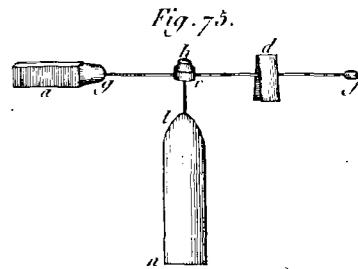


Fig. 75.

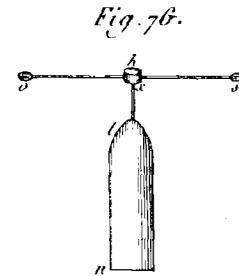


Fig. 76.

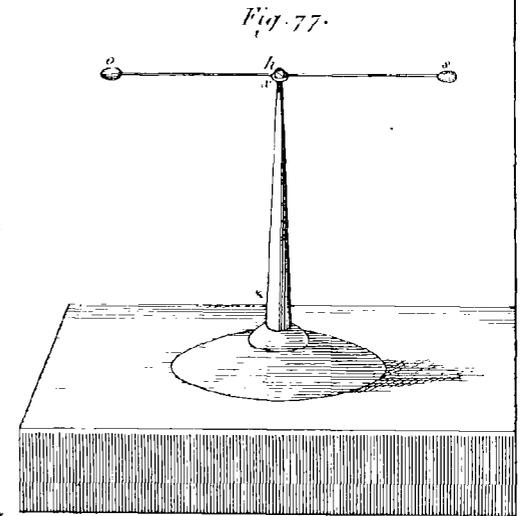


Fig. 77.

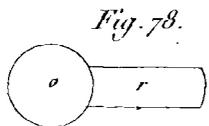


Fig. 78.

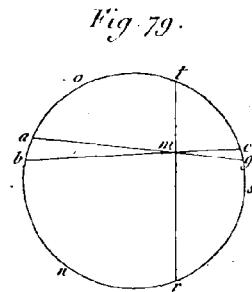


Fig. 79.

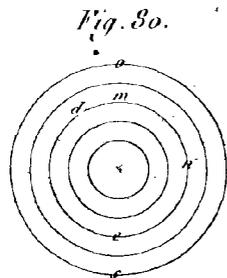


Fig. 80.

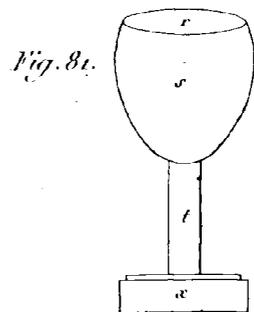


Fig. 81.

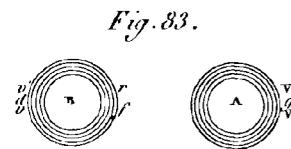


Fig. 83.

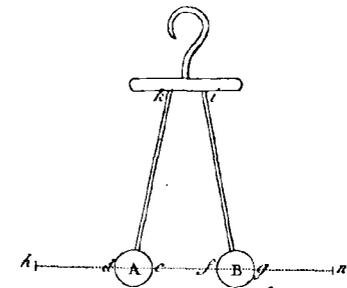


Fig. 82.

Fig. 84.

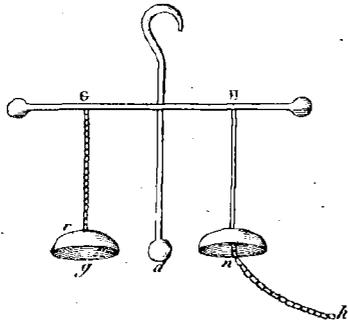


Fig. 85.



Fig. 86.

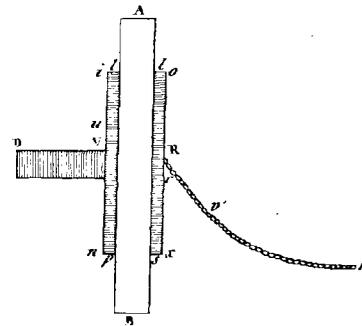


Fig. 87.

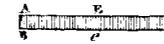


Fig. 88.



Fig. 90.

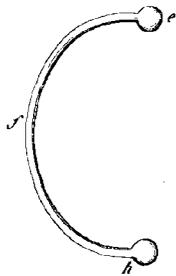


Fig. 91.

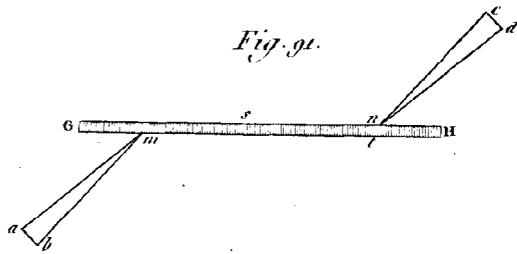


Fig. 92.

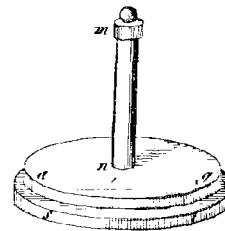


Fig. 89.

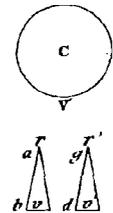


Fig. 93.

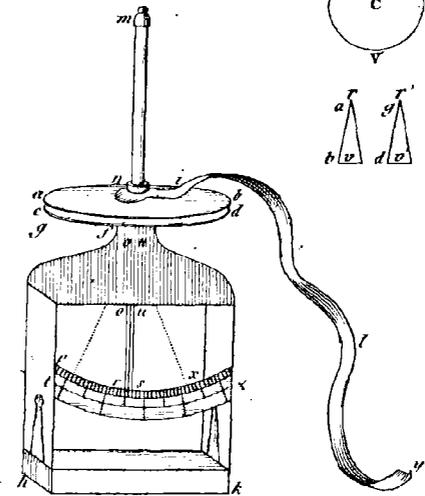


Fig. 94.

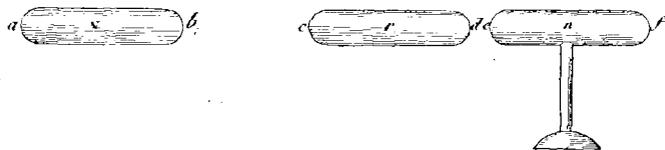


Fig. 95.

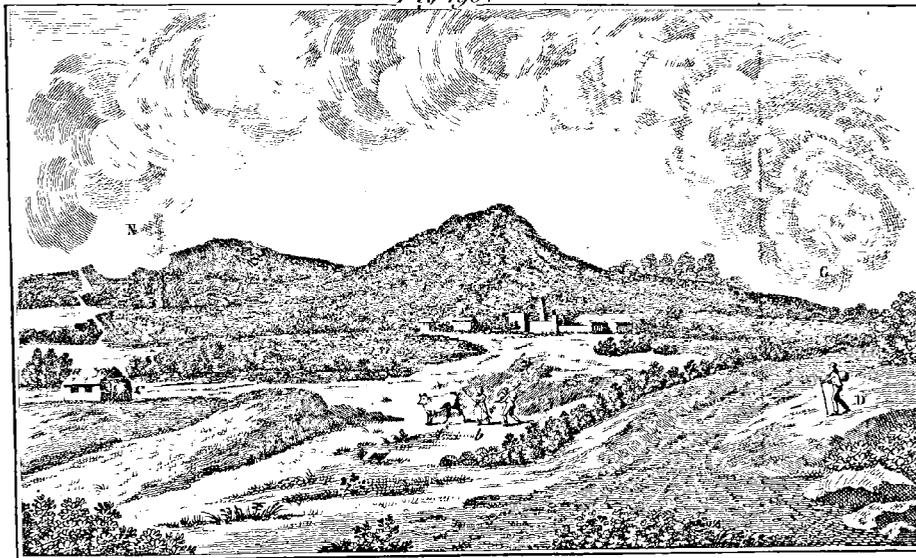


Fig. 96.

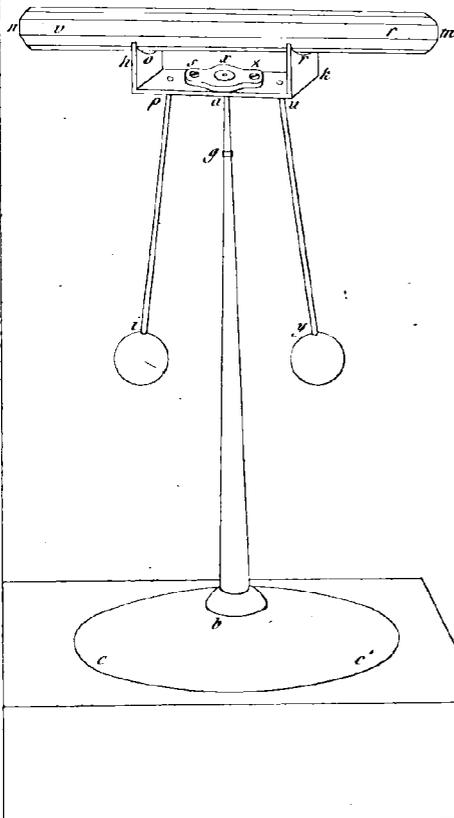


Fig. 99.

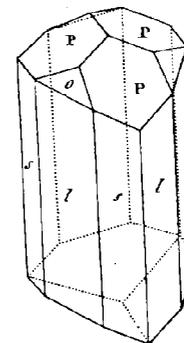


Fig. 97.

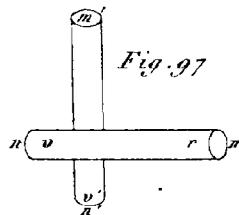


Fig. 98.



Fig. 100.

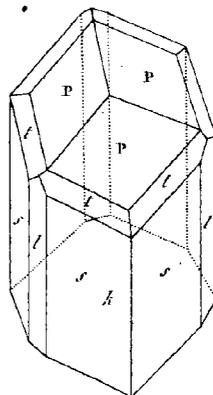


Fig. 101.

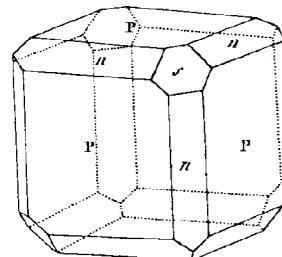


Fig. 102.

